

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ' 19

Санкт-Петербург

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'19

Сборник докладов

17–20 апреля 2019 г.

ГУАП
Санкт-Петербург
2019

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'19: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2019. 345 с.

ISBN 978-5-8088-1355-7

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых факультетом: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, ректор ГУАП
А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП
В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике
А. Л. Ронжин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники



XIV международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения-2019» проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-20021.

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-8088-1355-7

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019

УДК 62-598.5

В. С. Акопов*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Н. А. Беседин*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ГИБРИДНЫЙ ПРИВОД ДИСКОВЫХ ТОРМОЗОВ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ

Предлагается концепция использования пьезоактуаторов для увеличения быстродействия гидравлической колесной тормозной системы автомобиля. Выполнены предварительные расчеты, подтверждающие работоспособность предлагаемой гибридной дисковой тормозной системы автомобиля. Предложены эскизы конструкции.

Ключевые слова: *дисковый тормоз, быстродействие, пьезоактуаторы.*

V. S. Akopov*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
N. A. Besedin*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

HIBRID DRIVE DISC BRAKES CAR WHEELS

It is proposed that the concept of using pezoaktuatorov to increase the performance of hydraulic brake system of wheel. Executed preliminary calculation, confirming serviceability proposed hybrid car disc brake system. Proposed sketches designs.

Keywords: *disc brake, speed, pezoaktuatory.*

Механизм торможения в процессе движения является важным компонентом в автомобилях. Поскольку замедлить или остановить движущееся транспортное средство за минимальное время и контролируемым образом – необходимая функция каждого автомобиля.

В настоящее время для того, чтобы рассеять кинетическую энергию транспортного средства и остановить его, требуется обеспечить достаточное трение между вращающимся тормозным диском, соединенным с колесом, и тормозными колодками, закрепленными в суппорте. Трение генерирует тепло, которое, в свою очередь, рассеивает кинетическую энергию автомобиля. Для обеспечения силы, необходимой для получения достаточного трения, в большинстве автомобилей используется гидравлическая система. Исполнительными механизмами такой системы являются модуляторы давления, которые могут иметь различное устройство: клапанное, золотниковое, диафрагменное, смешанное. Модуляторы по командам блока управления изменяют давление рабочего тела в тормозных цилиндрах, а в некоторых конструкциях поддерживают определенное время давление постоянным. От частоты, с которой модулятор может осуществлять рабочий цикл, зависит диапазон регулирования относительно скольжения колеса, а следовательно, в известной мере и качество работы антиблокировочной системы. Модуляторы гидравлического тормозного привода антиблокировочной системы обеспечивают частоту циклов 4–12 Гц [1].

Гидравлическая система обладает высокой производительностью и надежностью, но относительно малым быстродействием. Сокращение времени отклика позволит увеличить среднее значение максимального тормозного усилия, находясь в наиболее оптимальном диапазоне коэффициента сцепления шин с дорогой, что приведет к уменьшению тормозного пути. Но самым значимым результатом минимизации временной задержки будет являться ускоренная разблокировка колеса, находящегося в юзе, что позволит автомобилю избежать недостаточной управляемости при маневре. Чем скорее будет снято тормозное усилие, тем скорее колесо наберет необходимую скорость, достаточную для лучшего сцепление с поверхностью дороги.

Исходя из вышесказанного, можно поставить задачу разработки такой тормозной системы автомобиля, которая способна сократить время

снятия тормозного усилия с колес автомобиля. Также следует отметить, что использование такой тормозной системы целесообразно только совместно с антиблокировочной системой или системой курсовой устойчивости.

В качестве решения проблемы уменьшения временной задержки предлагается интегрировать пакетные пьезоактуаторы в гидравлическую систему. Эти устройства могут превосходить гидравлику по быстродействию в тысячу раз, развивая такое же усилие. Но величины их перемещения недостаточно для того, чтобы они могли полностью заменить гидравлическую систему. Поэтому разрабатываемая система будет гибридной.

Для примера возьмем продукцию, представленную компанией «Physik Instrumente», в которой «пакетные пьезоактуаторы представлены большим количеством стандартных типоразмеров и могут быть дополнительно доработаны в соответствии с требованиями заказчика» [2].

Чтобы подобрать пьезоактуатор, подходящий по своим характеристикам для интеграции в гидравлическую систему автомобиля, необходимо произвести расчет силы, с которой тормозная колодка воздействует на тормозной диск, и величины, на которую должен изменять свой размер пьезоактуатор.

Для примера можно рассчитать нормальную силу (1), развиваемую одним поршнем гидравлической тормозной системы и действующую на одну фрикционную накладку для автомобиля «Волга» [3].

$$N = \frac{G_a(b + \phi h_g)\phi r_k}{4\mu r_c L}. \qquad (1)$$

Здесь: N – нормальная сила, развиваемая одним поршнем и действующая на одну накладку, Н; ϕ – коэффициент сцепления шин колес с дорогой; r_k – радиус колес, м; b – расстояние от центра тяжести до задней оси, м; h_g – высота центра тяжести, м; G_a – сила тяжести автомобиля при полной нагрузке, Н; L – расстояние между осями передних и задних колес, м; μ – коэффициент трения между тормозным диском и фрикционной накладкой; r_c – средний радиус фрикционной накладки, м.

$$N = \frac{2200 \cdot (1{,}31 + 0{,}7 \cdot 0{,}6) \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}335}{4 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}115 \cdot 2{,}7} = 17965 \text{ Н}.$$

Что касается изменения размера пьезоактуатора, то здесь будем отталкиваться от величины биения тормозного диска. «Допустимое биение поверхности трения диска 0,15 мм» [4]. Выберем пьезоактуатор, изменение размера которого будет как можно ближе к величине допустимого биения. Это даст в момент начала разблокировки колеса пропорциональное уменьшение силы воздействия на тормозной диск. Дело в том, что чем большее перемещение дает пакетный пьезоактуатор, тем больше его длина, которая ограничена типоразмерами разрабатываемого тормозного механизма в гибридной системе. Проведя анализ параметров пакетных пьезоактуаторов компании «Physik Instrumente», можно сказать, что оптимальным вариантом будет использовать устройства с длиной 30 или 60 мм, которые смогут дать уменьшение силы воздействия на 30 или 60% соответственно. Так же можно рассматривать 2 варианта конструкции пьезоэлементной составляющей гибридной системы. Первый вариант: пьезоактуатор изготавливается по форме и размеру тормозной колодки и представляет собой один цельный пакетный пьезоэлемент (рис. 1, а); второй вариант: пьезоактуатор состоит из n пакетных пьезоэлементов (рис. 1, б). Подберем для каждого из вариантов наиболее предпочтительные пьезоактуаторы, характеристики которых представлены в табл. 1. Для первого варианта возьмем устройства самого большого диаметра: P-056.20; P-056.40, которые являются близкими по характеристикам к предполагаемым. А для второго варианта пьезоактуатора лучше всего подойдут устройства маленького диаметра: P-010.20; P-010.40, из которых можно будет набрать матрицу, где работу вышедших из строя элементов могут выполнять соседние пьезоэлементы. Какой из вариантов

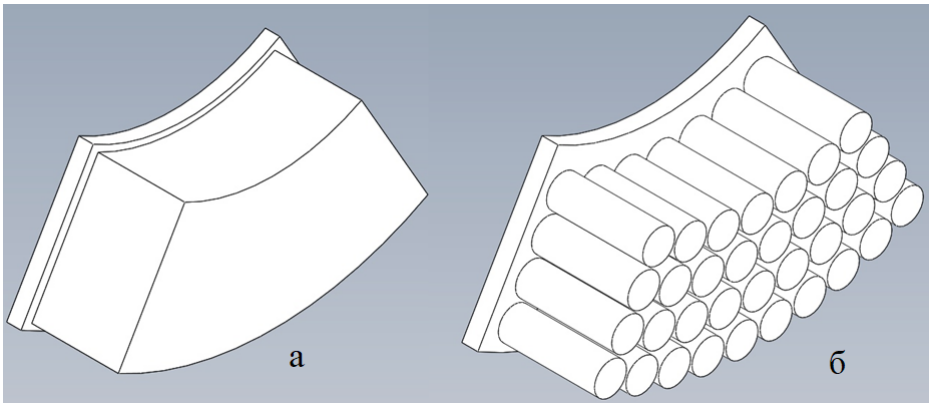


Рис. 1. Варианты конструкций пьезоактуатора

Таблица 1

Параметры пакетных пьезоактуаторов

Модель	Изменение размеров, мкм	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Блокирующая сила $F_б$, Н
P-056.20	30	56	33	60000
P-056.40	60	56	58	66000
P-010.20	30	10	30	2100
P-010.40	60	10	56	2200

предпочтительнее, можно будет судить лишь проведя экспериментальные испытания.

Рассчитаем, какое суммарное усилие F_Σ сможет развивать второй вариант конструкции пьезоактуатора по очевидной формуле (2):

$$F_\Sigma = \frac{S_1 F_б}{S_2}. \quad (2)$$

Площадь фрикционной накладки S_1 автомобиля «Волга» равна 0,006 м^2 [3]. Площадь S_2, которую занимает пьезоактуатор P-010.20 с учетом промежутка до соседнего пьезоактуатора, равна 0,0002 м^2:

$$F_\Sigma = \frac{0{,}006 \cdot 2100}{0{,}0002} = 63000 \text{ Н}.$$

Из проведенных расчетов видно, что блокирующая сила пьезоактуаторов больше в 3 раза, чем сила, развиваемая поршнем гидравлической системы. Это значит, что выбранные нами пьезоактуаторы подходят для рассматриваемой системы.

Выводы:

1. Предложена и обоснована концепция использования пъезоактуаторов для увеличения быстродействия колесной тормозной системы автомобиля.

2. Выполнены предварительные расчеты, подтверждающие работоспособность предлагаемой гибридной тормозной системы автомобиля.

Библиографический список

1. *Петров А. П., Хоменко С. Е.* Антиблокировочная и противобуксовочная системы тормозов. Курган: ФГБОУ ВПО КГУ, 2003. 130 с.

2. Каталог пьезоактуаторов «Physik Instrumente». URL: http://www.eurotek-general.ru/products/systems_pi/piezoactuators/p-007-p-056/#ad-image-2 (дата обращения: 09.11.2018).

3. *Русинов А. В.* Методические указания по выполнению практических занятий по расчету дисковых и барабанно-колодочных тормозов. Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2016. 30 с.

4. *Осипов Г. В., Бородин А. Л.* Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техническая эксплуатация ходовой части и систем, обеспечивающих безопасность движения». Курган: ФГБОУ ВПО КГУ, 2016. 20 с.

УДК 519.28

В. С. Акопов*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
В. А. Пакканен*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА ЗАПУСКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕЕ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается система запуска авиационного газотурбинного двигателя с помощью стартера-генератора. Приводится математическая модель такой системы. Предложена имитационная модель системы запуска. Выполнены исследования динамических характеристик системы запуска с двухступенчатым законом управления и выбранными элементами системы запуска.

Ключевые слова: *запуск, газотурбинный двигатель, стартер-генератор, математическая модель, имитационная модель.*

V. S. Akopov*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
V. A. Pakkanen*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

GAS TURBINE ENGINE START SYSTEM SIMULATION

The system launch aircraft gas turbine engine using the Starter-generator. Provides a mathematical model of such a system. Proposed launch system simulation model. Studies of dynamic characteristics of launch system with two-stage Control Act and selected elements of the system startup.

Keywords: *launch, turbine engine, starter generator, mathematical model, a simulation model.*

Для возможности использования любого авиационного двигателя по прямому назначению необходимо вывести его на минимальный режим устойчивой работы, называемый режимом малого газа. Таким образом, для осуществления запуска двигателя необходимы агрегат предварительной раскрутки и источник энергии для его питания, пусковые топливные магистрали, агрегаты зажигания и управления. Комплекс этих агрегатов и устройств называется системой запуска.

В настоящее время в электрических системах запуска газотурбинных авиадвигателей [1, 2] часто применяются стартеры-генераторы, которые являются дальнейшим развитием электростартеров и при запуске выполняют функцию стартера, а после запуска – генератора.

Этапы запуска авиадвигателя представлены на приведенном ниже рис. 2 [2–3]. На нем показана последовательность изменения совокупности моментов, действующих на вал авиадвигателя, механически связанного со стартером.

На этом рисунке обозначено:

$M_с$ – момент сопротивления, включающий в себя момент компрессора $M_К$ и момент трения $M_{ТР}$;

$M_К$ – момент сопротивления компрессора авиадвигателя изменяется в функции от скорости по квадратичному закону;

$M_т$ – момент турбины авиадвигателя;

$M_{ст}$ – момент, развиваемый стартером, зависимость $M_{ст}$ от скорости вращения представляет собой механическую характеристику электродвигателя, который входит в состав электростартера.

Значения частот вращения ротора авиадвигателя n_1, n_2, $n_к$ и $n_{мг}$ зависят от характеристик компрессора, турбины, стартера, работы каме-

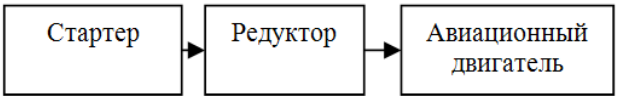


Рис. 1. Структурная схема электрической системы запуска

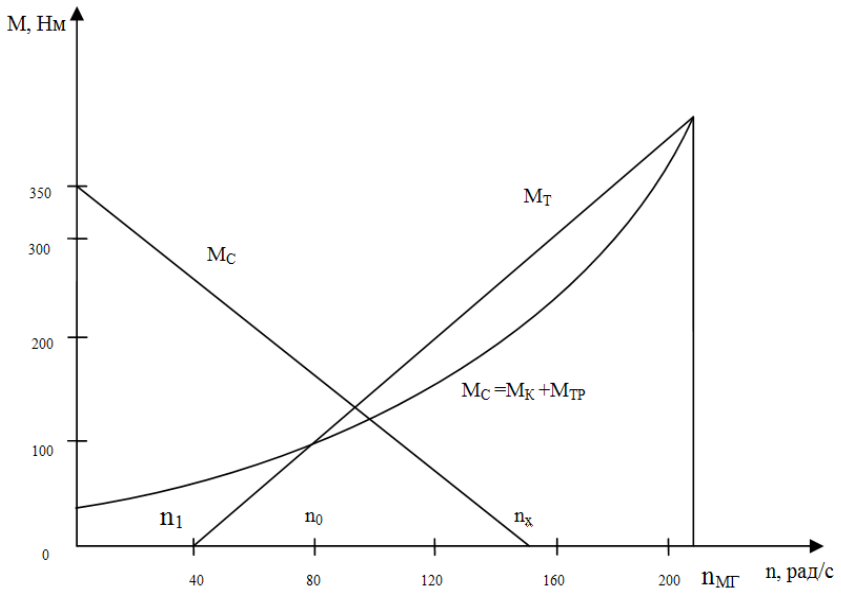


Рис. 2. Диаграмма трехэтапного запуска авиадвигателя на земле

ры сгорания, конструктивных и эксплуатационных факторов.

Для построения имитационной модели процесса запуска авиационного турбореактивного двигателя (ТРД) необходимо иметь соответствующую математическую модель исследуемого объекта или процесса.

На первом этапе запуска – с момента подключения стартера к ротору двигателя до момента воспламенения топливно-воздушной смеси (ТВС) раскрутка ротора двигателя до скорости n_1 ведется только стартером. В течение первого периода запуска расход и давление воздуха за компрессором высокого давления (КВД) увеличивается по мере увеличения его числа оборотов. Уравнение динамики вала авиадвигателя на этом этапе запуска описывается выражением

$$J_{\text{ПР}}\frac{d\omega}{dt} = M_{\text{СТ}}K_{\text{Р}} - M_{\text{С}} = \\ = M_{\text{СТ}}K_P - (K_K\omega^2 + M_{\text{ТР}}), \qquad (1)$$

где $J_{\text{ПР}}$ – суммарный приведенный момент инерции ротора авиадвигателя; $K_{\text{Р}}$ – передаточное отношение редуктора; $K_{\text{К}}$ – коэффициент пропорциональности статической характеристики компрессора.

Электростартер является основным движителем в этой системе. Если в качестве стартера используется двигатель постоянного тока независимого возбуждения, то его динамика без учета контура обмотки возбуждения, как известно [3, 4], описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$L_{\text{Я}}\frac{di_{\text{Я}}}{dt} = U_{\text{У}} - C\Phi\omega_{\text{СТ}} - R_{\text{Я}}I_{\text{Я}}; \qquad (2)$$

$$J_{\text{ПР}}\frac{d\omega_{\text{СТ}}}{dt} = M_{\text{СТ}}K_{\text{Р}} - M_{\text{С}} = C\Phi i_{\text{Я}} - M_{\text{С}}. \qquad (3)$$

В выражениях (2) и (3) использованы следующие новые обозначения:

$L_{\text{Я}}$, $i_{\text{Я}}$ и $R_{\text{Я}}$ – индуктивность, ток и сопротивление цепи якоря электродвигателя стартера соответственно;

$U_{\text{У}}$ – электрический сигнал управления, подаваемый на стартер;

$C\Phi$ – конструктивная постоянная электродвигателя стартера;

$J_{\text{ПР}}$ – приведенный момент инерции стартера;

$\omega_{\text{СТ}}$ – угловая скорость стартера;

t – время.

На втором этапе запуска – с момента воспламенения топливно-воздушной смеси в камере сгорания при частоте вращения ротора авиадвигателя n_1 (рис. 2) до момента отключения стартера от ротора двигателя при скорости его вращения $n_{\text{к}}$ раскрутка ведется одновременно стартером и турбиной. Пусковое устройство отключается от двигателя автоматически в момент выхода на определенную частоту вращения ротора, при которой турбина имеет необходимый избыток мощности для раскрутки ротора. Динамика вала авиадвигателя (АД) на втором этапе запуска описывается дифференциальным уравнением:

$$J_{\text{ПР}}\frac{d\omega}{dt} = M_{\text{СТ}}K_{\text{Р}} + M_{\text{Т}} - M_{\text{С}} = \\ = M_{\text{СТ}} + M_{\text{Т}}(\omega) - (K_{\text{К}}\omega^2 + M_{\text{ТР}}), \qquad (4)$$

где $J_{\text{ПР}}$ – момент инерции редуктора.

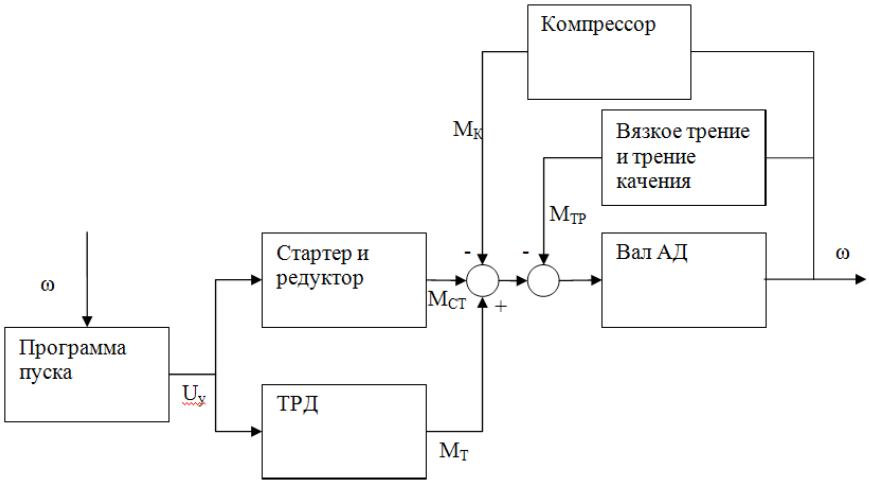


Рис. 3. Структурная схема запуска АД

На третьем этапе запуска – с момента отключения стартера динамика вала авиадвигателя определяется выражением, которое отличается от (4) только отсутствием момента стартера M_c в правой его части.

С учетом изложенного ранее, предлагаемая структурная схема имитационной модели системы запуска турбореактивного двигателя (ТРД) с помощью электростартера может быть представлена в виде, приведенном на рис. 3.

На рис. 3 добавлены следующие обозначения: $U_У$ – сигнал управления на выходе блока, формирующего программу пуска; $M_{ТР}$ – момент трения; ω – угловая скорость авиационного двигателя.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений (1–4) в общем виде практически невозможно из-за наличия в нем нелинейностей: квадратичной зависимости момента компрессора от угловой скорости вращения его вала, а также в большинстве случаев нелинейного характера зависимости $M_Т(ω)$, имеющей частный вид для каждого конкретного типа ТРД. В то время как использование имитационного моделирования, как известно [4, 5], позволяет достаточно просто решать подобные математические задачи. Составленная с учетом приведенного анализа процесса запуска ТРД имитационная модель для исследования процесса электромеханического запуска турбореактивного авиационного двигателя с помощью электростартера модели СТГ-12ТМО-1000 [6, 7] представлена на рис. 4.

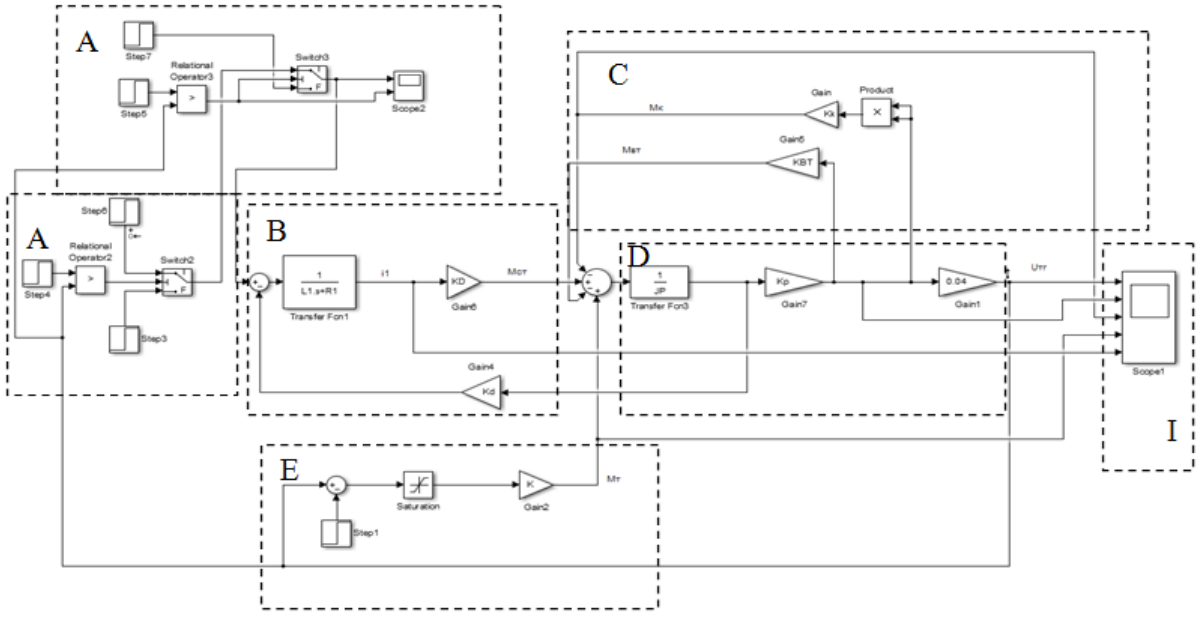


Рис. 4. Обобщенная имитационная модель для исследования системы запуска ТРД на земле

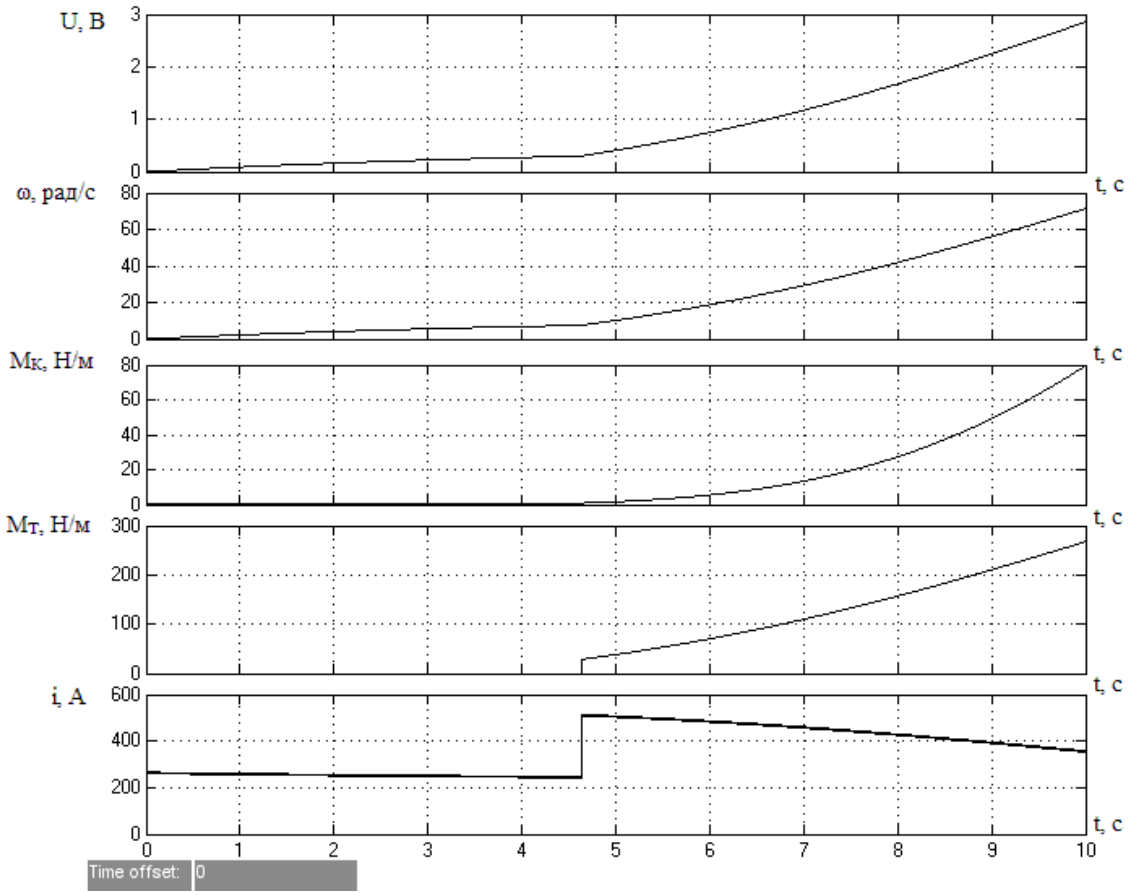


Рис. 5. Переходные процессы в имитационной модели запуска ТРД с переключением питания стартера с 24 В на 48 В

На рис. 4 блоки A моделируют закон управления процессом запуска авиадвигателя.

Закон управления системой запуска выбран ступенчатым, с переключением источников энергии в виде двух аккумуляторов с напряжением питания 24 В с параллельного их соединения на последовательное. В итоге в начале процесса раскрутки, когда аккумуляторы соединены параллельно, стартер питается пониженным напряжением 24 В, пусковой ток в нем таким образом ограничивается. Во второй половине процесса разгона авиадвигателя аккумуляторы включаются последовательно, напряжение питания стартера соответственно возрастает до 48 В, ток тоже возрастает до нового большего установившегося значения.

На этом рисунке обозначено: блок B – модель стартера, строится с учетом выражения (2); блок C моделирует момент компрессора и момент трения; блок D – вал турбины; блок E генерирует момент турбины авиадвигателя; блок I – блок измерений.

Осциллограф на рис. 4 имеет 5 входов и 5 экранов, на которых развернуты следующие фазовые переменные имитационной модели (см. рис. 5):

1) U_B – выходное напряжение тахогенератора, измеряющего угловую скорость вращения авиадвигателя;

2) ω – скорость вращения вала авиадвигателя;

3) M_K – момент компрессора;

4) M_T – момент ТРД;

5) I – ток якоря стартера.

По графикам, приведенным на рис. 5, видно, что при пуске ТРД с переключением напряжений питания стартера достигается необходимая скорость вращения вала. На этом скорость вращения вала авиационного двигателя ω достигает нужного значения (скорости малого газа) запуск авиационного двигателя тем самым завершается.

Выводы

1. Рассмотрена система управления запуском газотурбинного двигателя.

2. Предложена математическая модель процесса запуска авиационного турбореактивного двигателя.

3. Разработана имитационная модель процесса запуска ТРД с помощью электростартера.

4. Выполнено исследование процесса запуска авиадвигателя с использованием разработанной имитационной модели.

5. Предлагаемая имитационная модель может быть использована для исследования процесса запуска не только турбореактивных, но и турбовинтовых авиадвигателей.

Библиографический список

1. *Скубачевский Г. С.* Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1981. 550 с.

2. *Таммекиви И. В.* Системы запуска авиационных двигателей: Метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2002. 34 с.

3. *Кац Б. М., Жаров Э. С., Винокуров В. К.* Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 220 с.

4. *Акопов В. С., Бураков М. В., Полякова Т. Г.* Проектирование авиационного следящего привода малой мощности: учеб. пособие СПб.: ГУАП, 2006. 171 с.

5. *В. С. Акопов, Е. В. Евсеев, А. А. Мартынов.* Электропривод с МПСУ: учеб. пособие / Под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2016. 123 с.

6. СТГ-12ТМО-1000 Стартер-генератор. URL: http://specavtopribor.ru (дата обращения: 08.02.2019).

УДК 621.3.072

В. С. Акопов*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Т. Г. Полякова*
кандидат технических наук, доцент
С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКАЯ МАЛОМОЩНАЯ СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА

Приведено краткое описание учебно-исследовательского комплекса «Потенциометрическая маломощная следящая система», предназначенного для реализации практико-ориентированной подготовки студентов и их компетентного подхода. Комплекс создан на современной элементной базе, построен по блочно-модульному принципу и содержит элементы, имеющие как традиционное, так и оригинальное исполнение.

Ключевые слова: *учебный комплекс, исследовательский стенд, система автоматического управления, профессиональные компетенции.*

V. S. Akopov*
PhD Sc., Tech., Senior Researcher
T. G. Polyakova*
PhD Sc., Tech., Associate Professor
S. S. Timofeyev*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

POTENTIOMETRIC LOW POWER SERVOSYSTEM

The article describes the educational and research complex "Potentiometric low power servosystem", designed to implement practical-oriented training of students and their competent approach. The complex is created on a modern element base, built on a block-modular principle and contains elements that have both traditional and original design.

Keywords: *educational complex, the research stand, automatic control system, professional competence.*

Основанием для создания учебно-исследовательского комплекса «Потенциометрическая маломощная следящая система» являются требования федерального государственного образовательного стандарта по группе направлений подготовки и специальностей: автоматика и управление [1]. В этом образовательном стандарте отмечается, что область профессиональной деятельности применительно к направлению «Управление в технических системах» включает, в частности, проектирование, исследование, производство систем и средств управления в промышленной и оборонной отраслях; создание современных программных и аппаратных средств исследования и проектирования, контроля, технического диагностирования и промышленных испытаний систем автоматического и автоматизированного управления.

Для качественной практико-ориентированной подготовки выпускаемых специалистов в области управления в технических системах необходима современная учебно-лабораторная база, позволяющая не только решать узкие конкретные задачи анализа, но и формировать данные для многоэтапного проектирования, развивая творческий потенциал студентов в процессе обучения.

Промышленностью выпускается учебная техника, предназначенная для исследования различных систем управления [2–4]. Кроме высокой стоимости они обладают рядом специ-

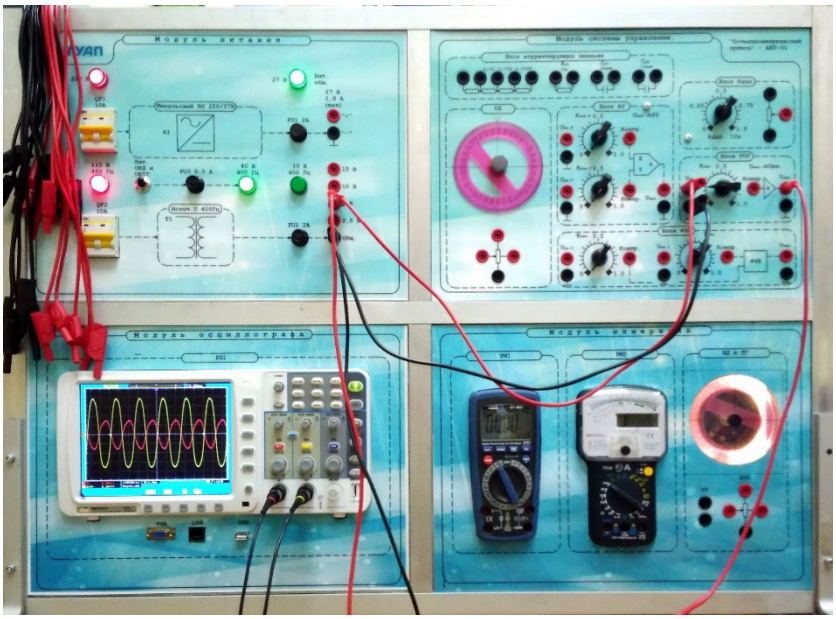


Рис. 1. Общий вид учебно-исследовательского стенда

фических особенностей, связанных с используемым объектом исследований и предлагаемой методикой проведения исследований.

Разработанный учебно-исследовательский комплекс (рис. 1) выполнен на современной элементной базе и предназначен для реализации, практико-ориентированной подготовки специалистов в области «Управления в технических системах». Данный комплекс может быть использован не только для анализа качества управления в следящих САР, но и для изучения характеристик блоков и элементов, составляющих привод.

Стенд обеспечивает выполнение следующего комплекса исследований:

– анализ динамики исходной непрерывной следящей системы;

– анализ точности исходной системы;

– идентификацию элементов системы управления, обладающих переменными (задаваемыми) параметрами;

– синтез закона управления для непрерывной следящей системы;

– исследование скорректированной непрерывной следящей системы с новым управляющим устройством;

– измерение, автоматическую обработку и регистрацию информации в процессе выполнения исследований.

Функциональная схема рассматриваемой системы представлена на рис. 2.

Следящая система предназначена для дистанционной передачи угла поворота входного задающего устройства на нагрузку Н.

Потенциометры датчик ПД и приемник ПОС включаются в одну сеть питания постоянного или переменного тока и образуют схему измерителя рассогласования.

Если подвижные контакты обоих потенциометров занимают одинаковые положения, то они находятся на точках одинакового потенциала и напряжение между ними равно нулю.

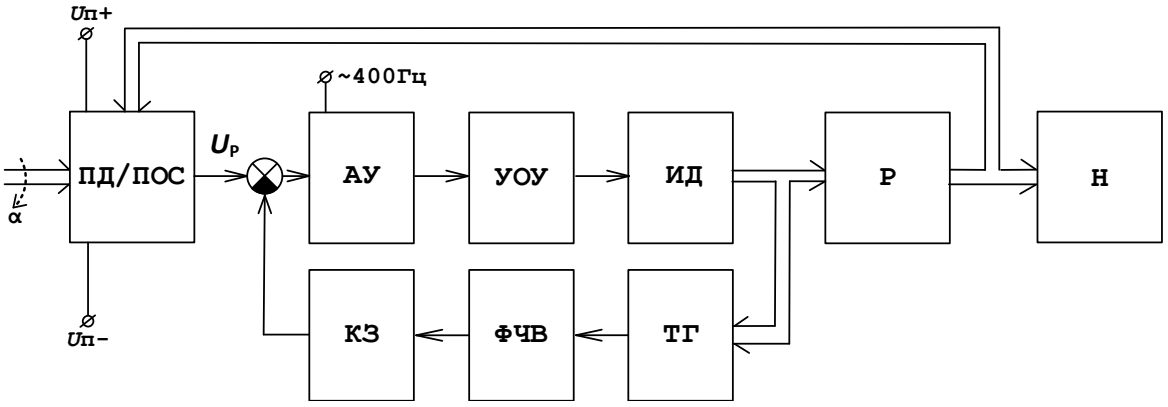


Рис. 2. Функциональная схема стенда

При повороте входного вала на угол α на выходе измерителя рассогласования появляется напряжение $U_р$, пропорциональное рассогласованию между подвижными контактами потенциометров, полярность этого напряжения (или его фаза при питании измерителя рассогласования переменным током) определится направлением угла рассогласования.

Напряжение $U_р$ подается на один из входов аналогового умножителя АУ, на второй его вход подается переменное синусоидальное напряжение частотой 400 Гц. Блок АУ производит математическое перемножение сигналов в четырех квадрантах, обеспечивая на выходе переменное синусоидальное напряжение частотой 400 Гц с амплитудой пропорциональной величине Uр и фазой 0° либо 180° в зависимости от полярности напряжения $U_р$.

Далее сигнал с выхода АУ поступает на вход усилителя обмотки управления УОУ, с помощью которого усиливается по напряжению и мощности. УОУ имеет в составе ограничитель входного напряжения, предназначенный для предотвращения выхода работы усилителя на аварийные режимы.

УОУ через согласующий трансформатор нагружен обмоткой управления исполнительного двигателя ИД, приводящего в движение подвижную систему, состоящую из тахогенератора ТГ, редуктора Р, потенциометра обратной связи ПОС и нагрузки Н. Напряжение на обмотку возбуждения ИД и ТГ можно подавать отдельно, приводя, таким образом, систему в движение.

Нагрузка Н представляет собой круговую шкалу, жестко закрепленную на валу редуктора Р и предназначенную для отображения угла поворота подвижной системы.

Исполнительный двигатель через редуктор Р поворачивает нагрузку Н, вал обратной связи и движок ПОС до тех пор, пока движки ПД и ПОС не займут согласованное положение, в котором напряжение рассогласования $U_р = 0$. Таким образом, описанная схема осуществляет непрерывное слежение вала обратной связи и нагрузки за положением вала задающего устройства учебного стенда.

С целью обеспечения возможности стабилизации системы и придания ей заданных динамических качеств предусмотрено введение местных обратных связей. Для этого вал двигателя жестко соединен с валом тахогенератора ТГ, сигнал с которого, в свою очередь, может быть использован для создания корректирующей цепи.

Переменное напряжение с выхода ТГ, пропорциональное скорости его вращения, подается на первый вход фазочувствительного выпрямителя ФЧВ [5]. На второй вход ФЧВ подается опорное переменное напряжение частотой 400 Гц. Сигнал, полученный с выхода ФЧВ, имеет постоянную составляющую, пропорциональную по величине амплитуде напряжения, полученного с ТГ, и имеющую знак, зависимый от направления вращения ТГ.

Сигнал, полученный с ФЧВ, подается на собранное на наборном поле корректирующее *RC*-звено КЗ. Расчет КЗ входит в программу комплекса исследований и позволяет получить нужные динамические свойства скорректированной следящей системы.

Переменный коэффициент усиления блока аналогового усилителя является элементом, с помощью которого реализуется последовательная коррекция в рассматриваемой замкнутой системе.

Элементы учебно-исследовательского комплекса имеют как традиционное, так и оригинальное исполнение.

Учебно-исследовательский комплекс содержит современную регистрирующую и измерительную аппаратуру. Модуль осциллографа объединяет в себе цифровой осциллограф АКИП-4122/1V и гнезда расширения «VGA», «LAN» и «USB host». Блок позволяет производить все виды измерений в рамках лабораторных работ, подключить дополнительный монитор для демонстрации к гнезду «VGA» осциллографа, соединить осциллограф с компьютером для регистрации сигналов с помощью программного обеспечения «DS Wave Oscilloscope», подключить флеш-накопитель для сохранения в цифровом виде результатов измерений и их последующей обработки, в частности, при выполнении процедуры идентификации устройств стенда.

Измерительная техника включает в себя высокоточную технику: мультиметр и LCR-метр модели DT-9931, необходимые для измерения активных, индуктивных и емкостных свойств изучаемых устройств; блок стрелочного мультиметра (мультиметр – измеритель MASTECH 7030) может быть использован при наблюдении медленно меняющихся процессов.

Комплекс построен по блочно-модульному принципу, что дает возможность снимать все статические и динамические характеристики элементов и устройств, входящих в систему автоматического управления. Обработка экспериментальных данных позволяет проводить верификацию математических моделей, разрабатываемых для решения задачи синтеза регулятора [6].

В ходе выполнения технического задания на проектирование студенты не только осуществляют расчет регулятора системы управления [7, 8], они выполняют имитационное моделирование скорректированной системы [9], разрабатывают его электрическую принципиальную схему и в случае необходимости печатную плату с использованием активных элементов [10],

проводят монтаж регулятора и испытывают его в составе учебно-исследовательского комплекса.

К основным техническим особенностям учебного стенда можно отнести следующие:

– несколько устройств учебного лабораторного стенда содержат переменные (изначально настраиваемые) параметры, что значительно увеличивает число вариантов исходных состояний лабораторного стенда;

– стенд содержит классические элементы системы автоматического управления, построенные на современной электронной базе;

– исследования на стенде позволяют студентам получить навыки, необходимые для выполнения полного цикла анализа и синтеза системы автоматического управления, включая моделирование, идентификацию, синтез закона управления, макетирование регулятора, испытание созданной системы.

В отличие от стандартного учебно-лабораторного оборудования, предлагаемого на рынке, данный учебно-исследовательский комплекс дает возможность в полном объеме реализовывать компетенции, установленные ФГОС, такие как способность:

– демонстрировать навыки работы в коллективе;

– выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением информационных технологий и технических средств;

– участвовать в монтаже, наладке, настройке, проверке и сдаче опытных образцов программно-аппаратных средств и комплексов автоматизации и управления и т. д.;

а также готовность к участию в работах по изготовлению, отладке и сдаче в эксплуатацию систем и средств управления; в разработке и изготовлении стендов для комплексной отладки и испытаниях программно-аппаратных управляющих комплексов.

Библиографический список

1. Государственный образовательный стандарт Высшего профессионального образования / М-во образования РФ. М., 2000.

2 Учтех-Профи: учебное оборудование и техника. URL: http://labstand.ru (дата обращения: 11.02.2019).

3. Лабораторные стенды и учебные тренажеры. URL: http//www.techlabindastru.ru (дата обращения: 11.02.2019).

4. Компания «Новый стиль» – комплексное обслуживание. URL: http//www.newstyle-v.ru (дата обращения: 11.02.2019).

5. Фазочувствительный выпрямитель. URL: http://textarchive.ru/c-2056314.html (дата обращения: 11.02.2019).

6. *Сазонов Г. Г.* Идентификация и диагностика систем: учеб. пособие для студентов. М.: МГОУ, 2005. 38 с.

7. *Акопов В. С., Бураков М. В., Полякова Т. Г.* Проектирование авиационного следящего электропривода малой мощности: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2007. 172 с.

8. *Полякова Т. Г., Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В.* Проектирование электромеханических систем автоматического управления малой мощности: учеб. пособие / Под ред. В. Ф. Шишлакова / М-во образования и науки РФ; СПб.: ГУАП, 2013. 197 с.

9. *Акопов В. С.* Моделирование систем в MATLAB: лабораторный практикум. СПб., 2012. 64 с.

10. *Акопов В. С., Евсеев Е. В., Мартынов А. А.* Электропривод с микропроцессорными системами управления: учеб. пособие / Под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2016. 123 с.

УДК 539.51-629.7

В. С. Акопов*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ НА ПРОЦЕССЫ В ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

В работе рассматривается влияние схемы расположения на водопроводной трубе греющего кабеля на процесс нагревания воды внутри трубы.

Ключевые слова: *теплообмен, греющий кабель, моделирование, метод конечных элементов.*

V. S. Akopov*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
I. A. Salova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFLUENCE OF THE HEATING CABLE LOCATION ON THE PROCESSES IN THE ANTI-ICING SYSTEM

The paper discusses the effect of the anti-icing cable location on the process of heating water.

Keywords: *heat exchange, self-regulating heating cable, simulation, finite element method.*

Известно, что обледенение элементов трубопроводных систем может привести к выходу их из строя, а следовательно, к возникновению аварийных ситуаций как на производстве, так и в быту. Противообледенительная защита трубопроводных систем и прежде всего для северных районов является, безусловно, актуальной задачей.

Для борьбы с обледенением могут использоваться различные противообледенительные системы: механические, тепловые, химические, радиационные, электрические [1, 2]. Одним из наиболее эффективных, простых и дешевых способов борьбы с обледенением являются противообледенительные системы (ПОС) на основе греющих и в особенности саморегулирующихся кабелей [3, 4]. Такие кабели находят большое применение в промышленности: при обогреве водопроводов, трубопроводов и резервуаров различного назначения.

В данной работе выполняется исследование влияния расположения обогревающего кабеля на поверхности водопроводной трубы на процесс изменения температуры воды в нескольких информационных точках сечения трубы.

Исследование проводилось с применением пакета программ ELCUT, основанного на методе конечных элементов [5]. В данном пакете имеется возможность при моделировании нестационарных тепловых задач задавать плотность объемных тепловыделений в зависимости от температуры. Это важно, так как в саморегулирующемся греющем кабеле выделение тепла изменяется от температуры окружающей среды. Однако в пакете отсутствует возможность учета перемещения вещества (воды) как по длине трубопровода, так и по его сечению.

Рассмотрим следующие схемы расположения саморегулирующегося провода на водопроводной трубе (рис. 1):

– один провод (рис.1, а);

– два провода, расположенные симметрично (рис.1, б);

– два провода, расположенные под углом 90° (рис. 1, в).

Для каждого из перечисленных вариантов рассмотрены два типа расположения греющего кабеля: параллельно трубе и по спирали вокруг трубы. Моделирование варианта расположения провода по спирали сводится к последовательному моделированию процессов в ряде перпендикулярных сечений трубы в пределах одного шага намотки. Каждое новое рассматриваемое сечение получается поворотом последнего сече-

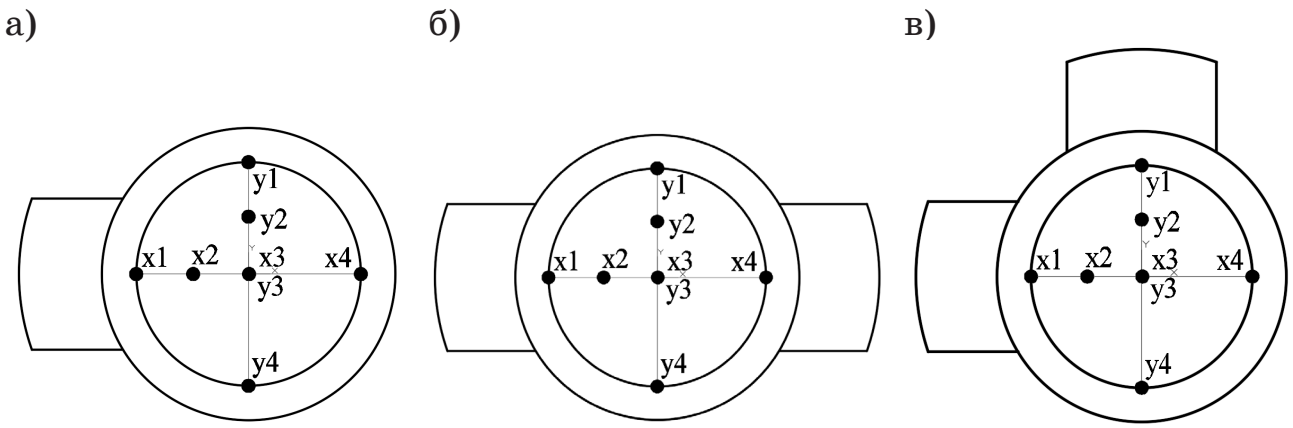


Рис. 1. Варианты расположения саморегулирующегося кабеля на водопроводной трубе

ния на 15 угловых градусов по часовой стрелке. Диапазон изменения угла поворота соответствует диапазону 0–360 град. Пример поворота сечений на 45 угловых градусов при рассмотрении спиральной намотки приведен на рис. 2 для трех схем расположения проводов. В качестве саморегулирующегося кабеля рассмотрен кабель типа GWS10-2CR [4], имеющий ширину 11 мм.

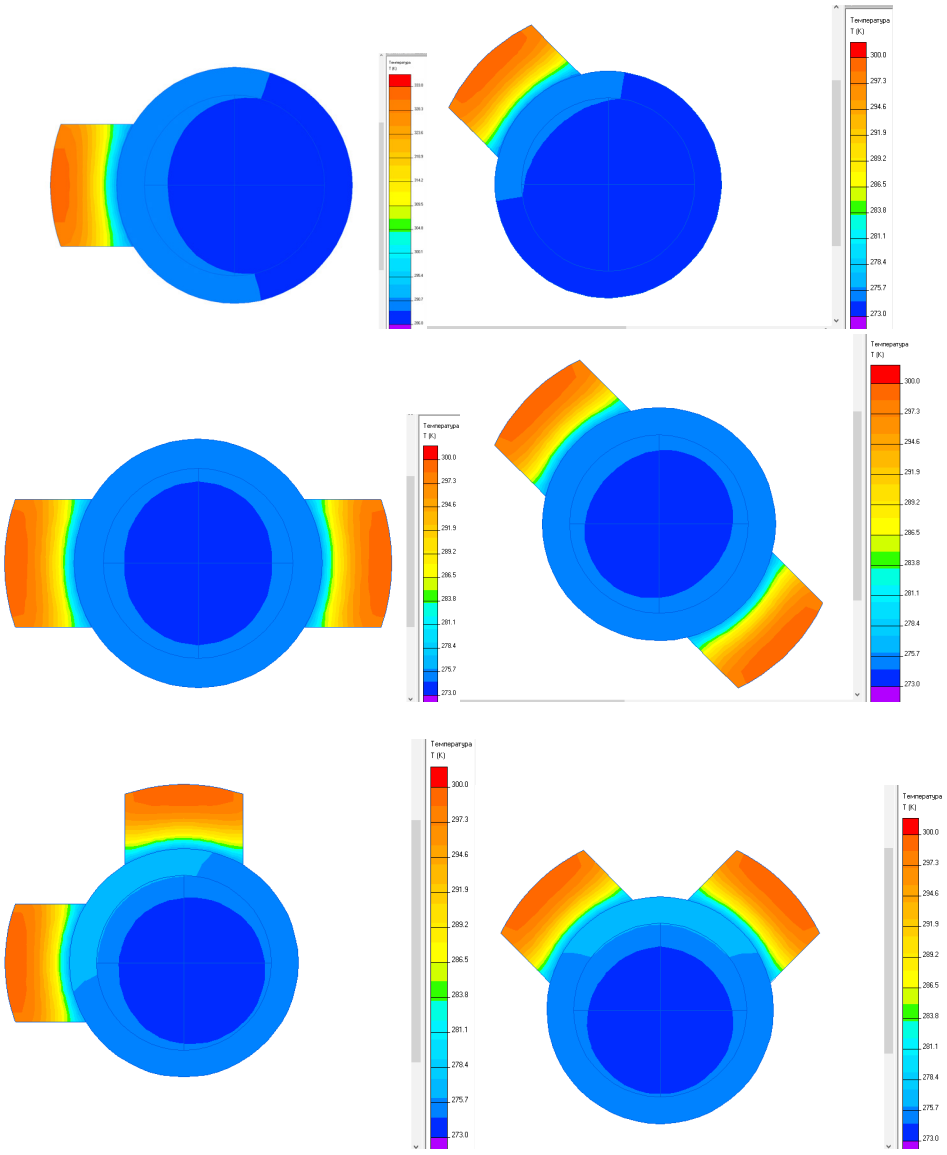


Рис. 2. Распределение температуры при различных вариантах расположения проводов

Геометрия, свойства материалов кабеля, трубы, воды (льда) приведены в [6, 7]. При моделировании все материалы приняты изотропными.

В точках x1x4 и y1y4 (рис. 1) на горизонтальном и вертикальном контурах соответственно измеряется значение температуры. На рис. 3 и 4 показано изменение температуры вдоль горизонтального и вертикального контура для двух типов крепления после 60 с нагрева для одного кабеля.

Кривые X1CX4C представляют собой графики изменения температуры в соответствующих точках на шаге спиральной намотки кабеля. Прямые X1ПX4П показывают постоянные значения температуры в точках x1x4 при параллельном расположении кабеля. С точки зрения прогреваемости центра водяного потока оба способа прокладки кабеля обладают одинаковой эффективностью. В точке x1 водяной поток лучше прогревается для схемы 1, а при параллельной прокладке и в точке x4 – при спиральной прокладке. В точках y1 и y4 в среднем лучше спиральная прокладка.

Представляет безусловный интерес вопрос об эффективности рассматриваемых противообледенительных систем: зависимости времени, необходимого для устранения обледенения (если оно уже возникло), от площади поверхности греющего кабеля, прилегающей к водопроводной трубе. Для исследования этого вопроса проводилось моделирование по следующей методике. Температура внешней среды T_0, начиная с 273 К, уменьшалась на 1 градус в сторону отрицательных температур, и анализировалась динамика температуры середины сечения водопроводной трубы в точке x3. Как только она поднималась

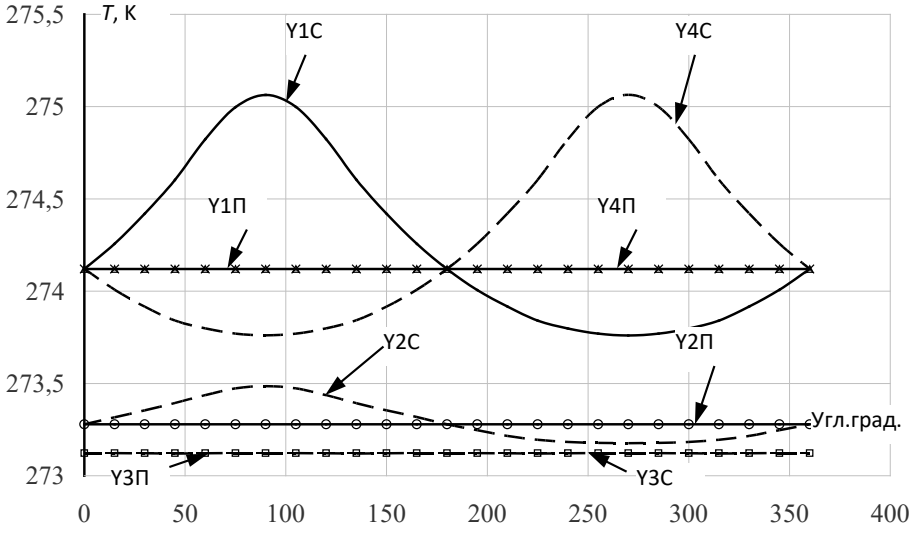


Рис. 3. Изменение температуры вдоль горизонтального контура для двух типов крепления после 60 с нагрева для варианта 1, а

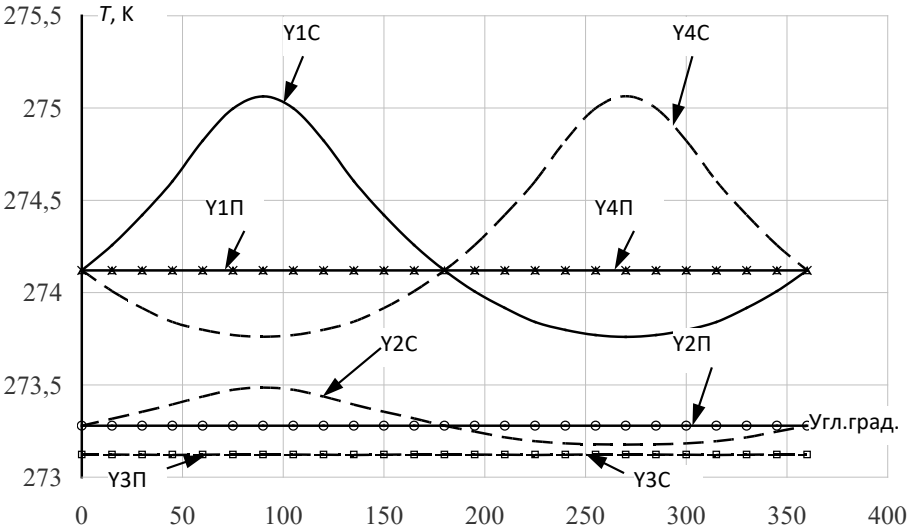


Рис. 4. Изменение температуры вдоль вертикального контура для двух типов крепления после 60 с нагрева для варианта 1, а

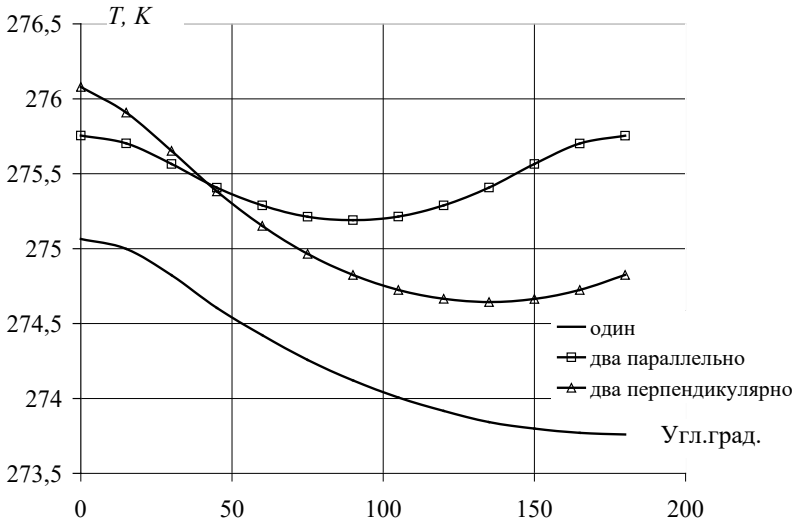


Рис. 5. Сводная таблица значений температуры в точке x1 горизонтального контура для различных вариантов расположения кабелей (намотка по спирали) после 60 с нагрева

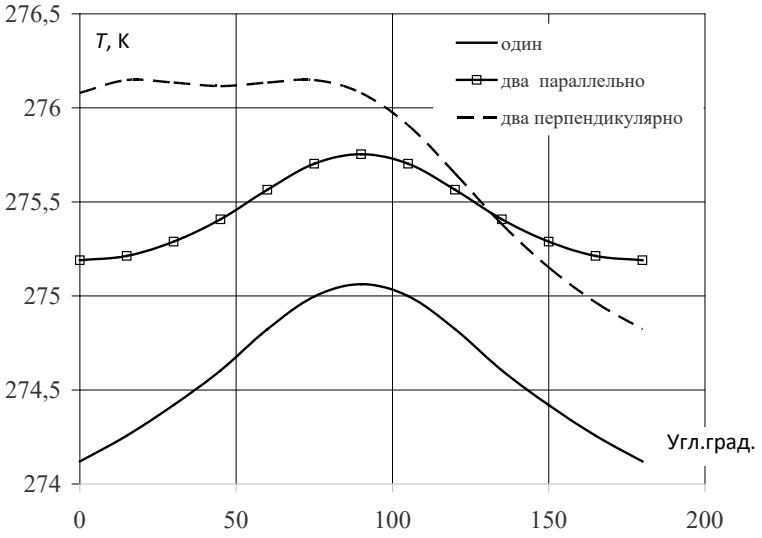


Рис. 6. Сводная таблица значений температуры в точке y 1 вертикального контура для различных вариантов расположения кабелей (намотка по спирали) после 60 с нагрева

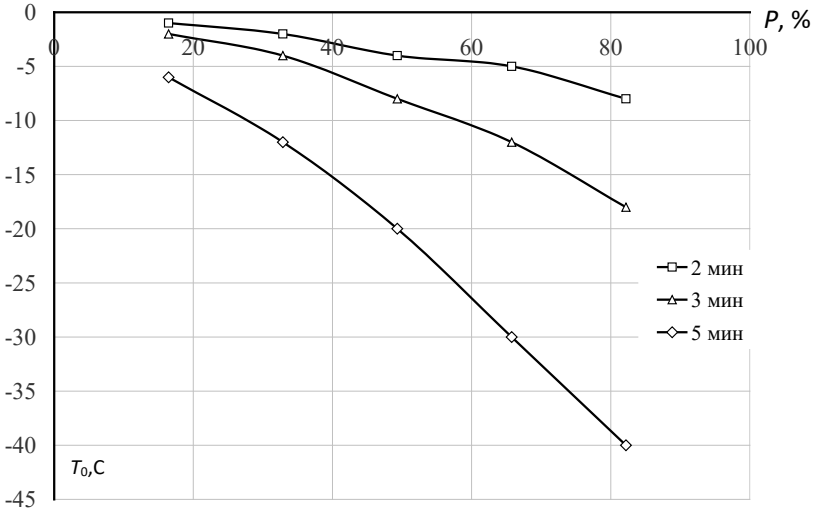


Рис. 7. Зависимость заданного времени, необходимого для устранения обледенения от температуры внешней среды T_0 и площади поверхности греющего кабеля, которая прилегает к водопроводной трубе

выше 273 К, фиксировалось время размораживания. Далее последовательно добавлялся еще один кабель, и действия повторялись. Результаты моделирования процессов размораживания при вариации температуры внешней среды и параметра относительной площади P кабелей и при одновременном анализе времени размораживания приведены на рис. 7. Здесь через P обозначено отношение суммарной площади поверхности кабелей, соприкасающихся с трубой, к площади поверхности водопроводной трубы. Например, при укладке одного кабеля (режим нагрева) по истечении 2 мин температура в центре потока воды в трубе не опустится ниже 273 К при температуре окружающей среды $T_0 = -1$ °С.

Выводы

1. Параллельный и спиральный способы прокладки греющего кабеля с точки зрения прогреваемости центра водяного потока обладают одинаковой эффективностью.

2. Показано, что из рассмотренных вариантов прокладки обогревающего кабеля более равномерное распределение температуры по сечению водопроводной трубы наблюдается при спиральной намотке двух параллельных кабелей.

3. Получены зависимости времени, необходимого для устранения обледенения, от температуры внешней среды и площади поверхности греющего кабеля, которая прилегает к водопроводной трубе.

Библиографический список

1. Системы антиобледенения. Справочник. Информационное агентство Norma, 2001. 336 с.

2. *Жуков А. Д.* Системы антиобледенения / Москва. НТС. «Стройинформ», 2007. 332 с.

3. URL: http://alfaopt.alloy.ru/product/sistema-videonablyudeniya/hlle2cf-camoreguliruyushayasya-nagrevatelnaya-lent-9818682 (дата обращения: 04.03.2019).

4. URL: http://zona-tepla.ru (дата обращения: 04.03.2019).

5. ELCUT v.6.0. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2014.

6. *Акопов В. С., Салова И. А.* Моделирование противообледенительной системы методом конечных элементов. Завалишинские чтения'16. СПб.: ГУАП, 2016. С. 16–20.

7. *Акопов В. С., Салова И. А.* Исследование теплозащиты от замерзания воды в трубопроводах наружной части водопровода. Завалишинские чтения'17. СПб.: ГУАП, 2017. С. 253–256.

УДК 621.431.75.

В. С. Акопов*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
С. И. Соловьев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОТИВОПОМПАЖНАЯ СИСТЕМА С КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗА ТУРБИНОЙ

Из многих факторов, сопровождающих помпаж турбореактивного двигателя, в работе рассматривается система анализа и устранения неоправданных скачков температуры за его турбиной. Предлагается управление через частоту вращения ротора авиадвигателя. Разработана и предложена имитационная модель устранения помпажных вибраций в газотурбинном авиадвигателе летательного аппарата.

Ключевые слова: *помпаж, авиадвигатель, система устранения помпажа, имитационная модель.*

V. S. Akopov*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
S. I. Soloviev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROTIVOPAMPAZHNAJA TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR TURBINE

Of the many factors that accompany surging turbojet engine, the paper considers the system of analysis and eliminate undue temperature spikes for his turbine. Proposed management via the frequency of rotation of the rotor aircraft engines. A simulation model was developed and offered to eliminate vibration pompazhnyh gas turbine aircraft engine aircraft.

Keywords: *surging, aviadvigatel, eliminating surge system, simulation model.*

Введение

Сильную низкочастотную вибрацию газотурбинного двигателя, возникающую, например, при срыве потока, в авиации называют явлением помпажа, это сложный и многофакторный процесс. Помимо этого, помпаж сопровождается повышением температуры и падением тяги авиадвигателя, что в итоге может привести не только к ухудшению условий полета внутри самолета, но и к повреждению авиадвигателя, пожару и даже к катастрофическим последствиям.

Структурная схема системы

Известно [1, 2], что повышение температуры за турбиной выше расчетных значений является одним из факторов, способствующих возникновению явления помпажа. В данной работе рассматривается система управления температурой за турбиной ТРД через управление частотой вращения ротора авиадвигателя.

На рис. 1 и 2 представлены структурные схемы управления частотой вращения вала по оборотам и температуре соответственно.

Вместе с тем нашей задачей является обеспечение работоспособности этой системы в условиях возникновения помпажных вибраций. В частности, будет рассмотрена система стабилизации частоты вращения ТРД через поддержание требуемой температуры внутри ТРД в условиях изменения температуры за турбиной.

Далее, совмещая эти системы, можно получить систему стабилизации частоты вращения вала, анализирующую изменение температуры в ТРД и реагирующую на эти изменения. Данная система приведена на рис. 3.

В состав системы включено сравнительное устройство, выбирающее систему, которой будет передано управление, в зависимости от температуры за турбиной ТРД в текущий момент времени. Устройство сравнивает сигнал управления по температуре с заранее заданным значением

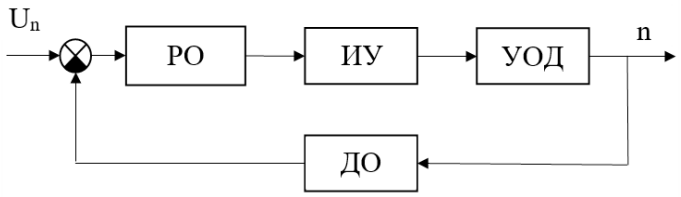


Рис. 1. Структурная схема управления частотой вращения авиадвигателя, где РО – регулятор оборотов; ИУ – исполнительное устройство; УОД – управление оборотами двигателя; ДО – датчик оборотов

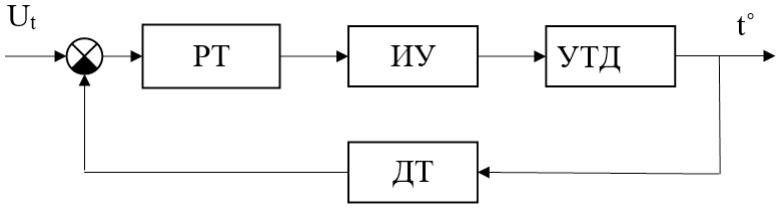


Рис. 2. Структурная схема управления по температуре, где РТ – регулятор температуры; ИУ – исполнительное устройство; УТД – управление температурой двигателя; ДТ – датчик температуры

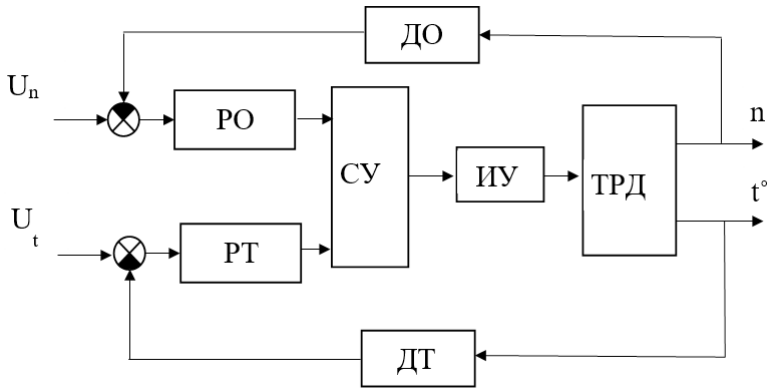


Рис. 3. Структурная схема противопомпажной системы с контролем температуры за турбиной, где РО – регулятор оборотов; ИУ – исполнительное устройство; ДО – датчик оборотов; РТ – регулятор температуры; ИУ – исполнительное устройство; ДТ – датчик температуры; СУ – сравнительное устройство

и при его превышении переключает управление с канала управления по температуре на канал управления по частоте вращения авиадвигателя для выведения двигателя на расчетный режим работы. Когда сигнал управления по температуре падает ниже заданного значения, управление возвращается каналу по оборотам.

Устранение скачка температуры в данной системе осуществляется путем коррекции задающего воздействия [3], поступающего на исполнительное устройство. Причем это возможно только при работе системы в режиме регулирования по каналу температуры. В режиме же регулирования оборотов канал температуры отключается и не мешает работе системы.

Моделирование и исследование системы в Matlab Simulink

Для моделирования исследуемой системы, необходимо сформулировать математическую модель ее основных элементов.

1. Передаточная функция двигателя по каналу частоты вращения вала низкого давления имеет вид [2]

$$W_{n_{\text{нд}}}(s)=\frac{n_{\text{нд}}(s)}{G_{\text{т}}(s)}=k_{\text{нд}}\frac{(\tau s+1)}{(T_{\text{нд}}s+1)(T_{\text{вд}}s+1)}=$$

$$=\frac{0.233s+1}{0.152s^2+0.825s+1}. \qquad (1)$$

2. Передаточная функция одновального ТРД по каналу температуры [2]

$$W_{\text{т}}(s)=\frac{n_{\text{вд}}(s)}{G_{\text{т}}(s)}=\frac{0.155s^2+0.8333s+1}{0.156s^2+0.912s+1}. \qquad (2)$$

3. Передаточная функции датчиков [4] (датчик частоты вращения ДТЭ-1, термопара Т-80-Т) $n_{\text{вд}}$, $n_{\text{нд}}$, T

$$W_{\text{двд}}(s)=1/2000,$$

$$W_{\text{днд}}(s)=1/2000,$$

$$W_{\text{дт}}(s)=0.0033$$

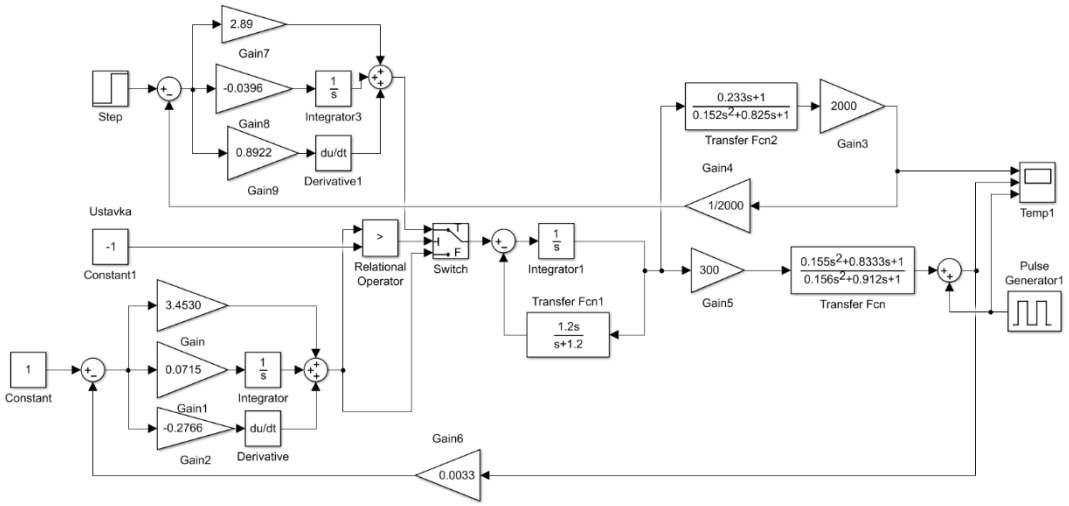


Рис. 4. Имитационная модель противопомпажной системы с контролем температуры за турбиной

В соответствии со структурной схемой предлагаемой системы устранения помпажа, показанной на рис. 3, предлагается имитационная модель этой системы, приведенная на рис. 4. В качестве регуляторов задающего воздействия, подающегося на исполнительное устройство, используются ПИД-регуляторы, коэффициенты которых были получены с помощью библиотеки *Simulink Design Optimization*, блока *Signal Constraint*.

В структурную схему для проверки ее работоспособности помещен генератор прямоугольных пульсаций (блок *Pulse Generator1*). Параметры генератора пульсаций: амплитуда 150°, период 3 с.

Его задача состоит в том, чтобы вносить в работу системы возмущения по температуре и тем самым провоцировать переключение управления на канал температуры.

На рис. 5 показаны графики изменения оборотов и температуры двигателя, а также вносимые возмущения по температуре соответственно.

На графиках видно, как корректируется заброс температуры, вносимый генератором пульсаций, из-за чего падают, а затем восстанавливаются обороты авиадвигателя, что говорит о работоспособности предложенной системы управления.

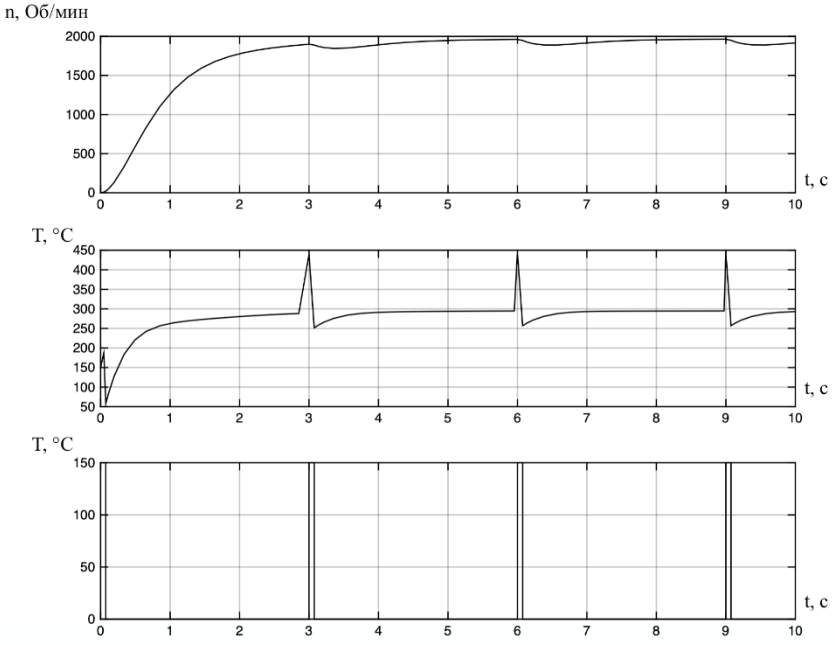


Рис. 5. Графики оборотов (верхний график), температуры двигателя (средний график), а также вносимых изменений по температуре (нижний график)

Заключение

1. Предложена противопомпажная система с контролем температуры за турбиной авиадвигателя летательного аппарата.

2. Разработана имитационная модель предложенной противопомпажной системы в среде MATLAB.

3. Проведены исследования работоспособности предложенной противопомпажной системы в условиях внешних воздействий в виде импульсного изменения температуры амплитудой 150° на систему управления авиадвигателем. Результаты исследований свидетельствуют о работоспособности предложенной противопомпажной системы.

Библиографический список

1. *Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А.* Системы автоматического управления летательными аппаратами и их силовыми установками: Учебник для студентов высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.

2. *Котовский В. Н., Комов А. А.* Теория авиационных двигателей: учеб. пособие (конспект лекций). М.: МГТУ ГА, 2013. Ч. 1. 108 с.

3. *Нечаев Ю. Н., Федоров Р. М.* Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. М.: Машиностроение, 1977. 312 с.

4. *Рудаченко А. В., Чухарева Н. В., Байкин С. С.* Газотурбинные установки: учеб. пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2008. 139 с.

УДК 004.31

И. А. Бабкин*
инженер
Е. А. Алексеева**
бакалавр
С. С. Тонких****
старший инженер
**АО «НЛМК-Инжиниринг»*
***Финансовый университет при Правительстве РФ (Липецкий филиал) Россия, г. Липецк*
****ООО НПП «Стандарт»*

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЭВМ

В данной работе представлена новая концепция автоматизированной микроЭВМ. Основной аспект реинжиниринга заключается в решении проблемы неэффективного потребления электроэнергии. Решением послужило упрощение инструкций и написание собственной операционной системы.

Ключевые слова: *микропроцессор, микроконтроллер, набор инструкций, ISA, минимизация, линейное программирование, умный дом, интернет вещей, ПЛК.*

I. A. Babkin*
Engineer
E. A. Alexeeva**
Bachelor
S. S. Tonkih****
Senior Engineer
**NLMK-Engineering*
***Financial University under the Government of the Russian Federation (Lipetsk branch) Russia, Lipetsk*
****Standard LLC*

DEVELOPMENT OF THE CONTROL COMPUTER

Abstract: This paper presents a new concept for automated microcomputer. The key aspect of reengineering is the solution to the problem of ineffective consumption of electricity. The solution was the simplification of instructions and writing our own operating system.

Keywords: *microprocessor, microcontroller, instruction set, ISA, minimization, linear programming, smart home, Internet of things, PLC.*

Современное производство невозможно организовать без использования программируемых логических контроллеров (PLC-programmable logic controller) или ПЛК. Одну из лидирующих позиций в данной области занимает компания «Mitsubishi Electric» [1]. Менеджер по производству Хью Таскер из компании «Митсубиси Электрик» выделил 10 причин, почему производству необходимо использовать «логические контроллеры» [2]. Среди них есть следующие аргументы: прочность и надежность (в целом нет необходимости перезагрузки ПЛК после программных сбоев); масштабируемость (поскольку ПЛК предлагает сравнительно недорогое решение поставленных производством задач по сравнению с обычном компьютером, то их покупательная способность возрастает); интеграция с другим оборудованием автоматизации и другие. Тем не менее анализ рынка программируемых логических контроллеров выявил, что известные устройства имеют ряд проблем: высокая стоимость, отсутствие средств быстрой смены управляющих программ, невозможность выполнения сложных математических расчетов [3]. Также стоит не забывать, что управляющая электронно-вычислительная машина предназначена для постоянного контроля автоматизируемого процесса (в некоторых ситуациях может работать от автономного источника питания), ее сложность и энергопотребление должны быть минимальными.

Поэтому основная цель заключается в создании управляющей ЭВМ с широким диапазоном

применения на основе программируемого логического контроллера с возможностью подключения разнообразных датчиков.

Одна из основных проблем электронно-вычислительной машины заключается в нерациональном потреблении электроэнергии. Решение данной задачи необходимо искать в оптимизации архитектуры процессора с целью его упрощения. Изменения следует проводить путем исключения тех инструкций, получение которых может происходить посредством небольших последовательностей кода с использованием базовых инструкций. При данной минимизации следует помнить о задаче сохранности функциональности процессора, где функции, выполняющие исключенные инструкции, должны быть реализуемы с помощью включенных в минимальный набор инструкций. Согласно проведенному исследованию [3] было выявлено, что для архитектуры x86-64 только 20 инструкций образуют около 94,5% проанализированного кода. Для архитектуры MIPS в анализируемом коде встретились 89% всего набора инструкций. В работе [4] задача минимизации набора инструкций была представлена как задача линейного программирования, а затем решена методом LU-разложения для процессора Intel 8080, результатом которой стал набор инструкций mini80.

Опираясь на идею об управлении исполнительными механизмами, контроллеров датчиков, используются 8 и 16-разрядные процессоры низкой стоимости (примерно до $10) [5]. Исходя из анализа влияния арности на объем памяти и времени решения задачи выявлено, что объем памяти для решения одной и той же задачи и аппаратная реализация значительно упрощена для одноадресной машины [6]. Следовательно, в процессоре необходимо использование одного регистра, а режимы адресации ограничены прямой и косвенной адресацией, при этом структура памяти представляет собой страничный вид. Такие особенности значительно влияют на набор инструкций, что требует его адаптации. Новый набор инструкций назван MISC [4]. Для реализации данной архитектуры возможно использование виртуальной машины или ПЛИС (программируемой логической интегральной схемы).

Физическая реализация микроЭВМ базировалась на микроконтроллере AT89C51, работающем на частоте 11,0592 МГц. На данной частоте процессор способен обеспечить производительность 2 MIPS. На плате микроЭВМ расположены микроконтроллер и адаптер шины МПСИ (магистральный последовательный интерфейс основан на упрощенном стандарте I^2C), 128 Кбайт ОЗУ, а также драйвер последовательного порта MAX232. Была разработана плата дискретных и аналоговых портов, базирующаяся на микроконтроллере AT89C51 и подключаемая к плате микроЭВМ по шине МПСИ с целью осуществления связи с внешней средой. Она имеет 16 дискретных и 8 аналоговых портов с 8-битным АЦП. Программа, разработанная для данной платы, способна считывать значения с аналоговых портов, устанавливать направления передачи данных для дискретный портов, считывать их состояние. Важной особенностью разработанной системы является максимальное применение отечественных микросхем 555, 1533 и 155 серий. Единственным исключением является микросхема контроллера AT89C51, однако ее можно заменить на совместимый отечественный контроллер КР1816ВЕ51. Это говорит о том, что данную разработку можно рассматривать в качестве варианта импортозамещения в Российской Федерации.

Для построенной архитектуры процессора, а именно для центрального управляющего блока на основе микроконтроллера AT89C51, на языке ассемблера было разработано системное программное обеспечение:

– загрузчик для первоначальной настройки аппаратуры;

– программы выбора варианта загрузки в режиме 8051 или эмуляции процессора MISC;

– драйверов шины МПСИ и последовательного порта;

– функции вывода строки, числовых значений, дампа памяти, получения строки с терминала;

– виртуальной машины для выполнения MISC-инструкций со скоростью 100 тыс. инструкций/с.

Такой набор системных программ позволяет обеспечить необходимый минимум инфраструктуры для работы приложений и применения ЭВМ в прикладных целях. На данный момент разработанный комплекс применялся в качестве приемно-контрольного прибора в системе пожарно-охранной сигнализации и для управления подачей бензина в цилиндры двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

В первом случае управляющая программа работает в режиме виртуального процессора MISC и постоянно проверяет состояния дискретных и аналоговых входов, к которым подключены извещатели (датчики) движения, дыма, открытия двери и другие. В случае изменения состояния входа контроллер активирует систему оповещения через реле.

Для системы подачи топлива потребовалась незначительная доработка аппаратного обеспечения системы: объединение плат для уменьшения габаритов и уменьшение оперативной памяти. В нем управляющая программа работает в режиме Intel 8051, поскольку скорости виртуального

процессора недостаточно для процесса управления в реальном времени. Устройствами ввода в этом случае являются датчики: положения коленчатого вала, положения дроссельной заслонки (потенциометр), атмосферного давления, температуры воздуха. Основываясь на данных с датчиков, контроллер вычисляет необходимое наполнение цилиндра бензиновой смесью и подает сигнал на форсунку для ее открытия. [7]

Таким образом, разработанная архитектура процессора, аппаратное и программное обеспечение способны найти своего целевого пользователя. Применение данного устройства возможно в рамках бытовой и промышленной автоматизации, в частности «умный дом», «интернет вещей», для управления автомобильным двигателем. Простая архитектура и элементная база предложенной микроЭВМ конкурентоспособна на рынке программируемых логических контроллеров и систем автоматизации.

Библиографический список

1. SpendEdge «Top 5 PLC Vendors. URL: https://www.spendedge.com/blogs/top-five-vendors-plc-market (дата обращения: 14.12.2018).

2. Eureka «Top 10 reasons why you still need a PLC. URL: http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-blogs/top-10-reasons-why-you-still-need-a-plc/l13668/ (дата обращения: 14.12.2018).

3. *Бабкин И. А.* Опыт разработки управляющей ЭВМ // Школа молодых ученых: Материалы областного семинара по проблемам технических наук. Липецк, 2015. С. 197–203.

4. *Бабкин И. А.* Минимизация набора инструкций процессора методами линейного программирования и реализация полученного набора в микроЭВМ // Проблемы современной науки: сб. научных трудов конференции Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2016. С. 16–21.

5. Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер / В. Б. Стешенко, А. В. Руткевич, А. В. Бумагин и др. // Компоненты и технологии. 2008. № 10.

6. *Строганов Р. П.* Управляющие машины и их применение. М.: Высшая школа, 1986. 240 с.

7. Автоматизированная система управления подачей топлива и смесеобразования в двигателе внутреннего сгорания. URL: http://eandt.tk/dev/misc/drop.php (дата обращения: 14.12.2018).

УДК 681.5

М. В. Бураков*
кандидат технических наук, доцент
М. С. Брунов*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

Рассматривается задача идентификации параметров динамического объекта, заданного массивами измерений входа и выхода на конечном интервале времени, снятыми с лабораторного стенда в присутствии шумов измерений. Исследуются алгоритмы идентификации методом наименьших квадратов, а также нейросетевой идентификации с помощью нейронной сети прямого распространения. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, позволяющие сравнить эффективность различных методик идентификации.

Ключевые слова: *идентификация, нейронная сеть, моделирование.*

M. V. Burakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. S. Brunov*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF IDENTIFICATION ALGORITHMS ON A LABORATORY BENCH

The problem of identifying the parameters of a dynamic plant defined by an array of input and output measurements on a finite time interval taken from a laboratory bench in the presence of measurement noise is considered. The least squares identification algorithm is investigated, as well as neural network identification using a forward propagation neural network. The results of computational experiments in MatLab are given, confirming the comparison of the effectiveness of various identification techniques.

Keywords: *identification, least squares method, neural network, modeling.*

Введение

Лабораторный стенд «Теория автоматического управления» предназначен для получения опыта исследования систем управления. Главные навыки, которые должны быть получены студентами, заключаются в экспериментальном снятии статических и динамических характеристик динамических звеньев с помощью измерительных приборов, а также в практическом проектировании аналоговых корректирующих звеньев системы управления.

Одной из задач, которые могут быть поставлены перед студентами, является идентификация динамического объекта по экспериментальным характеристикам. Эта задача является одной из основных в теории и практике автоматического управления и допускает различные постановки [1–3]. Здесь можно выделить два варианта:

– Модель объекта строится на основании фундаментальных законов физики, механики, биологии и т. д. В этом случае модель является «белым ящиком» и задача идентификации заключается в уточнении параметров модели.

– Модель типа «черный ящик» представляет собой математическую конструкцию, которая должна наилучшим образов согласовать входы и выходы объекта, независимо от его внутренней природы.

Задача идентификации может ставиться однократно – на этапе синтеза системы управления либо многократно – при организации контура адаптации.

Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Исходными данными для идентификации являлись массивы входных и выходных данных. Входной сигнал представлял собой прямоугольный импульс, а выходной – соответствующую реакцию линейного звена 2-го порядка (рис. 2). На учебном стенде звено было реализовано с помощью операционных усилителей. Оба сигнала

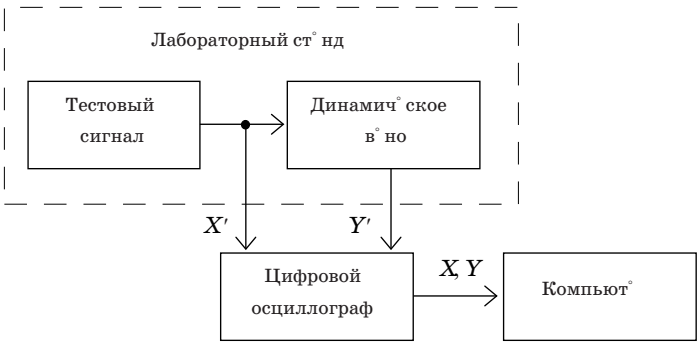


Рис. 1. Подготовка данных для идентификации

зашумлены. Природа шумов, предположительно, объясняется наводками проводников и округлением чисел при работе АЦП.

Оцифрованные массивы измерений X и Y могут быть загружены в рабочее пространство *MatLab*, после чего может быть решена задача идентификации.

Были рассмотрены два популярных алгоритма идентификации: метод наименьших квадратов (МНК) и нейросетевая идентификация. Оба алгоритма не рассматривают внутреннюю структуру объекта, то есть используют модель типа «черный ящик», согласующую реакции объекта и его модели на тестовый входной сигнал.

Идентификация методом наименьших квадратов

Для МНК идентификаторов характерны два способа обработки информации [4, 5]:

– информация предварительно накапливается (формируется выборка из заданного количества входных и выходных измерений), а затем решается задача параметрического оценивания каким-либо подходящим численным методом;

– одновременное обновление регрессионной выборки и решение задачи параметрического оценивания с учетом решений, полученных на предыдущих шагах. Построенная таким образом процедура называется рекуррентным методом наименьших квадратов (РМНК).

Попытка непосредственно применить алгоритм МНК идентификации к исходным данным приводила к большим ошибкам. На первом этапе для решения этой проблемы переменялось сглаживание. В качестве фильтра использовалось скользящее среднее. Это позволило повысить качество моделей, но ошибка идентификации по-прежнему оставалась неприемлемо большой.

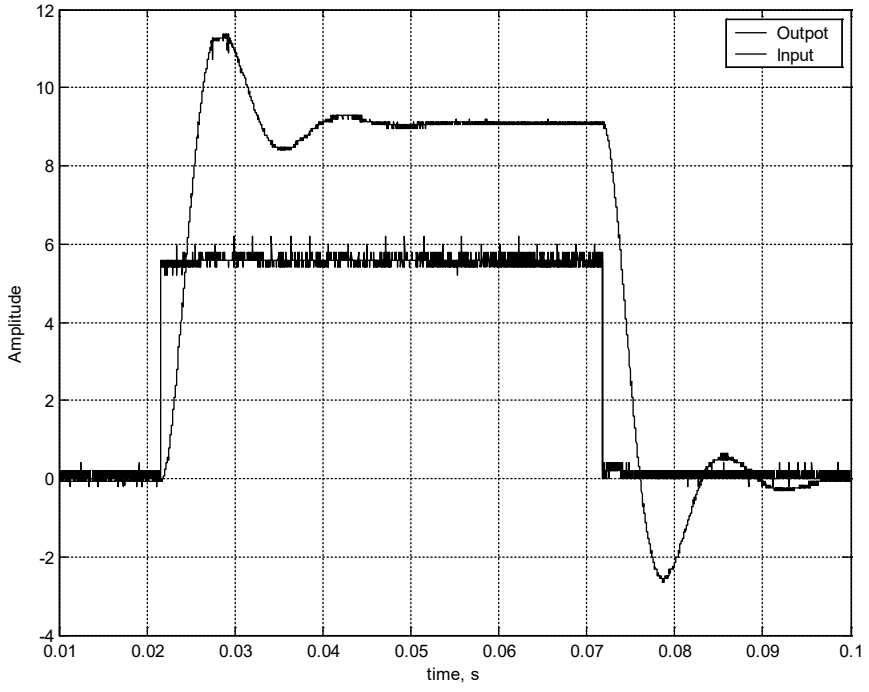


Рис. 2. Экспериментальные данные (исходные данные для идентификации)

Хорошие результаты удалось получить, применив процедуру прореживания исходных данных. Для рабочей выборки отбиралось каждое сотое значение из массивов исходных данных. Модель строилась на основе сформированной выборки. Ниже приводится скрипт-файл в пакете *Matlab*.

```
% Идентификация методом наименьших квадратов
%Import data in y0
m=100; % прореживание
tt=y0(:,1) + 55/1000;; % t=decimate(tt,m);
uu=y0(:,2); % u=decimate(uu,m);
yy=y0(:,3); % y=decimate(yy,m);
M=length(tt); % size of vector
for k=1:100;
t(k)=k;
u(k)=uu(k*m);
y(k)=yy(k*m);
end
N=length(t);  % size of decimation vector
Ts=mean(tt(2:end)-tt(1:end-1))
%Шаг дискретизации
T=0:Ts:(N-0)*Ts;
figure(1)
plot(tt,yy,'k-',tt,uu,'k-');
legend('Outpot','Input');grid;
% title('Real data');
xlabel('time, s');ylabel('Amplitude');
% Процедура идентификации
N=2
for k=N+1:length(y)
Phi(k-N,:)=[u(k-1) u(k-2) -y(k-1) -y(k-2)];
end  % Формирование системы линейных уравнений
Y=y(N+1:end); % для расчета не-
известных параметров
theta=pinv(Phi)*Y';  % Решение системы урав-
нений методом псевдообратной матрицы
G=tf([theta(1) theta(2)],[1 theta(3)
theta(4)],Ts*100) % Формирование дискрет-
ной передаточной функции модели объекта
sys=d2c(G,'zoh')   % Непрерывная модель
figure(2) % Визуализация результатов идентифи-
кации
[ye,te]=lsim(sys,uu,tt);  % Выходной сигнал
   модели объекта
figure(2)
plot(tt,yy,'k--',te,ye,'k-');grid;xlabel('time,
s');ylabel('Amplitude');
legend('real','model')
```

Полученная дискретная модель была преобразована в непрерывную. Это позволило подать на ее вход сигнал, полученный экспериментально. Результаты сравнения выходов объекта и модели представлены на рис. 3.

Применение рекуррентной процедуры МНК идентификации позволяет получить аналогичные результаты. Существенных отличий в качестве получаемых моделей обнаружено не было.

Использование искусственной нейронной сети

Принципы использования искусственных нейронных сетей (НС) для решения задачи идентификации предполагают такое изменение весов межнейронных связей, при котором минимизируется невязка между выходом НС с данными обучающей выборки [6, 7].

Искусственная нейронная сеть (НС) прямого распространения содержит один или множество слоев нейронов, которые не имеют обратных связей (то есть не имеют памяти). Простой путь внесения динамики в поведение НС заключа-

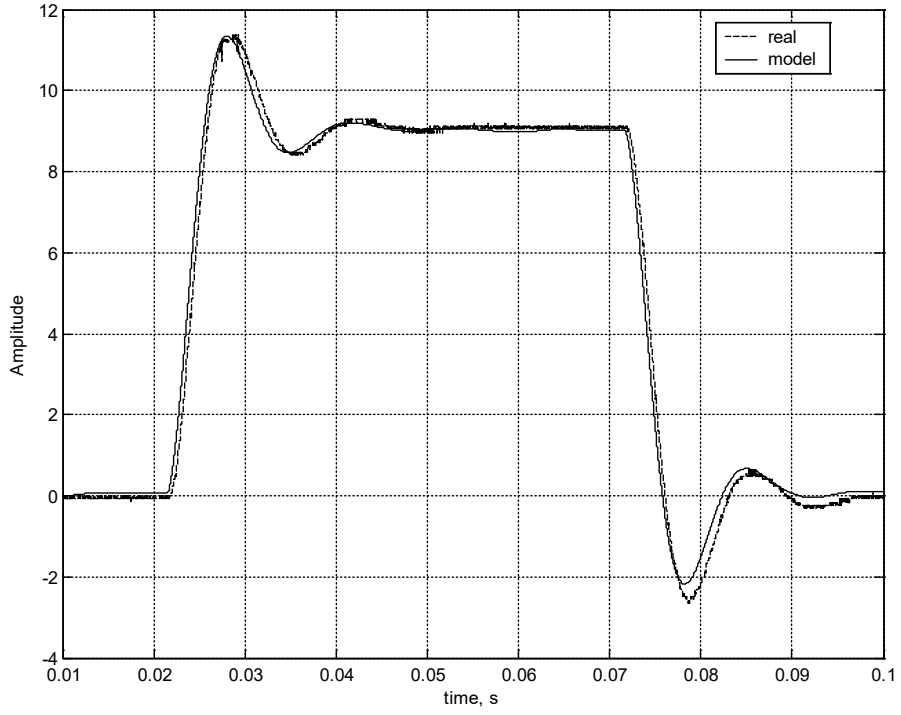


Рис. 3. Сравнение выходов динамического звена и его модели

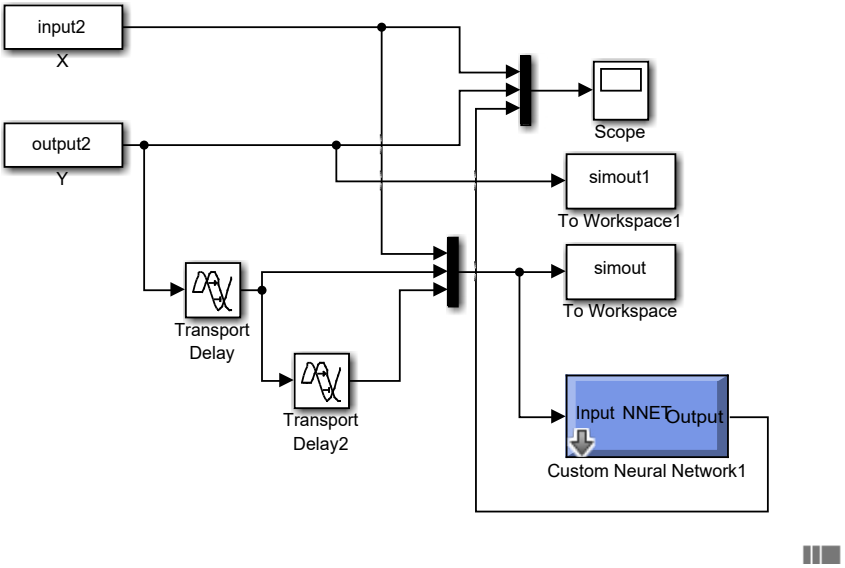


Рис. 4. Использование НС прямого распространения для идентификации

ется в подаче на вход сети не только текущих, но и задержанных значений входа и выхода. Количество задержанных сигналов и величина задержки должны примерно соответствовать порядку объекта и его постоянным времени. Это соответствие определяется методом проб и ошибок (либо по аналогии). Возможна также постановка задачи структурной идентификации, если объект существенно нелинеен [10].

Алгоритмы нейросетевой идентификации в *MatLab* описаны в [8, 9]. На рис. 2 представлена схема нейросетевой идентификации.

Массивы *input2* и *output2* служат для моделирования входа и выхода объекта с заданным шагом по времени. Они формируются на основании данных от цифрового осциллографа с помощью *MatLab*-программы:

```
dt=0.00001;
for i=1:11250
input2(2,i)=input_1(i);
input2(1,i)=dt;
output2(2,i)=output_1(i);
output2(1,i)=dt;
dt=dt+0.00001;
end
```

Массивы *simout* и *simout1* представляют собой цифровые массивы одинаковой длины, которые используются алгоритмом обратного распространения ошибки для определения параме-

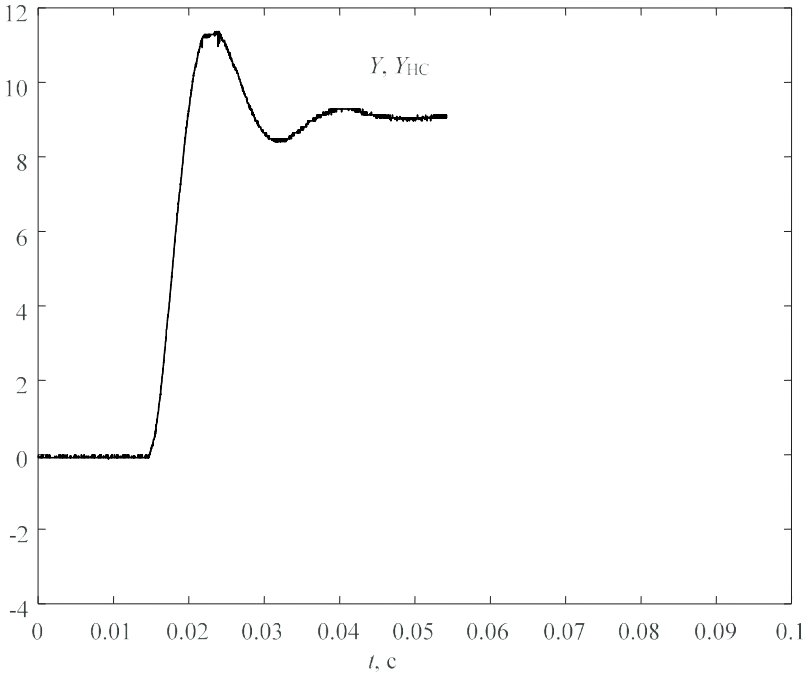


Рис. 5. Проверка качества идентификации:
Y и $Y_{НС}$ – выход объекта и выход нейронной сети после идентификации

тров НС. Следующая программа выполняет обучение 2-слойной НС прямого распространения с тремя нейронами 1-го слоя, одним нейронов 2-го слоя и линейными активационными функциями:

```
net=newff([-5 12; -5 12; -5 12],[3 1],
{'purelin','purelin'},'trainlm');
P = simout';
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.05;
net.trainParam.epochs = 500;
T = simout1';
net.trainParam.goal = 0.00001;
net1 = train(net, P, T);
```

На рис. 5 представлены результаты моделирования.

Как показывает рис. 5, выход НС с высокой степенью точности воспроизводит выход объекта.

Заключение

Современный арсенал алгоритмов идентификации отличается большим разнообразием. Метод МНК и алгоритмы на его основе применяются достаточно давно, они имеют четкое математическое описание. Нейросетевые алгоритмы идентификации менее прозрачны для понимания, поскольку НС может иметь достаточно сложную внутреннюю структуру, параметры которой меняются в процессе обучения.

Проведенное исследование показало, что нейросетевая модель несколько лучше решает задачу идентификации (рис. 5), чем алгоритм МНК (рис. 3). Это объясняется тем, что НС рассматривает весь массив экспериментальных данных как обучающую выборку, в то время как РМНК использует только ее часть.

Лабораторный стенд «Теория автоматического управления» позволяет совместить в учебном процессе работу с современными измерительными приборами и компьютерную обработку измерений на основе численных алгоритмов. Это дает студентам важные навыки для проведения самостоятельных исследований.

Библиографический список

1. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

2. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.

3. *Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э.* Проектирование систем управления. М.: Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

4. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.

5. *Дейч А. М.* Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. 240 с.

6. *Narendra K., Parthasarathy K.* Identification and control of dynamical systems using neural network // IEEE Transaction on neural network. 1990. No 1. P. 4–27.

7. *Kuschewski J., Hui S., Zak S.* Application of Feedforward Neural Networks to Dynamical System Identification and Control // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1. P. 37–49.

8. *Бураков М. В.* Нейронные сети и нейроконтроллеры. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

9. *Бураков М. В.* Нейросетевая идентификация // Завалишинские чтения'15. СПб.: ГУАП, 2015. С. 49–54.

10. *Бураков М. В., Брунов М. С.* Структурная идентификация нечеткой модели // Тр. СПИИРАН. 2014. Вып. 3 (34). С. 232–246.

УДК 681.5

М. В. Бураков*
кандидат технических наук, доцент
М. С. Брунов*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ С МАЛЫМИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ НУЛЯМИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Рассматривается проблема модального синтеза с учетом медленных устойчивых нулей передаточной функции объекта управления, которые могут оказывать сильное влияние на качество переходных процессов. Предлагается структура двухконтурной системы управления, в которой внутренний контур реализует управление по состоянию, а внешний – управление по ошибке выхода. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренной методики, позволяющей устранить негативное влияние медленных нулей на переходный процесс.

Ключевые слова: *модальное управление, нули передаточной функции, моделирование.*

M. V. Burakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. S. Brunov*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODAL CONTROL OF SYSTEMS WITH SMALL NEGATIVE ZEROS OF TRANSFER FUNCTIONS

The problem of modal synthesis is considered taking into account the slow stable zeros of the transfer function of the control plant, which can have a strong influence on the quality of transients. A structure of a two-loop control system is proposed, in which the inner loop implements state control, and the outer one controls the output error. The results of computational experiments in MatLab are presented, confirming the effectiveness of the considered methodology, which allows eliminating the negative effect of slow zeros on the transition process.

Keywords: *modal control, zeros of transfer function, modeling.*

Введение

Основная идея метода модального управления заключается в расчете таких обратных связей по состоянию, при которых полюса замкнутой системы занимают заданные положения [1–3]. Однако процедура модального синтеза не учитывает влияние нулей объекта на динамику системы [4, 5], которое может выражаться в резком увеличении перерегулирования во время переходного процесса. Эта проблема становится трудноразрешимой, если передаточные нули имеют малые значения или находятся справа от мнимой оси.

Проблема учета нулей объекта при модальном синтезе допускает использование различных подходов, в которых обычно делается попытка аналитического описания задачи [6–9]. Так, в работе [6] для учета влияния нулей использован метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов. В [7] показана возможность разработки специальных диаграмм, позволяющих более точно обеспечивать требуемые показатели качества переходных процессов в системе для учета влияния нулей «справа». В работе [8] для проведения анализа свойств математической модели используется инвариантная по отношению к базису характеристика объекта – матрица вырожденности. Предложен способ декомпозиции модели объекта управления с использованием вычетов передаточной функции. В [9] рассматривается метод управления спектром системных нулей путем изменения матрицы выхода, который позволяет получать множество решений задачи в общем виде с помощью технологии канонизации матриц.

В [10] предложена процедура модального синтеза, которая отличается тем, что описание желаемой системы дается не с помощью набора полюсов, а с помощью эталонной модели, соответствующей этим полюсам. Аналитический расчет коэффициентов обратных связей по состоянию заменяется на поисковую оптимизацию коэффициентов (или расположения полюсов). В результате происходит поиск субоптимального решения задачи модального синтеза. Генетический алгоритм является адекватным инструментом для решения этой задачи, позволяющим учитывать возможные ограничения при поиске решения.

В настоящей работе рассмотрен вариант синтеза модального регулятора для объекта с малыми отрицательными нулями, который базируется на введении дополнительной отрицательной обратной связи, устраняющей негативное влияние нулей.

Постановка задачи

Понятия быстрого и медленного нуля системы введены в работе [11]. Быстрые нули – это те, которые расположены намного дальше от границы устойчивости, чем доминирующие полюсы. Медленные нули – те, которые находятся намного ближе к границе устойчивости, чем доминирующие полюсы системы. Влияние медленных и устойчивых нулей проявляется в росте перерегулирования, которое может достигать сотен процентов [11].

Возможным вариантом решения проблемы резкого роста перерегулирования при малых отрицательных нулях системы может быть повышение порядка астатизма при расширении вектора состояния. Этот подход использован в [1] для устранения статической ошибки системы.

Рассмотрим объект типа *SISO* (*Single Input Single Output*)

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \\ y(t) = CX(t) \end{cases}.$$

Допустим, что эталонный входной сигнал генерируется линейной системой, описываемой такого же вида системой уравнений при нулевых начальных условиях:

$$\begin{cases} \dot{X}_r(t) = A_r X_r(t) \\ r(t) = d_r X_r(t) \end{cases}.$$

Рассмотрим ступенчатый входной сигнал. Для этого сигнала $dr/dt = 0$, и ошибка воспроизведения

$$e(t) = y(t) - r,\ \dot{e}(t) = \dot{y}(t) = C\dot{X}(t).$$

Также можно записать

$$\ddot{X} = A\dot{X} + B\dot{u}.$$

Введем вспомогательные переменные

$$Z = \dot{X}(t),\ w = \dot{u}(t).$$

Тогда можно записать

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} w.$$

Если эта система является управляемой, то можно сформулировать такой сигнал обратной связи по состоянию

$$w = -ke - KZ,$$

чтобы ошибка асимптотически стремилась к нулю.

Таким образом,

$$u(t) = \int_0^t w dt = \int_0^t \left(-ke(t) - KZ(t)\right) dt = -k\int_0^t e(\tau) d\tau - KX(t).$$

Структура системы управления будет иметь вид, показанный на рис. 1.

Рассмотрим использование структуры рис. 1 для управления объектом, заданным передаточной функцией

$$W(s) = \frac{4s+1}{s^3 + 2.5s^2 + s + 1}, \quad (1)$$

которой соответствуют матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -2.5 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};\ B = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};\ C = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

Зададим расположение полюсов замкнутой системы вектором: $P = [-3 \quad -2 \quad -1]$.

Переходный процесс для системы с модальным регулятором показан на рис. 2. Перерегулирование превышает 200%.

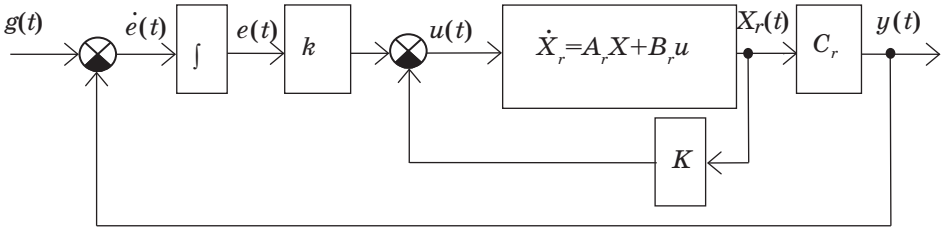


Рис. 1. Модальный регулятор с интегратором

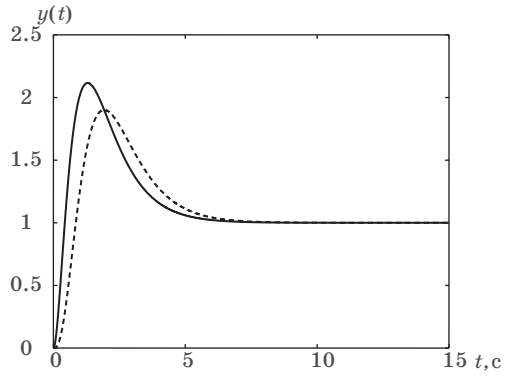


Рис. 2. Сравнение переходных процессов: система с модальным регулятором (сплошная), система с расширенным вектором состояния (пунктир)

$$B_{\text{rr}} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \qquad C_{\text{rr}} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Система управления приобретает вид, показанный на рис. 3.

Выберем расширенный вектор полюсов в виде:

$$P_{\text{rr}} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -3 & -2 & -1 \end{bmatrix}.$$

На основании матриц A_{rr}, B_{rr}, P_{rr} синтезируется вектор обратных связей K таким образом, что

$$k_1 = -K(4); \quad k_2 = -K(5);$$
$$K = \begin{bmatrix} K(1) & K(2) & K(3) & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

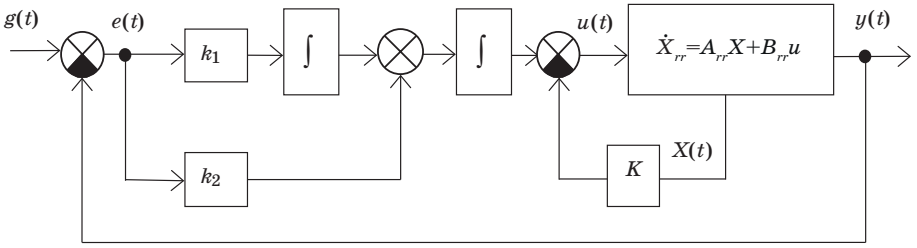


Рис. 3. Модальное управление с расширенным вектором состояния

Для системы с расширенным вектором состояния системные матрицы имеют вид:

$$A_r = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}; \quad B_r = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; \; C_r = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}.$$

Выберем расширенный вектор полюсов в виде: $P_{\text{r}} = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -2 & -1 \end{bmatrix}$.

На основании матриц A_r, B_r, P_r синтезируется вектор обратных связей K таким образом, что

$$k = -K(4); \qquad K = \begin{bmatrix} K(1) & K(2) & K(3) & 0 \end{bmatrix}.$$

Переходный процесс для системы с расширенным вектором состояния представлен на рис. 2, улучшение переходного процесса незначительно.

Рассмотрим далее систему с двумя интеграторами, для которой сигнал управления имеет вид:

$$u(t) = \int_0^t \int_0^t w dt = \int_0^t \int_0^t \left(-k_1 e(\tau) - k_2 \dot{e}(\tau) - K\ddot{X}(t) \right) d\tau d\tau =$$
$$= -k_1 \int_0^t \int_0^t e(\tau) d\tau d\tau - k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau - KX(t).$$

Матрицы системы с расширенным вектором состояния:

$$X_{\text{rr}} = \begin{bmatrix} X \\ e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad A_{\text{rr}} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

На рис. 4 приведен переходный процесс в системе.

Как показывает рис. 4, перерегулирование в системе остается высоким, кроме того, в начале переходного процесса появляется нежелательный «выброс» переходной характеристики в отрицательную область (отрицательное перерегулирование), и увеличивается время переходного процесса.

Таким образом, повышение порядка астатизма в системе с модальным регулятором не позволяет устранить высокое перерегулирование, вызванное наличием отрицательных нулей, расположенных близко к мнимой оси.

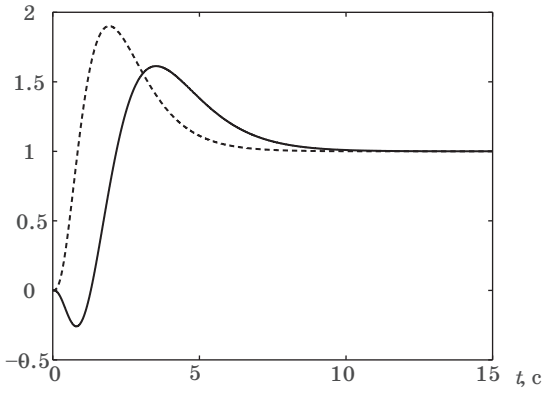


Рис. 4. Сравнение переходных процессов: система с одним интегратором (пунктир сплошная), система с двумя интеграторами (сплошная)

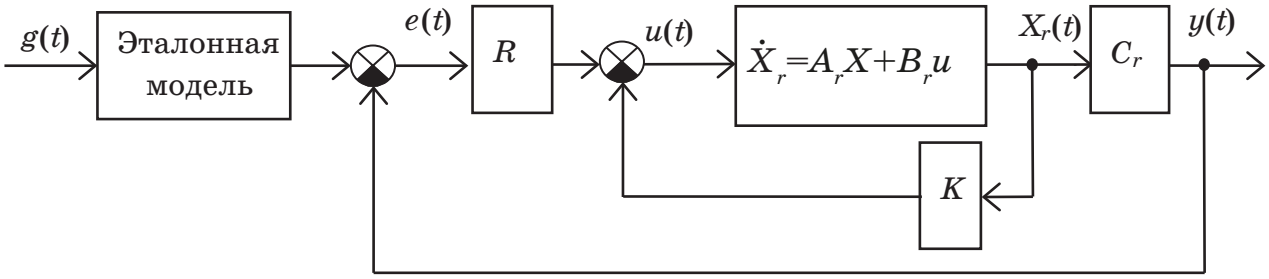


Рис. 5. Двухконтурная система с эталонной моделью

Предлагаемый подход к решению

Продолжая основную идею, рассмотренную в [10], будем использовать описание желаемой системы не только в виде набора полюсов, но и с помощью эталонной модели, соответствующей этим полюсам. Как показывают рис. 1 и 3, модальный регулятор образует внутренний контур управления системой, а система с интеграторами, повышающая порядок астатизма, – внешний контур управления. Как подчеркивается в [1], система с интеграторами является внутренней моделью входного сигнала: один интегратор соответствует ступенчатой функции, два – линейному входному сигналу. Развивая эту концепцию, вынесем модель за пределы внешнего контура управления (рис. 5).

Внутренний контур системы использует описание желаемого расположения полюсов, заданное с помощью стандартных полиномов (Ньютона, Баттерворта, Чебышева или Бесселя) либо с помощью корневых показателей качества.

Внешний контур рассматривает текущую ошибку выхода системы $e(t)$, которая служит входом регулятора R. Для односвязной системы здесь может быть использован регулятор ПИ- или ПИД-типа.

Результаты моделирования

Рассмотрим задачу управления системой (1). Выберем расположение полюсов желаемой системы в соответствии с полиномом Ньютона при $p_1 = p_2 = p_3 = -3$, так что эталонная модель описывается передаточной функцией

$$G(s) = \frac{27}{(s+3)(s+3)(s+3)}. \qquad (2)$$

Реализация двухконтурной системы модального управления в *Simulink MatLab* представлена на рис. 6.

На рис. 7 приведена реакция системы на единичное ступенчатое воздействие. Двухконтурная система обеспечивает полное совпадение выхода системы и эталонного процесса. Эксперименты показали, что нуль системы можно сколь угодно близко приблизить слева к мнимой оси, это не меняет качество работы двухконтурной системы, в то время как перерегулирование в одноконтурной системе катастрофически увеличивается.

Коэффициенты k_1 и k_2 могут изменяться в широких пределах без ухудшения качества управления.

Для проверки качества решения рассмотрим систему с тремя нулями, расположенными в точке -0.25:

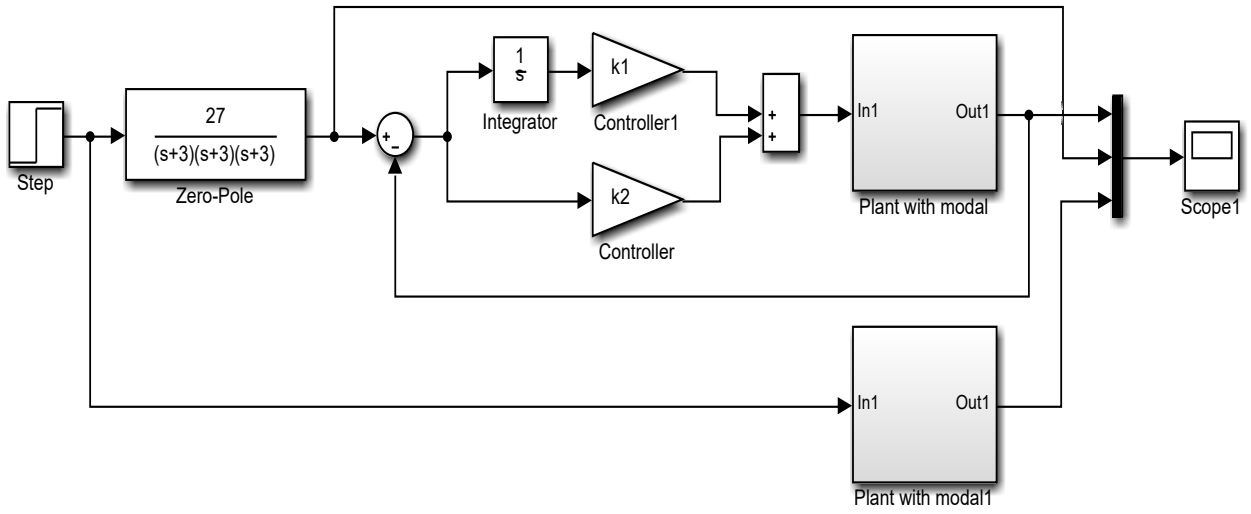


Рис. 6. Проверка качества работы системы

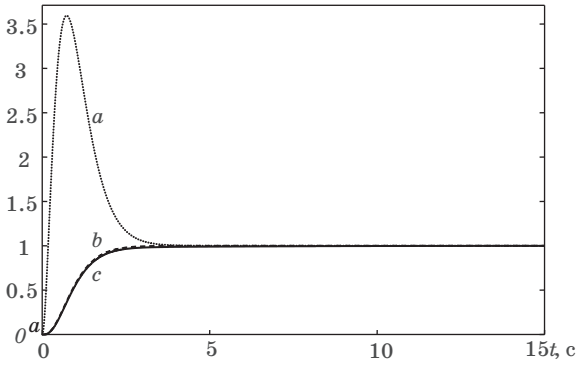


Рис. 7. Реакция на единичный скачок: a – система с модальным регулятором; b и c – эталонный процесс и двухконтурная система

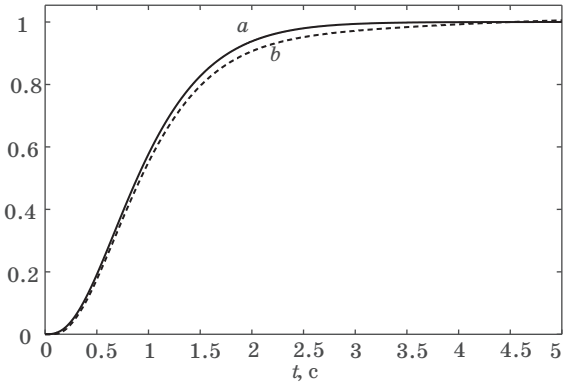


Рис. 8. Реакция на единичный скачок системы с 3 нулями: a – эталонный процесс; b – двухконтурная система

$$W(s)=\frac{64s^3+48s^2+12s+1}{s^3+2.5s^2+s+1}. \qquad (3)$$

Как показал эксперимент, для системы (3) с эталонной моделью (2) возможна потеря устойчивости при увеличении k_2. Уменьшение k_2 почти не сказывается на работе системы (рис. 8, где $k_1 = 15$, $k_2 = 0$).

Полученный переходный процесс практически не меняется при дальнейшем приближении нулей системы к мнимой оси.

Заключение

Метод модального управления является аналитическим и обеспечивает широкие возможности по проектированию односвязных и многосвязных линейных систем управления. Однако показатели качества регулирования в этом методе связаны только с положением полюсов замкнутой системы. Быстрые нули системы не оказывают влияния на результат модального синтеза, но при наличии медленных устойчивых системных нулей в системе возникает неприемлемое перерегулирование.

Рассмотренный метод введения дополнительной обратной связи по ошибке выхода позволяет нивелировать влияние медленных нулей и обеспечить заданные критерии качества переходного процесса.

Приведенные примеры решения задачи модального синтеза в *MatLab Simulink* показывают, что предлагаемая методика может быть эффективно использована для устранения перерегулирования, вызываемого медленными нулями.

Рассмотренный алгоритм коррекции модального регулятора может применяться при проектировании различных систем управления, в том числе в электромеханике и робототехнике.

Библиографический список

1. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

2. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.

3. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 183 с.

4. *Смагина Е. М.* Взаимосвязь проблемы задания передаточных нулей и метода модального управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 39–43.

5. *Дроздов В. Н., Абдуллин А. А.* Проблемы управления объектами с нулями передаточной функции // Тр. СПИИРАН. 2016 (44). С. 114–132.

6. *Тютиков В. В., Воронин А. И.* Анализ влияния нулей передаточной функции объекта на параметрическую чувствительность систем, синтезированных по методу АКАР // Вестник ИГЭУ. 2012. Вып. 2. С. 48–51.

7. *Вороной В. В., Воевода А. А.* О влиянии нулей «справа» на переходные процессы в системе // Сб. научных трудов НГТУ. 2013. № 2 (72). С. 19–29.

8. *Абдуллин А. А., Дроздов В. Н., Маматов А. Г.* Влияние нулей передаточной функции объекта на свойства регулятора // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 4 (53). С. 73–96.

9. *Асанов А. З., Демьянов Д. Н.* Аналитическое конструирование систем управления многосвязными динамическими объектами с учетом передаточных нулей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2010. С. 218–223.

10. *Бураков М. В.* Генетический синтез модального регулятора // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 25–30.

11. *Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э.* Проектирование систем управления. М.: Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

УДК 681.5

М. В. Бураков*
кандидат технических наук, доцент
Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

Рассматривается алгоритм управления ускорением двигателя-маховика космического аппарата, использующий ошибку скорости вращения ротора для формирования управляющего тока. Предлагаются варианты реализации наблюдателя скорости вращения ротора на основе обучаемой искусственной нейронной сети. Рассматривается бездатчиковое управление на основе нейроэмулятора, а также использование датчика угла с нейросетевым предиктором. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренной методики.

Ключевые слова: *двигатель-маховик, наблюдатель скорости, искусственная нейронная сеть.*

M. V. Burakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
D. O. Yakimovskiy*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

NEURAL NETWORK FLYWHEEL SPEED OBSERVER

The algorithm for controlling the acceleration of the flywheel of a spacecraft using the rotor speed error for generating a control current is considered. The proposed implementation of the observer of the speed of rotation of the rotor on the basis of a trained artificial neural network. A sensorless control based on a neuroemulator is considered, as well as the use of an angle sensor with a neural network predictor. The results of computational experiments in MatLab, confirming the effectiveness of the considered methods are given.

Keywords: *flywheel, speed observer, artificial neural network.*

Введение

Реактивный двигатель-маховик (ДМ) используется для управления космическими аппаратами [1–4]. ДМ представляет собой электродвигатель с ротором, имеющим большой момент инерции. В качестве электродвигателя в основном используется бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Основной режим работы электропривода двигателя-маховика – управление моментом (или ускорением). Направление момента электродвигателя обеспечивается дискретной коммутацией обмоток электронным коммутатором в соответствии с сигналами датчика положения ротора, а величина момента – током, протекающим в обмотках.

Задача оценки ускорения (момента) требует измерения скорости вращения БДПТ. В последние годы наметилась тенденция к отказу от датчиков механических и магнитных переменных за счет использования наблюдателей состояния БДПТ, в частности наблюдателей скорости вращения. Использование наблюдателей может снизить стоимость и повысить отказоустойчивость электропривода.

На практике для математического описания БДПТ используются линейные модели, что позволяет применять наблюдатели Льюинбергера для оценки скорости вращения БДПТ. Наблюдатель является моделью динамического объекта. Традиционный наблюдатель состояния, используемый в системах модального управления, получает на входе разность собственного выходного сигнала и выходного сигнала объекта. Ошибка выхода используется для коррекции состояния динамического объекта. Реализация наблюдателя может быть выполнена на базе нейронной сети [5].

При построении наблюдателя скорости в распоряжении разработчика имеются сигналы,

поступающие от датчиков напряжения и тока якорной цепи, а рассчитывается оценка угловой скорости вращения якоря [6]. При этом в качестве входного сигнала рассматриваемой динамической системы принимается напряжение якорной цепи, а в качестве отклика – ток [6]. Равенство измеренного тока и тока наблюдателя здесь служит признаком равенства скоростей вращения объекта и модели. Это справедливо при близости параметров объекта и модели, иначе близость токов не означает близости скоростей вращения. То есть задача идентификации является здесь основной.

Таким образом, можно констатировать, что использование наблюдателя Льюинбергера не имеет особого смысла, поскольку измеряемый ток может непосредственно служить входом наблюдателя скорости. Сам наблюдатель может быть получен с помощью искусственной нейронной сети (НС), обучение которой равносильно идентификации параметров объекта.

Постановка задачи

Двигатель-маховик (ДМ) создает управляющий момент при изменении скорости вращения своего ротора:

$$M_{Д} = J\frac{d\omega}{dt} = \frac{dH}{dt},$$

где $M_{Д}$ – управляющий момент ДМ; J – момент инерции ротора ДМ; ω – скорость вращения ротора двигателя-маховика; H – кинетический момент ротора ДМ ($H = J\omega$).

В процессе работы момент инерции ротора маховика можно считать постоянным $J = const$, поэтому задача управления сводится к обеспечению заданного ускорения вращения ротора [3].

Угловая скорость определяется накопленным значением динамического момента:

$$\omega = \int_0^t \frac{M_{Д}}{J} dt.$$

К корпусу аппарата прикладывается управляющий момент $M_{КА}$, численно равный и обратный по знаку динамическому моменту, развиваемому двигателем-маховиком:

$$M_{КА} = -J\frac{d\omega}{dt} = -(M_{Д} - M_{С}),$$

где $M_{с}$ – момент сопротивления вращению.

Момент сопротивления складывается из момента сухого трения M_1, момента вязкого трения M_2 и вентиляторного момента M_3:

$$M_{С}(\omega) = M_1(\omega) + M_2(\omega) + M_3(\omega) =$$
$$= k_1 \mathrm{sign}(\omega) + k_2\omega + k_3 \mathrm{sign}(\omega)\omega^2,$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты.

Если в качестве приводного электродвигателя ДМ применяется БДПТ, то электромагнитный момент, развиваемый двигателем, пропорционален величине тока, протекающего в обмотке статора:

$$M_{Д} = k_{Д} i,$$

где $k_{Д}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя; i – ток в обмотке статора.

Наиболее распространенная схема управления заключается в том, что входной сигнал, соответствующий требуемому управляющему моменту, преобразуется в ток двигателя.

В [7, 8] предлагается схема управления движением ротора, основанная на стабилизации скорости вращения маховика относительно расчетной скорости. Основная идея заключается в том, что на каждом такте измерения сравнивается текущее значение скорости ω и расчетное значение скорости $\omega_{р}$.

Регулятор тока поддерживает ток двигателя, который можно представить суммой двух составляющих:

$$i = i_Y + i_{К} = k_Y N_Y + k_{К}(\omega_{р}(n) - \omega(n)),$$

где i_Y – составляющая тока, пропорциональная величине входного сигнала; $i_{К}$ – составляющая, соответствующая ошибке реализации управляющего момента; k_Y и $k_{К}$ – коэффициенты закона управления; N_Y – задающее воздействие.

Значение расчетной скорости вычисляется интегрированием входного сигнала – требуемого ускорения в интеграторе.

$$\omega_{р}(n) = \omega_{р}(n-1) + \frac{M_Z(n)}{J}\Delta t,$$

где M_Z – текущее значение требуемого управляющего момента; Δt – шаг интегрирования по времени.

Текущее значение скорости необходимо измерять либо восстанавливать с помощью наблюдателя.

Нейросетевой наблюдатель

Включение нейросетевого наблюдателя в схеме управления движением ротора показано на рис. 1.

Исходными данными для обучения являются массив токов и соответствующий массив скоростей вращения. Задающее воздействие должно быть достаточно разнообразным, чтобы динамические свойства объекта проявились полностью.

Наблюдатель скорости использует НС прямого распространения. Поскольку НС этого типа являются статическими, для моделирования динамического объекта требуется использовать обратные связи, подавая на вход НС задержанные выходы объекта (рис. 2, где Δ – элемент задержки). Для обучения здесь может быть ис-

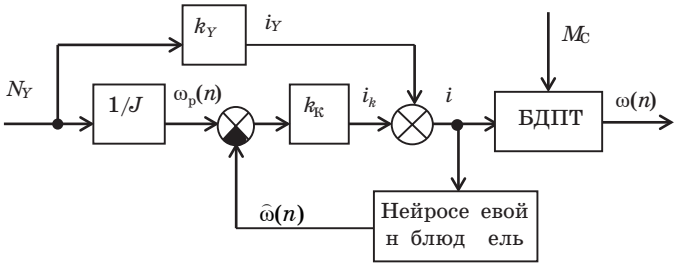


Рис. 1. Функциональная схема управления моментом БДПТ

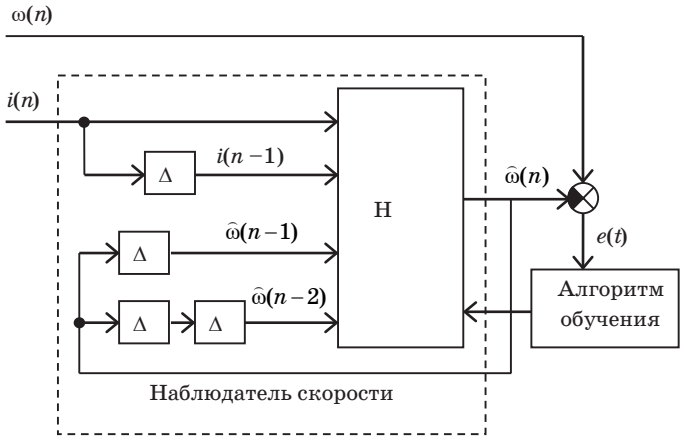


Рис. 2. Нейросетевой наблюдатель скорости в режиме обучения

пользован алгоритм обратного распространения ошибки.

При моделировании средствами *MatLab Simulink* использовались следующие основные параметры: момент инерции ротора $J = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с^2, для кодирования числового значения сигнала управления используется (10-разрядный код с учетом знака), диапазон изменения управляющего момента ± 0.05 Нм, момент сопротивления $M_C < 25 \cdot 10^{-4}$, цена младшего разряда сигнала кинетического момента < 0.004 Н·м·с/ед.

Вычислительные эксперименты показали, что в качестве наблюдателя скорости может быть использована 2-слойная сеть прямого распространения с пятью нейронами 1-го слоя и одним нейроном 2-го слоя. Первый слой имеет нелинейные активационные функции (*tansig*), 2-й слой – линейную активационную функцию.

На рис. 3 показаны управляющие токи, использованные при обучении и тестировании наблюдателя скорости.

На рис. 4 представлены графики скорости вращения ротора БДПТ.

На рис. 5 приведено сравнение выхода модели БДПТ, составленной на основании математического описания (она выполняла роль объекта) и нейросетевой модели. Графики практически совпадают, что свидетельствует о хорошем качестве обучения нейросетевой модели.

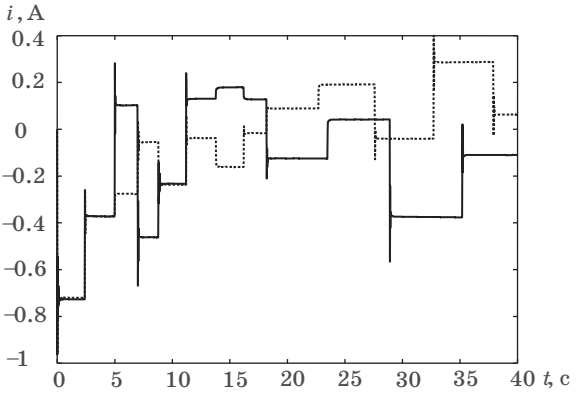


Рис. 3. Ток статора: обучающий сигнал (сплошная) и тестовый сигнал (пунктир)

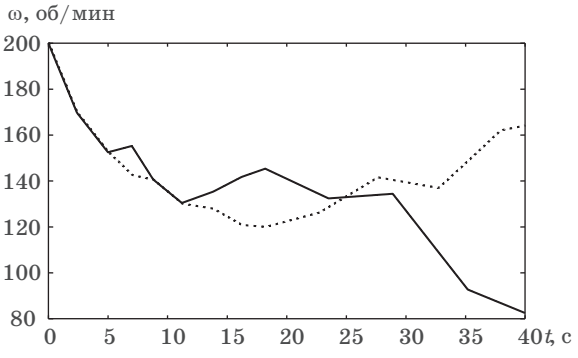


Рис. 4. Скорость ротора: обучающий сигнал (сплошная) и тестовый сигнал (пунктир)

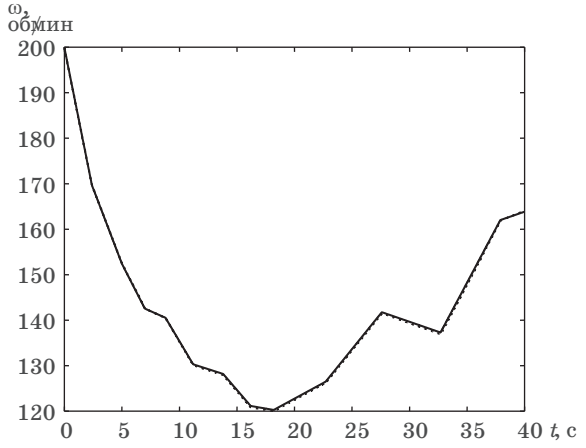


Рис. 5. Скорость ротора: выход объекта (сплошная) и выход наблюдателя (пунктир)

Использование датчика угла

При использовании нейросетевого наблюдателя скорости, как и при использовании наблюдателя Льюинбергера, не гарантируется точность работы при дрейфе параметров объекта. Поэтому в ряде случаев может быть эффективным использование простого датчика угла.

Информация о скорости вращения и угле поворота в контуре управления представлена в цифровом виде, поэтому она характеризуется дискретностью и тактом измерения (квантование по уровню и времени).

Дискретность цифрового датчика угла (ЦДУ) определяется конструкцией датчика и характеризует минимальное изменение угла, которое может показать датчик. Часто используют понятие «разрядность датчика». Если выходной сигнал датчика имеет n разрядов, то дискретность определяется формулой:

$$\Delta = \frac{\varphi_{\max}}{2^n},$$

где $\varphi_{\max}$ – максимальный измеряемый угол (360^0 для ДУ с неограниченным углом поворота).

Дискретность датчика определяется разрядностью применяемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Если текущее значение угла $\varphi(t)$, то измеренное ЦДУ значение угла φ^* определяется формулой:

$$\varphi^* = N \cdot \Delta = \left(\text{round}\left(\frac{\varphi(t)}{\Delta} \right) \right) \cdot \Delta,$$

где N – код на выходе АЦП.

Цифровой измеритель скорости (ЦИС) строится на основе показаний ЦДУ. Для определения скорости вращения необходимо вычислить приращение угла за заданное время измерения Δt. Если текущие показания ЦДУ обозначить как $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3,..,\varphi_k$, где i – номер такта измерения скорости, то величину скорости на такте i можно вычислить по формуле:

$$\omega_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\Delta t}.$$

Дискретность измерения скорости, то есть минимальное изменение скорости, которое может показать ЦИС, определяется формулой:

$$\Delta_\omega = \frac{\Delta}{\Delta t}.$$

Как показывает эта формула, точность измерения скорости обратно пропорциональна дискрету времени измерения. Повысить точность измерения скорости можно при увеличении Δt или уменьшении Δ.

Уменьшение дискретности датчика угла имеет конструкционные ограничения – высокоразрядные датчики угла – сложные, дорогие в изготовлении и эксплуатации приборы.

Увеличение времени измерения скорости вносит задержку в контуре управления и отрицательно сказывается на динамике и устойчивости системы.

Таким образом, возникает задача экстраполяции показаний датчика угла, которая может быть решена с использованием нейросетевой технологии [9].

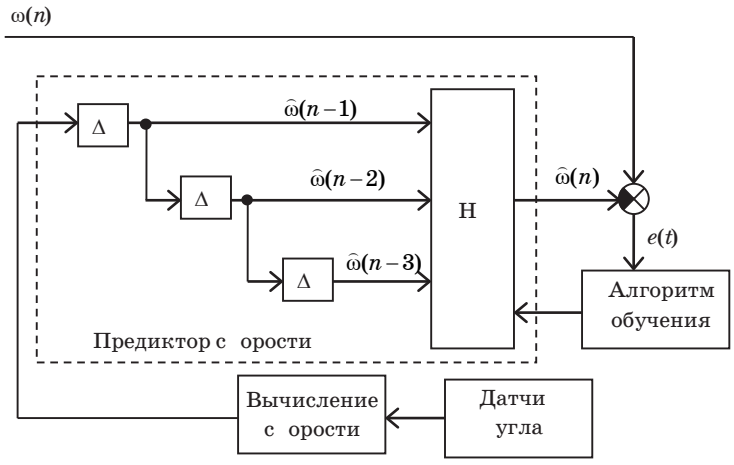


Рис. 6. Нейросетевой предиктор скорости в режиме обучения

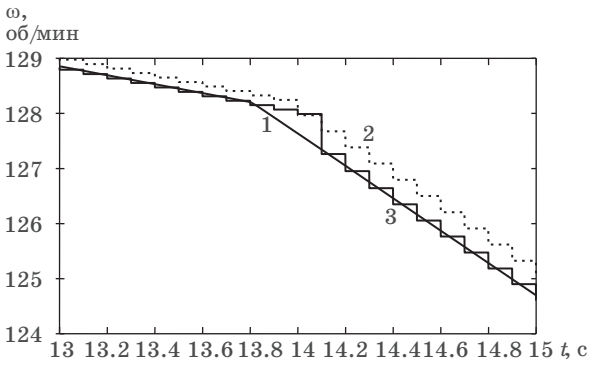


Рис. 7. Пример моделирования работы нейросетевого предиктора: 1 – истинная скорость; 2 – выход датчика; 3 – выход предиктора

На рис. 6 показана структура нейросетевого предиктора, который предсказывает значение угловой скорости на основании предыдущих показаний датчика угла. Для обучения здесь также был использован алгоритм обратного распространения. Как показывает рис. 7, нейропредиктор может значительно улучшить оценку скорости вращения.

Заключение

В статье рассмотрены два варианта использования нейронных сетей при оценке угловой скорости ДМ.

Нейросетевой наблюдатель скорости является нейроэмулятором, то есть моделью объекта управления. Использование наблюдателя требует предварительного обучения НС на основе массива данных, полученных при испытаниях с применением какого-либо измерителя скорости. Массив обучающих данных должен быть как можно более разнообразным для охвата всевозможных условий работы объекта. Модель на основе нейронной сети является «черным ящиком», который связывает наблюдаемый вход и выход объекта. Ее поведение после обучения может с высокой степенью точности воспроизводить реакции объекта на входной сигнал.

Нейросетевой фильтр датчика скорости является нейропредиктором, то есть на один шаг корректирует оценку скорости, основываясь на предыдущих показаниях. Использование нейропредиктора позволяет существенно улучшить точностные показатели при оценке угловой скорости.

Рассмотренный подход к конструированию нейросетевого наблюдателя скорости вращения может быть использован при проектировании.

Библиографический список

1. *Сорокин А. В., Башкеев Н. И., Кондратьев О. А.* Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 1998. № 4(23). С. 81–88.

2. *Александров Ю. С., Сорокин А. В.* Управление реактивным маховиком // Космические исследования. 1999. № 37(5). С. 538–543.

3. *Якимовский Д. О., Бураков М. В., Коновалов А. С.* Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата. СПб.: ГУАП, 2018. 152 с.

4. Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков / М. В. Поляков, А. С. Дмитриенко, О. Ю. Завьялова и др. // Докл. ТУСУРа. 2018. № 21(3). С. 109–115.

5. *Бураков М. В.* Нейросетевая реализация наблюдающего устройства // Завалишинские чтения′18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 15–19.

6. *Глазырин А. С.* Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы отработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью // Научный вестник НГТУ. 2015. № 58(1). С. 28–39.

7. *Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й.* Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Докл. ТУСУРа. 2018. № 21(3). С. 103–109.

8. *Кондратьев А. Б., Ситникова А. В.* Вопросы управления электроприводом системы ориентации с управляющими двигателями-маховиками // Проблемы совершенствования робототехнических систем летательных аппаратов: Сб. докладов 6 Всероссийской НТК. М.: МАИ, 2002. С. 296–299.

9. *Бураков М. В.* Нейронные сети и нейроконтроллеры. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

УДК 681.5

М. В. Бураков*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

В работе рассматривается задача управления системой магнитной левитации, которая представлена нелинейной моделью движения металлической сферы в магнитном поле. Для синтеза закона управления используется метод линеаризации обратной связью. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab Simulink, подтверждающие работоспособность системы управления.

Ключевые слова: *моделирование, система магнитной левитации, линеаризация обратной связью.*

M. V. Burakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONTROL OF A MAGNETIC LEVITATION SYSTEM

The paper deals with the task of controlling a magnetic levitation system, which is represented by a nonlinear model of the motion of a metal sphere in a magnetic field. The linearization method is used to synthesize the control law. The results of computational experiments in MatLab Simulink, confirming the efficiency of the control system are given.

Keywords: *simulation, magnetic levitation system, feedback linearization.*

Постановка задачи

Системы магнитной левитации (МЛ) широко используются в промышленности и на транспорте, и сфера их использования непрерывно растет. Это обуславливает важность проектирования эффективных систем управления МЛ, которые могут обеспечить высокую точность и снизить энергетические затраты.

Рассмотрим математическое описание системы магнитной левитации для модели, описывающей движение металлической сферы под воздействием электромагнитного поля (рис. 1, где m – масса шарика; u – приложенное напряжение; f – электромагнитная сила; x – расстояние от магнита до сферы; g – ускорение свободного падения).

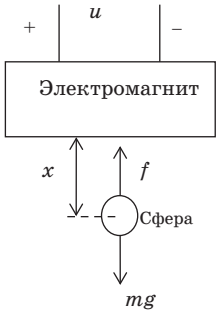


Рис. 1. Модель системы магнитной левитации

Динамику электромагнита в соответствии с законом Ома можно описать уравнением:

$$u(t) = i(t)R + L\frac{di(t)}{dt}, \qquad (1)$$

где R и L – сопротивление и индуктивность катушки электромагнита; i – ток катушки электромагнита.

Из (1) следует:

$$\frac{di(t)}{dt} = -i(t)\frac{R}{L} + \frac{u(i)}{L}. \qquad (2)$$

Движение металлического шарика в магнитном поле описывает уравнение баланса силы тяжести и электромагнитной силы [1]:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - k\left(\frac{i}{x}\right)^2, \qquad (3)$$

где k – коэффициент магнитной силы.

Система уравнений (2) и (3) является нелинейной, и для синтеза закона управления МЛ могут быть использованы различные подходы, в том числе линеаризация в рабочей точке [2], ПИД-управление [3], скользящее управление

[4], а также адаптивное [5] и нечеткое управление [6].

В настоящей работе рассматривается вариант линеаризации обратной связью системы (2)–(3). Работа полученного регулятора проверяется моделированием в *MatLab Simulink*.

Линеаризация обратной связью

Линеаризация обратной связью предполагает использование такого преобразования координат, при котором полученная модель системы в новых координатах становится линейной. С этой целью определяется управление u, при котором нелинейная модель объекта преобразуется в эквивалентную линейную модель с новым управлением v, для синтеза которого применяются линейные законы. Однако влиять на состояние объекта можно только через управление u, которое остается нелинейным.

Для использования метода линеаризации обратной связью необходимо привести описание системы (2)–(3) к следующему виду [7, 8]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= f(\mathbf{X}) + g(\mathbf{X})u \\ y &= h(\mathbf{X})\end{aligned}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{X}$ – вектор состояния; f, g, h – непрерывные и ограниченные гладкие векторные функции с достаточным числом производных по всем аргументам; u и y – скалярные вход и выход системы.

Рассмотрим вектор состояния

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

Система (4) с учетом (2), (3) и (5) приобретает вид:

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}) + g(\mathbf{X})u = \begin{bmatrix} x_2 \\ g - \dfrac{k}{m}\left(\dfrac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ -\dfrac{R}{L}x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{L} \end{bmatrix} u, \qquad (6)$$

$$y = h(\mathbf{X}) = x_1. \qquad (7)$$

Процесс линеаризации обратной связью основан на использовании аппарата алгебры Ли [7], в частности производной Ли, под которой понимается дифференцирование функции h по направлению вектора f или вектора g

$$L_f h(\mathbf{X}) = \frac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} f(\mathbf{X});$$

$$L_g h(\mathbf{X}) = \frac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} g(\mathbf{X}).$$

Закон управления для (6), (7) записывается в виде:

$$\alpha(\mathbf{X}) = L_f^n h(\mathbf{X}); \quad \beta(\mathbf{X}) = L_g\left(L_f^{n-1} h(\mathbf{X})\right);$$

$$u = \frac{1}{\beta(\mathbf{X})}\left[\alpha(\mathbf{X}) + v\right],$$

где v – сигнал линейной обратной связи по состоянию; n – относительный порядок системы, так что выполняется условие

$$L_g L_f^{n-1} h(\mathbf{X}) \neq 0.$$

Алгоритм линеаризации выполняется как последовательность следующих шагов [7–9]:

1. Определяется относительный порядок системы:

$$L_g L_f^0 h(\mathbf{X}) = L_g h(\mathbf{X}) = \frac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} g(\mathbf{X}) =$$

$$= \begin{bmatrix} \dfrac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \dfrac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dfrac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{L} \end{bmatrix} = 0;$$

$$L_g L_f^1 h(\mathbf{X}) = L_g\left(\frac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} f(\mathbf{X})\right) =$$

$$= L_g\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ g - \dfrac{k}{m}\left(\dfrac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ -\dfrac{R}{L}x_3 \end{bmatrix}\right) =$$

$$= L_g\left[x_2\right] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} g(\mathbf{X}) = 0;$$

$$L_g L_f^2 h(\mathbf{X}) = L_g L_f\left(\frac{\partial h(\mathbf{X})}{\partial X} f(\mathbf{X})\right) = L_g L_f\left[x_2\right] =$$

$$= L_g\left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} f(\mathbf{X})\right) =$$

$$= L_g\left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ g - \dfrac{k}{m}\left(\dfrac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ -\dfrac{R}{L}x_3 \end{bmatrix}\right) = L_g\left[g - \frac{k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2\right] =$$

$$= \begin{bmatrix} 2\dfrac{k}{m}x_3^2 x_1^{-3} & 0 & -\dfrac{2k}{m}\left(\dfrac{x_3}{x_1^2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{L} \end{bmatrix} =$$

$$= -\frac{2k}{mL}\left(\frac{x_3}{x_1^2}\right) \neq 0.$$

Таким образом, система имеет относительный 3-й порядок.

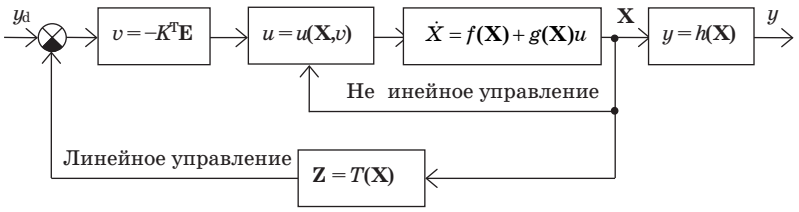


Рис. 2. Контур системы управления при линеаризации обратной связью

2. Выполняется преобразование координат:

$$\mathbf{Z}=\begin{bmatrix}z_1\\z_2\\z_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_f^0h(\mathbf{X})\\L_f^1h(\mathbf{X})\\L_f^2h(\mathbf{X})\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}h(\mathbf{X})\\\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_2\\g-\frac{k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2\\-\frac{R}{L}x_3\end{bmatrix}\\\begin{bmatrix}0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_2\\g-\frac{k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2\\-\frac{R}{L}x_3\end{bmatrix}\end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\g-\frac{k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2\end{bmatrix}.$$

3. Система линеаризуется к виду:

$$\begin{bmatrix}\dot{z}_1\\\dot{z}_2\\\dot{z}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_1\\z_2\\z_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}v; \qquad (8)$$

$$y=\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_1\\z_2\\z_3\end{bmatrix};$$

$$v=-KZ=-k_1z_1-k_2z_2-k_3z_3,$$

где вектор K может быть определен с помощью процедуры модального синтеза.

4. Вычисляем синтетическое управление:

$$\alpha(\mathbf{X})=L_f^3h(\mathbf{X})=L_fL_f^2h(\mathbf{X})=$$

$$=L_f\begin{bmatrix}\frac{k}{m}\left(\frac{x_3^2}{x_1^3}\right)&0&-\frac{2k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1^2}\right)\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}x_2\\g-\frac{k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2\\-\frac{R}{L}x_3\end{bmatrix}=\frac{k}{m}\left(\frac{x_3^2x_2}{x_1^3}\right)+\frac{2k}{m}\left(\frac{x_3^2}{x_1^2}\right)\frac{R}{L};$$

$$\beta(\mathbf{X})=L_g\left(L_f^2h(\mathbf{X})\right)=\begin{bmatrix}\frac{k}{m}\left(\frac{x_3^2}{x_1^3}\right)&0&-\frac{2k}{m}\left(\frac{x_3}{x_1^2}\right)\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}0\\0\\\frac{1}{L}\end{bmatrix}=-\frac{2k}{Lm}\left(\frac{x_3}{x_1^2}\right);\ u=\frac{\alpha(\mathbf{X})+v}{\beta(\mathbf{X})}.$$

5. Для обеспечения заданной траектории движения объекта $y_d(t)$ рассматривается ошибка

$$e(t)=z(t)-y_d(t).$$

Линейный сигнал управления описывается в виде (обобщенный ПД-регулятор):

$$v=-k_1e-k_2\dot{e}-k_3\ddot{e}\ . \qquad (9)$$

Введем обозначение:

$$\mathbf{E}(t)=\begin{bmatrix}e(t)&\dot{e}(t)&\ddot{e}(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

Система управления приобретает вид, показанный на рис. 2.

В соответствии с (9) в данной задаче желаемая траектория должна быть дважды дифференцируемая во всех своих точках.

Моделирование магнитной левитации в MatLab

Рассмотрим моделирование работы системы управления магнитной левитацией в *MatLab Simulink* при следующих параметрах: $R=29$ Ом, $L=0{,}65$ Гн, $k=0{,}000124$, $m=0{,}003$ кг.

Уравнения (2)–(3) использовались для описания нелинейной динамики объекта.

Используя описание линейной системы (8), можно выбрать желаемое расположение полюсов замкнутой системы и рассчитать коэффициенты обратных связей по состоянию с помощью команд:

```
>> A = [0 1 0; 0 0 1; 0 0 0];
>> B = [0; 0; 1];
>> P = [-1 -2 -3];
>> K = acker (A, B, P)
K = 6 1  1  6.
```

На рис. 3 приведен переходный процесс при отработке системой сглаженного ступенчатого сигнала x^*. На рис. 4 показано изменение координат состояния системы.

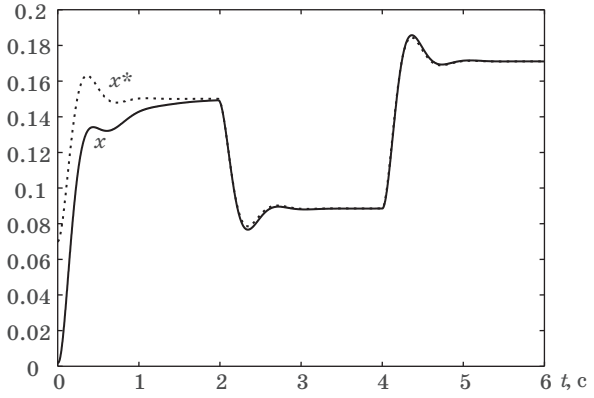


Рис. 3. Переходные процессы в системе магнитной левитации

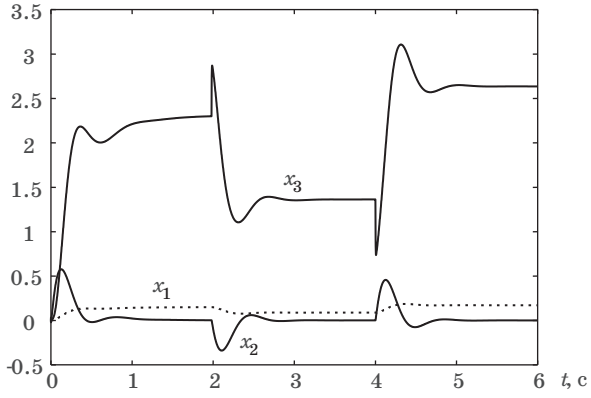


Рис. 4. Изменение переменных состояния во время переходного процесса

Заключение

Рассмотренная модель системы магнитной левитации относительно проста, однако ее существенная нелинейность требует использования соответствующих методов синтеза закона управления. Метод линеаризации обратной связью оказывается здесь достаточно эффективным инструментом, что подтверждают проведенные вычислительные эксперименты. Положение металлической сферы оказывается возможным изменять в достаточно широких пределах, при этом ток электромагнита не превышает допустимые значения. Недостатком этого подхода является необходимость вычисления 2-й производной задающего воздействия, что может быть затруднительно на практике.

Библиографический список

1. *Wong T.* Design of a magnetic levitation system, IEEE Transactions on Education. 1986. Vol. 29. P. 196–200.

2. *Yadav E., Choudhary S., Thirunavukarasu I.* Design and simulation of nonlinear control system for magnetic levitation of steel ball // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2 (8). **P.** 544–549.

3. *Kumar P., Minz S.* Control of Magnetic Levitation System Using PD and PID controller // International Journal of Scientific Research and Education. Vol. 4 (8) 2016. P. 5596–5602.

4. *Mustapha B., Jiya J.* Sliding mode control of a magnetic levitation system // International Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 6 (2). **P.** 14–17.

5. *Priyank J., Nigam M.* Design of a Hybrid Controller using Differential Evolution and MIT Rule for Magnetic Levitation System // International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET). 2014. Vol. 3 (1). P. 36–42.

6. *Yadav S., Tiwari J., Nagar S.* Digital Control of Magnetic Levitation System using Fuzzy Logic Controller // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 41 (21). P. 22–26.

7. *Slotine J., Li W.* Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

8. *Khalil H.* Nonlinear Systems, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.

9. *Бураков М. В.* Теория автоматического управления. Нелинейные системы. СПб.: ГУАП, 2018. 178 с.

УДК 62-52

А. Е. Городецкий*
доктор технических наук, профессор
В. Г. Курбанов*, *****
кандидат физико-математических наук, доцент
И. Л. Тарасова*, ******
кандидат технических наук, доцент
**Институт проблем машиноведения РАН*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
****Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ SEMS

Цель: постановка задачи ситуационного управления группой SEMS и анализ его принципов в условиях стохастичности и неполной определенности окружения выбора. Результаты: рассмотрена концепция ситуационного управления, получено обобщенное математическое описание его задачи групповой SEMS, проанализированы методология и различные подходы к организации ситуационного управления группой SEMS. Практическая значимость: показана возможность реализации предложенной математической постановки задачи ситуационного управления SEMS средствами вычислительной техники с параллельной организацией вычислений.

Ключевые слова: *ситуационное управление, группы SEMS, окружение выбора, детерминированные, стохастические и не полностью определенные ограничения, нечеткие математические модели, операции и алгоритмы поиска оптимальных решений.*

A. E. Gorodetskiy*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. G. Kurbanov*, ******
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
I. L. Tarasova*, ******
PhD Sc., Tech., Associate Professor
**Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
****National Research University St. Petersburg State Polytechnical University*

SITUATION CONTROL BY SEMS GROUP

Objective: statement of the task of situational control of the SEMS group and analysis of the principles of situational management in the conditions of stochasticity and incomplete definiteness of the environment of choice. Results: the concept of situational management was considered, a generalized mathematical description of the situation management problem of group SEMS was obtained, the methodology and various approaches to the organization of situational management of the SEMS group were analyzed. Practical significance: the possibility of implementing the proposed mathematical formulation of the problem of situational control of SEMS by means of computer technology with parallel organization of calculations is shown.

Keywords: *situational control, SEMS groups, selection environment, deterministic, stochastic and incompletely defined constraints, fuzzy mathematical models, operations and algorithms for finding optimal solutions.*

Введение

Ситуационное управление (от лат. *situatio* – положение) – это оперативное управление группой взаимодействующих динамических объектов, обладающих целесообразным поведением [1]. Такое управление заключается в принятии управленческих решений по мере возникновения проблем в соответствии с динамически изменяющимся окружением выбора [2]. Для этого нужен еще один уровень управления, который

являлся бы интерфейсом между группой и оператором, ставящим целевые задачи [3, 4], и который можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления [5, 6]. Причем оператором или лицом, принимающим решения (ЛПР), может быть не только человек, но и компьютерная программа, принимающая решения.

В работах [7–9], посвященных ситуационному управлению предприятиями и другими социально-экономическими объектами, под окружением выбора понимают управленческую ситуацию как конкретный набор обстоятельств, оказывающих существенное влияние на работу организации в данный момент. Д. Поспелов [5] расширяет понятие ситуации, добавляя в него информацию о связях между объектами, и говорит, что «текущая ситуация – совокупность всех сведений о структуре объекта и его функционировании в данный момент времени». Все сведения подразумевают также причинно-следственные связи, которые могут выражаться множеством последовательных событий или процессов. В этом смысле ситуация кардинально отличается от состояния и события, которые могут соответствовать только одному моменту времени.

При ситуационном управлении группой SEMS аналогично, как и для группы роботов, под окружением выбора или средой задачи управления можно понимать субъективную оценку конкретных характеристик SEMS и внешней среды (ситуационных переменных) и связей между ними, имеющих место в настоящее время, но зависящих от произошедших событий и развивающихся во времени и пространстве [10–14].

Создание и развитие систем ситуационного управления группой SEMS требует больших затрат ресурсов на сбор сведений об объектах и среде управления, их динамике, способах управления, а также на систематизацию этих сведений в рамках семиотической модели. Поэтому считается, что метод ситуационного управления целесообразно применять только в случаях, когда другие методы формализации приводят к задаче слишком большой (для практической реализации) размерности [15].

Концепция ситуационного управления

Концепцию ситуационного управления группой взаимодействующих динамических объектов можно свести к следующей системе основных положений:

– не существует какого-либо универсального подхода к управлению, так как оно зависит от конкретных проблемных ситуаций в окружении выбора, требующих различных подходов к их разрешению;

– ситуационные вероятностные и не полностью определенные факторы учитываются в стратегиях, структурах и методах управления, благодаря чему достигается эффективное принятие решений;

– существует более одного пути достижения цели управления, и необходим поиск оптимального пути;

– результаты принятия решений об управлении в одном и том же окружении выбора из-за его стохастичности и неполной определенности могут существенно отличаться друг от друга;

– всякое принятие решения об управлении должно рассматриваться только в тесной связи с другими проблемами взаимодействующих динамических объектов;

– лица, принимающие решения (компьютерные программы), могут адаптировать характеристики взаимодействующих динамических объектов к ситуации (окружению выбора) или изменять ее согласно требованию цели управления;

– лица, принимающие решения, должны иметь психологически комфортные условия взаимодействия с управляемыми динамическими объектами.

Таким образом, ситуационное управление – это прежде всего искусство лица, принимающего решения, правильно определить и оценить ситуацию и выбрать наиболее эффективные методы управления, наилучшим образом отвечающие возникшей ситуации и целям управления. При этом процесс управления должен состоять из следующих обязательных шагов, которые должны быть осуществлены системой управления для достижения эффективного управления в каждой конкретной ситуации:

– создание базы данных и базы знаний об окружающей среде и об объектах управления;

– идентификация и анализ ситуации в окружении выбора;

– выбор подхода и методов оптимального управления в сложившейся ситуации;

– оценка вероятных последствий ситуационного управления;

– создание необходимых условий для проведения изменений в динамическом пространстве конфигураций управляемых взаимодействующих динамических объектов;

– выработка управляющих воздействий для проведения требуемых для достижения целей управления изменений в динамических объектах.

При формализации окружения выбора или среды задачи ситуационного управления необходимо соблюдать следующие условия:

– окружение выбора должно содержать конечное количество факторов и описывать их состояние и взаимосвязи;

– окружение выбора должно содержать факторы, которые существенным образом влияют

на объекты управления, поскольку учесть влияние абсолютно всех факторов при принятии решения невозможно;

– окружение выбора должно содержать факторы, влияющие на взаимодействие объектов управления в группе;

– в окружении выбора необходимо учитывать причины и последствия возникновения возможных управленческих ситуаций.

Соблюдение последнего условия приводит к необходимости классификации управленческих ситуаций. Это обусловлена тем, что их распознавание составляет первый этап процесса разрешения ситуационных задач управления. К настоящему времени наработано большое количество классификаций управленческих ситуаций, отличающихся классификационными признаками и глубиной декомпозиции. В качестве базовой для анализа и разрешения управленческих ситуаций может быть использована модель, основанная на учете ряда источников управленческих ситуаций в окружении выбора группы роботов, рассмотрении их содержательных характеристик и использовании известных стратегий разрешения ситуаций для управления группой SEMS. При этом нужно выделить следующие основные типы ограничений:

– технологические, которые определяются типом и гибкостью взаимодействующих SEMS;

– интеллектуальные, отражающие уровни компетентности материального обеспечения управляющих вычислительных систем, принимающих решения с учетом изменений окружения выбора;

– ограничения в постановке задачи, обусловленные фактическим характером работ, выполняемых группой взаимодействующих SEMS.

Принципы ситуационного управления группой SEMS

При любом подходе к организации ситуационного управления группой SEMS необходим сбор информации о параметрах окружающей среды, о текущем состоянии отдельных SEMS группы, о планируемых действиях членов группы и др. После сбора информации в общем случае создается модель окружения выбора $O(t_k)$. Тогда планирование ситуационного управления группой SEMS будет заключаться в:

– разделении групповой задачи на подзадачи:

$$O(t_0) \underset{U(t_1)}{\Rightarrow} O(t_1) \dots O(t_0) \underset{U(t_f)}{\Rightarrow} O(t_f),$$

где $U(t_k) = \left\{u_{a_1}(t_k), u_{a_2}(t_k), \dots, u_{a_n}(t_k)\right\}$; $u_{a_i}(t_k)$ – управляющее воздействие, подаваемое на a_i SEMS в момент времени t_k, $k = 0,1,\dots f$;

– распределении между SEMS группы решений подзадач так, чтобы решение групповой задачи осуществлялось за минимальное время с учетом имеющихся ограничений, в том числе и на информационное взаимодействие.

В общем виде решением групповой задачи ситуационного управления будет синтез алгоритма поиска, то есть упорядоченного множества $\varpi \subset \Omega$ из множества альтернативных комбинаций управлений $U(t_k)$ лучших сочетаний законов управления каждого члена группы SEMS$\in U(t_k)$ на основе оценок качества Q, построенных с учетом системы предпочтений E и окружения выбора $O(t_k)$.

$$\varpi \subset 2^U \text{ x } Q^U,$$

где 2^U обозначает множество всех подмножеств U; Q^U – множество всех оценок качества (кортежей длиной от 2 до $|U|$); x – знак Декартова произведения.

Для принятия максимально эффективных решений в данной ситуации в окружении выбора $O(t_k)$ и проведения соответствующих изменений в группе взаимодействующих SEMS наилучшим образом лица (управляющие компьютерные программы), принимающие решения, должны иметь определенные принципы или правила, содержащие основополагающие требования к эффективному управлению, важнейшими из которых являются:

– компетентность, то есть корректное использование математического аппарата при формализации окружения выбора и полнота информации о текущем состоянии объектов управления и окружающей среды;

– способность к принятию решений в отсутствии прецедентов, когда ни одна управленческая ситуация, какой бы стандартной она ни казалась, не может быть абсолютно похожей ни на одну ситуацию, которая имела место в прошлом;

– наличие взаимосвязи ситуационных переменных, когда все факторы ситуации составляют единое целое, некую систему и поэтому так или иначе влияют друг на друга;

– наличие двойственного влияния факторов, когда ситуационные факторы обладают разными, порой даже противоречивыми характеристиками;

– непрерывность изменений, когда изменения в объектах управления и их внешнем окружении, так или иначе, происходят постоянно;

– необратимость изменений, когда всякое управляющее воздействие ставит группу SEMS на новую стадию изменения пространства конфигураций;

– возможность быстрой реакции, когда постоянное изменение ситуационных переменных требует непрерывной выработки управленческих решений, направленных на адаптацию группы SEMS к этим изменениям;

– наличия предпосылок к изменениям, когда наряду с постоянным мониторингом происходящих изменений нужно непрерывно контролировать наличие предпосылок и условий, необходимых для приведения параметров группы SEMS в соответствие с изменившейся ситуацией;

– соблюдение оптимального соотношения результатов и затрат при формировании критериев оптимальности при наибольшем приближение группы SEMS к поставленным целям;

– возможность априорного решения, которая позволяет не только правильно оценивать ситуацию и своевременно реагировать на ее изменение, но и предвидеть ее возможные изменения;

– возможность при принятии решений не только формирования изменений в группе SEMS при изменении ситуации, но и частичной адаптации самих окружений выбора к целям управления;

– соблюдение психологической комфортности взаимодействия лица, принимающего решения, с управляемыми SEMS.

Желательно, чтобы все изложенные требования и принципы реализовывались при создании систем ситуационного управления во взаимодействии. Их сочетание зависит от конкретных задач, решаемых группой SEMS, состояния окружения выбора, аппаратно-программного обеспечения системы ситуационного управления и некоторых других факторов. Для реализации этих принципов выработаны определенные методы (инструментарий) ситуационного управления динамическими объектами [16], то есть совокупность приемов и способов воздействия на управляемые объекты для достижения поставленных целей.

Чаще всего в ситуационном управлении применяют методы системного и ситуационного анализа, факторного и кросс-факторного анализа, генетического анализа, метод диагностики, экспертно-аналитический метод, методы аналогий, морфологического анализа и декомпозиции, методы имитационного моделирования, теории игр и т. д. Однако наибольший эффект и качество управления достигаются в том случае, когда применяется система методов в комплексе, что позволяет увидеть объект управления со всех сторон и избежать просчетов.

Можно выделить следующие основные задачи, решаемые при создании систем ситуационного управления группой SEMS:

– разработка системы мониторинга возникновения критических ситуаций, требующих проведения ситуационного анализа;

– подбор, адаптация и разработка методов сбора, анализа и синтеза информации об окружении выбора;

– подбор методов статистического анализа данных;

– определение и формализация эталонных ситуаций для каждого окружения выбора;

– формирование и актуализация банка ситуаций;

– подготовка инструментария, включая математический аппарат для определения факторов, характеризующих развитие ситуации, и индексов оценки их состояния;

– определение и актуализация факторов, характеризующих состояние ситуации, оценка их сравнительной важности, разработка индексов состояния ситуации;

– подбор и адаптация методов формирования оценочных систем;

– разработка сценариев возможного развития ситуаций, включая содержательное описание и определение перечня наиболее вероятных сценариев (вариантов) развития ситуаций, формирование перечня основных факторов, влияющих на него, выделение наиболее вероятных факторов, которые влияют на развитие ситуации, и отбрасывание тех, которые существенного влияния на изменение ситуации оказывать не могут;

– анализ вариантов развития ситуаций для выявления основных опасностей, угроз, рисков, сильных сторон, перспектив при развитии ситуации;

– разработка экспертного прогноза изменения факторов и индексов, характеризующих ситуацию, представленного в виде наиболее вероятных сценариев развития ситуации с оценкой устойчивости ситуаций для разработанных альтернативных сценариев их развития;

– оценка развития ситуации с точки зрения возможности достижения целей, стоящих перед группой SEMS;

– синтез альтернативные вариантов управленческих решений и управляющих воздействий для достижения целей, стоящих перед группой SEMS;

– выработка рекомендации по принятию стратегических и тактических решений в анализируемой ситуации; механизмам их выполнения; контролю за исполнением решений; сопровождению хода реализации принимаемых решений; анализу результатов, включающему оценку эффективности принятых решений и их выполнения;

– разработка методов отбора наиболее продуктивных решений по ситуационному управлению группой SEMS в условиях неполной определенности;

– разработка интерфейсов между лицом, принимающим решение (ЛПР), и группой SEMS, обеспечивающих психологически комфортные условия взаимодействия.

При разработке интерфейсов между ЛПР и SEMS одной из основных задач является уста-

новление психологически комфортных условий взаимодействия ЛПР с группой управляемых SEMS. Этому вопросу в последнее время уделяется большое внимание. В частности, в [17] анализируются способы оценивания успешности диалога, а также средства регистрации и анализа предпочтений ЛПР, которые требуются для настройки интерфейсов ЛПР и интеллектуальных роботов, и делается вывод о необходимости учета психологических аспектов их взаимодействия. В [18] отмечается потребность в оборудовании роботов средствами, которые помогли бы ему реагировать на быстрое «принятие решения», исключить выбор плохого решения и действовать таким образом, чтобы максимально увеличить безопасность людей, тем самым повышая доверие человека к робототехнической системе. В [19] предлагается подход к управлению поведением роботов, основанный на механизме эмоций и темперамента. Продемонстрировано, что эти психологические особенности могут быть смоделированы достаточно простыми способами. В основе предлагаемой эмоциональной архитектуры системы управления роботом лежит Информационная теория эмоций В. П. Симонова, а особенности темперамента сводятся к двухпараметрической модели типа «возбуждение – торможение». Описан ряд экспериментов, проведенных на базе мобильных роботов. Эти эксперименты демонстрируют набор различных типов поведения роботов: меланхолического, холерического, сангвинического и флегматического. Все эти типы были реализованы с использованием так называемого регулятора темперамента, определяющего баланс между величинами параметров возбуждения и торможения системы управления робота. В работе также предлагается автоматная модель темперамента, позволяющая описывать поведение индивидуума. На основе этой модели показано, что при решении некоторых задач коллективного поведения целесообразно иметь в составе группы индивидуумов с разным поведением, причем это поведение также определяется индивидуальными эмоциями и темпераментом робота.

Методология ситуационного управления группой SEMS

Ситуационное управление группой SEMS использует метод управления сложными техническими и организационными системами, основанный на идеях теории искусственного интеллекта и представлении знаний об объектах управления, способах управления им и окружении выбора на уровне логико-интервальных, логико-вероятностных и логико-лингвистических моделей, использовании обучения в качестве основных шагов при построении процедур управления по текущим ситуациям и использовании дедуктивных систем для построения многошаговых решений [20].

Решения задачи ситуационного управления группой SEMS можно представить в виде следующей последовательности операций (см. рис. 1):

1. Формализатор на основе собранной с помощью сенсоров центральной нервной системы SEMS в базе данных и знаний сведений о ситуации, сложившейся в текущем окружении выбора динамических объектов, управления создает ее математическое описание, которое подается на вход Анализатора.

2. Анализатор оценивает поступившее сообщение и определяет необходимость вмешательства системы управления в процесс, протекающий в объектах управления. Если текущая ситуация не требует такого вмешательства, то Анализатор не передает ее на дальнейшую обработку. В противном случае описание текущей ситуации поступает в Классификатор.

3. Классификатор, используя информацию, хранящуюся в нем, относит ситуацию к одному или нескольким классам, которым соответствуют одношаговые решения, и передает эту информацию в Коррелятор.

4. В Коррелляторе хранятся все правила преобразования группы SEMS в различных ситуациях, которые называются логико-трансформационными правилами (ЛТП), или корреляционными правилами. Полный список ЛТП определяет возможности системы ситуационного управления воздействовать на объекты управления для решения поставленной задачи.

5. Коррелятор определяет то ЛТП, которое должно быть использовано. Если такое правило единственное, то оно выдается для исполнения. Если же таких правил несколько, то выбор лучшего из них производится после обработки предварительных решений в Экстраполяторе, а затем Коррелятор выдает решение о воздействии на объект.

6. Если Коррелятор или Классификатор не могут принять решения по поступившему описанию текущей ситуации, то срабатывает Блок случайного выбора и выбирается одно из воздействий, оказывающих не слишком большое влияние на объекты, или же система отказывается от какого-либо воздействия на объекты. Это говорит о том, что система управления не располагает необходимой информацией о своем поведении в данной ситуации.

При решении задач ситуационного управления часто используется построение ситуационных моделей (имитирующих процессы, протекающие в объектах управления и управляющей системе) на базе следующих основных операций:

1) создание баз данных и знаний о среде, объектах управления и управляющей системы в памяти ЭВМ;

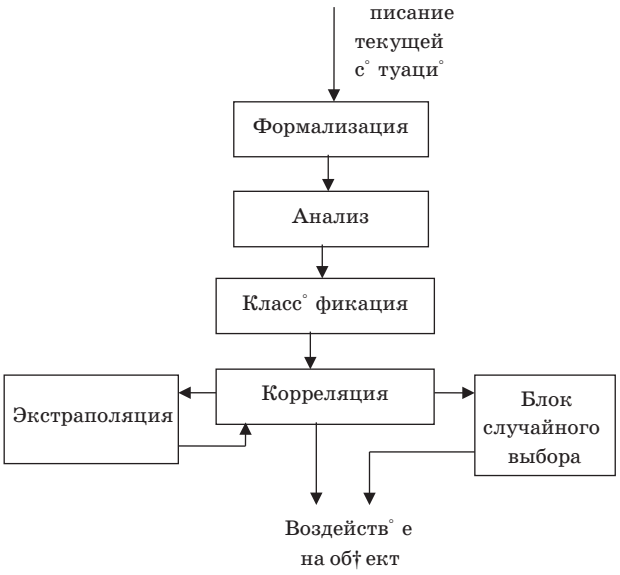


Рис. 1. Схема решения задачи ситуационного управления

2) построение моделей объектов управления, окружения выбора и управляющей системы;

3) описание состояний объектов и окружения выбора в классе семиотических моделей;

4) формирование иерархической системы обобщенных описаний состояний объектов управления и окружения выбора;

5) классификация состояний (ситуаций) для вывода возможных решений;

6) прогнозирование последствий принимаемых решений;

7) обучение и самообучение.

Необходимость операции 1 обусловливается потребностью включения ЭВМ в контур управления на возможно более ранних этапах оценки и поиска управляющего воздействия для повышения эффективности деятельности ЛПР. Данная операция обеспечивает представление данных и знаний в системе управления и их накопление в процессе функционирования системы для построения моделей и использование их для решения задач управления.

Содержание операции 3, дополняющего вторую, состоит в том, что представление всех необходимых моделей осуществляется с помощью элементов того языка, на котором ЛПР описывает систему управления и ее функционирование. Обычно ЛПР в системах ситуационного управления использует семантику, например семантические сети в виде графа, узлы которого соответствуют понятиям и объектам, а дуги отношениям между объектами.

Отличие семиотических систем от формальных состоит в том, что они:

– имеют отсутствующее в формальных системах множество знаков, обладающих, в частности, планами выражения (синтаксисом) и содержания (семантикой);

– могут самостоятельно изменять свой синтаксис и семантику;

– являются открытыми, а не замкнутыми.

Основные этапы работы системы на основе ситуационных моделей включают:

– получение описания текущей ситуации, имеющейся на анализируемых объектах управления и окружении выбора;

– пополнение микроописания ситуации;

– классификацию ситуации и выявление классов возможных решений по используемым системой оценкам;

– вывод допустимых значений оценок (при этом происходит обратное движение по иерархическим уровням представления знаний ситуационной модели);

– прогнозирование последствий принятия допустимых решений в качестве окончательных значений оценок;

– принятие решения по оценкам.

Заключение

Проблема поиска оптимального алгоритма ситуационного управления возникает всегда, когда необходимо, чтобы некоторая группа SEMS совместными усилиями выполняла некоторую работу.

Естественное ограничение на время оптимального принятия решения по ситуационному управлению группой SEMS в режиме реального времени накладывает ограничения на число членов управляемой группы и расстояния между ними, связанные с динамикой окружения выбора и динамикой управляемости самих SEMS.

Значительно облегчить и ускорить планирование ситуационного управления группой SEMS позволяет классификация ситуаций, которая состоит в отнесении текущей ситуации к одному или нескольким классам, соответствующим некоторому управлению. Если полученное решение задачи классификации единственно и выбранный класс ситуаций требует некоторого определенного воздействия на объекты, то на объекты подаются связанные с этим классом управления. При этом должна соблюдаться одна из предпосылок эффективного применения ситуационного подхода: количество возможных управляющих решений существенно меньше количества возможных ситуаций [5]. В противном случае требуется решение задачи анализа текущей ситуации в окружении выбора $O(tk)$, которая превращается в задачу оценки предшествующего управления с целью принятия решения об изменении плана ситуационного управления. Корректировка плана ситуационного управления на каждом последующем шаге не обязательно приводит к построению оптимального плана,

так как в совокупности выбранный пошаговый путь к цели не будет гарантированно оптимальным (процесс управления может быть не Марковским). Поэтому необходимо перед принятием решения о плане ситуационного управления провести моделирование управления группой SEMS, например на основе нечеткого математического моделирования плохо формализуемых процессов и систем [20], которое позволяет при пошаговом построении пути возвращаться назад и отбрасывать неэффективные участки пути. Естественно, такой поиск оптимального плана ситуационного управления на основе моделирования требует от системы управления дополнительных вычислительных мощностей и затрат времени. Существенный прогресс в этом направлении может обеспечивать распараллеливание вычислений, то есть одновременный проход всех возможных путей плана ситуационного управления с последующим принятием решения об оптимальности.

Библиографический список

1. *Gorodetskiy A., Tarasova I.* Situational Control a Group of Robots Based on SEMS // Smart Electromechanical Systems. Group. Interaction. / Springer International Publishing. 2019. 337 p. DOI 10.1007/978-3-319-99759-9-2.

2. *Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.* Принятие решений в центральной нервной системе робота // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1. С. 21–29.

3. *Воробьев В. В.* Логический вывод и элементы планирования действий в группах роботов // Тр. 16-й национальной конференции по искусственному интеллекту. 2018. Т. 1. С. 88–96.

4. *Иванов Д. Я., Шабанов В. Б.* Модель применения коалиций интеллектуальных мобильных роботов при ограниченных коммуникациях // Тр. 16-й национальной конференции по искусственному интеллекту. 2018. Т. 1. С. 97–105.

5. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 286 с.

6. *Кунг Дж., О'Донелли С.* Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций. М.: Прогресс, 2002. 588 с.

7. *Sokolov B., Ivanov D., Fridman A.* Situational Modelling for Structural Dynamics Control of Industry-Business Processes and Supply Chains // Intelligent Systems: From Theory to Practice / V. Sgurev, M. Hadjiski, J. Kacprzyk (eds.). London: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. P. 279–308.

8. *Фридман А. Я.* Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Саарбрюккен, 2015. 530 с.

9. *Мишин С. П.* Оптимальные иерархии управления в экономических системах. М.: ПМСОФТ, 2004. 115 с.

10. *Каляев И. А., Капустян С. Г., Гайдук А. Р.* Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: сб. трудов, 2010. С. 605–639.

11. *Гайдук А. Р., Каляев И. А., Капустян С. Г.* Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник ЮНЦ РАН. 2005. Т. 1. Вып. 2. С. 20–27.

12. *Капустян С. Г.* Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2006. № 2. С. 84–91.

13. *Каляев И. А.* Принципы коллективного принятия решения и управления при групповом взаимодействии роботов // Мобильные роботы и мехатронные системы: мат. научн. конф. М.: МГУ, 2000. С. 204–221.

14. *Капустян С. Г.* Метод организации мультиагентного взаимодействия в распределенных системах управления группой роботов при решении задачи покрытия площади // Искусственный интеллект. 2004. № 3. С. 715–727.

15. *Fridman A.* SEMS-Based Control in Locally Organized Hierarchical Structures of Robots Collectives / A. Gorodetskiy, V. Kurbanov (eds.) Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System, Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing Switzerland. 2017. Vol. 95. P. 31–47

16. Интеллектное управление динамическими системами: монография / Васильев С. Н., Жерлов А. К., Федосов Е. А. и др. М.: Физматлит, 2000. 352 с.

17. *Прищепа М. В.* Разработка профиля пользователя с учетом психологических аспектов взаимодействия человека с информационным мобильным роботом // Тр. СПИИ РАН. 21 (2012). С. 56–70.

18. *Ладыгина И. В.* Социально-этические проблемы робототехники // Вестник Вятского государственного университета. 2017. № 7. С. 27–31.

19. *Карпов В. Э.* Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 126–145.

20. *Городецкий А. Е., Тарасова И. Л.* Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. СПб.: Политехн. ун-т, 2010. 336 с.

УДК 629.7

Д. Ю. Ершов*
кандидат технических наук, доцент
И. Н. Лукьяненко**
кандидат технических наук, доцент
Е. Э. Аман**
ассистент
А. А. Тыртычный**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; Санкт-Петербургский горный университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

В статье рассматривается алгоритм расчета и имитационного моделирования инерциального датчика первичной информации с компенсирующим преобразователем магнитоэлектрического или электромагнитного типа. Рассмотрены вопросы динамических процессов, возникающих в микромеханических устройствах на примере датчика первичной информации при наступлении автоколебательных режимов. Приведены результаты имитационного моделирования основных режимов датчика первичной информации и их сравнение с математической моделью. Доказана адекватность проводимых научных исследований.

Ключевые слова: *микромеханика, планарные технологии, нанотехнологии, автоколебания электромеханических систем, акселерометр, датчик, компенсационный преобразователь, компенсационный метод, имитационное моделирование, динамика электромеханических систем, амплитудно-частотная характеристика, нелинейные механические системы.*

D. Y. Ershov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. N. Lukjanenko**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. E. Aman**
Assistant
A. A. Tyrtychny**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; St. Petersburg Mining University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ALGORYTHM FOR AUTO-OSCILLATING INERTIAL SENSOR PARAMETERS CALCULATION

The paper discusses algorithms for calculation and modeling of primary inertial sensor with magneto-electric or electro-magnetic compensatory converter. It studies the dynamic processes of auto-oscillating mode in primary inertial sensors as exemplary for Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS). The results of primary inertial sensor multiscale modeling are compared to its mathematical model proving the relevance of the study.

Keywords: *Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS), planar technologies, nanotechnologies, auto-oscillation in MEMS, accelerometer, sensor, compensatory converter, compensation, modeling, MEMS dynamics, amplitude-frequency, nonlinear mechanical system.*

Технические решения, определяемые концепцию построения микромеханических инерциальных датчиков первичной информации (ДПИ), оказывают существенное влияние на выбор типов и конструкций элементов приборов. В частности, минимизация массогабаритных

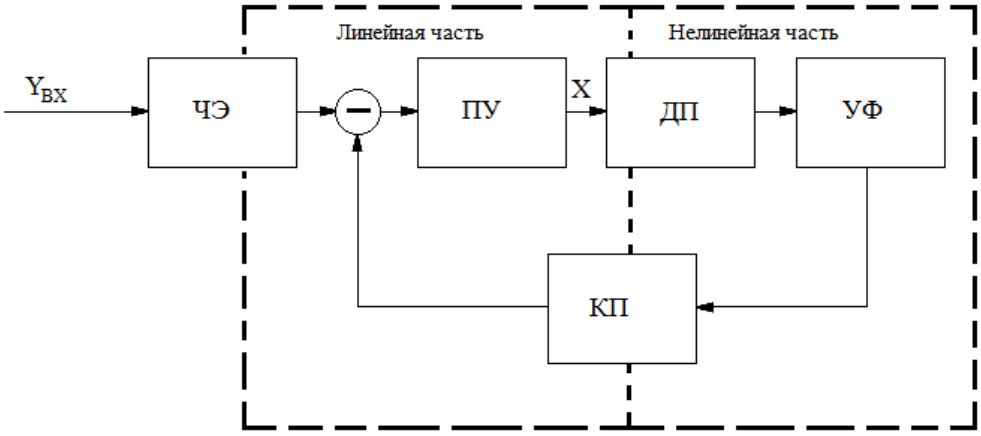


Рис. 1. Обобщенная структурная схема автоколебательного датчика

характеристик обеспечивается использованием планарных технологий, что в свою очередь делает наиболее целесообразным построение приборов на базе электростатических, оптоэлектронных, волоконно-оптических и других элементов, достаточно просто реализуемых в рамках указанных технологий. При этом очевидна тенденция к созданию электромеханических приборов компенсационного типа, поскольку компенсационный метод измерения обеспечивает высокую точность измерениях [1, 2, 3].

По результатам многочисленных разработок микромеханических инерциальных датчиков с емкостными преобразователями стали очевидны их принципиальные недостатки [4, 5]:

а) чрезмерная минимизация габаритов приборов привела к существенной потере их чувствительности к входному воздействию и увеличению влияния помех разного рода;

б) использование емкостных силовых преобразователей, имеющих исключительно малые силовые характеристики, приводит к необходимости использования резонансных режимов работы приборов, а также требует уменьшения массы чувствительных элементов. Более того, для обеспечения высокой добротности колебательной системы прибора необходимо осуществлять вакуумирование и герметизацию внутреннего объема датчика, что само по себе является достаточно сложной технологической операцией;

в) малость геометрических размеров подвижных чувствительных элементов приборов и их реакция на воздействия измеряемых физических величин в виде микро- и нанoперемещений, приводят к проблеме сверхточных измерений емкостей и их приращений.

Для существенного улучшения характеристик ДПИ необходим поиск принципиально новых схемотехнических и конструктивных решений, а не повторения уже реализованных схем и конструкций.

В связи с этим несомненно актуальными являются исследования, направленные на поиски путей построения датчиков с использованием новых физических принципов и эффектов, лежащих в основе работы приборов, дающих возможность повышения точностных характеристик и реализующих нетрадиционные решения в плане формирования цифрового сигнала на выходе приборов.

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема инерциального ДПИ, например акселерометра, с компенсирующим преобразователем (КП) магнитоэлектрического или электромагнитного типа [9]. Конструкция прибора может быть выполнена как с линейным перемещением инерционной массы (ИМ), которая обладает одной степенью свободы в направлении оси чувствительности [10, 11, 12], так и с ИМ в виде маятника с угловым перемещением вокруг оси, перпендикулярной плоскости движения маятника [13].

Для акселерометра ИМ является чувствительным элементом, обеспечивающим взаимодействие датчика с измеряемой физической величиной $Y_{вх}$ (процессом), и формирует входное воздействие $F_{вх}$, прикладываемое к подвижному узлу (ПУ). Силовая обратная связь создает компенсирующее воздействие $F_{кп}$, которое из-за наличия релейного элемента, формируемого на основе датчика положения (ДП) и усилителя-формирователя (УФ), имеет импульсную форму. Автоколебания ПУ поддерживаются поступлением энергии от источника тока (напряжения), которое является регулятором движения самой системы. При этом силы, создаваемые компенсирующим преобразователем (КП), будут иметь знакопеременный характер, вызывающий колебания ПУ.

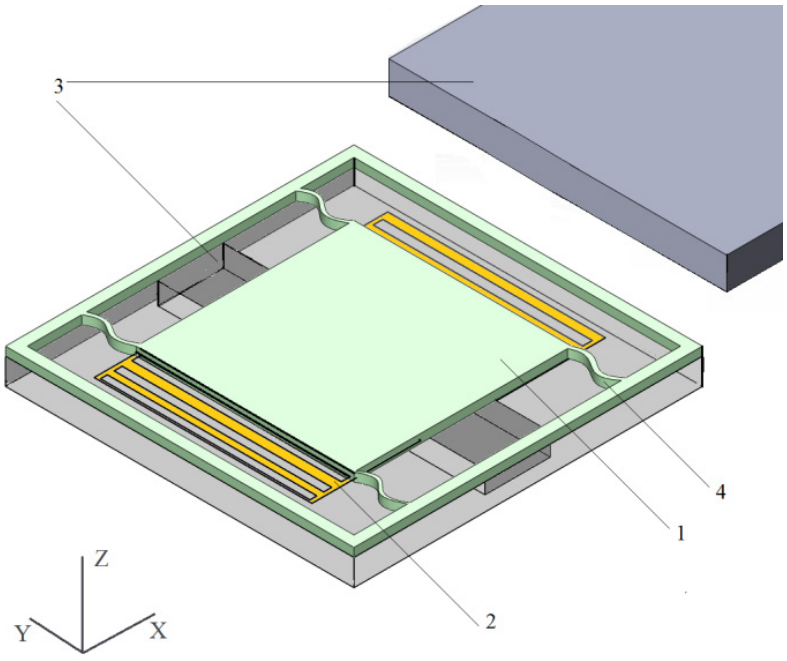


Рис. 2. Конструктивно-кинематическая схема «обращенного» ММА

Достаточно новыми являются конструкции ДПИ, в которых использованы компенсационные преобразователи магнитоэлектрического типа с плоской катушкой, размещенной на инерционной массе, и постоянным магнитом на корпусе. Анализ исследований показал, что такие микромеханические акселерометры (ММА) могут иметь достаточно высокие метрологические характеристики. Однако недостатком таких конструкций является необходимость подведения тока (напряжения) через торсионы к плоским катушкам [14]. Именно это обстоятельство и является идеей разработки принципиально новой для микромеханических приборов конструктивной схемы прибора, в которой компенсирующий преобразователь является «обращенным», то есть с магнитом на подвижной части и неподвижными плоскими катушками (токопроводящими дорожками), напыленными на основании и крышке ММА. На рис. 2 представлена конструктивно-кинематическая схема ММА «обращенной» схемы, где показаны инерционная масса (ИМ), выполненная из кремния с нанесенным покрытием из магнитотвердого материала (например, Sm-Co [5]) и представляющая собой постоянный магнит (1), плоские катушки с током (2), крышка и основание прибора с полюсными наконечниками, представляющие собой магнитопровод (3). Инерционная масса совершает автоколебания вдоль оси OX, размещенной на упругих подвесах (4).

Для возбуждения автоколебаний в контур прибора вводится нелинейное звено с известными статическими характеристиками. Эта нелинейность поглощает все остальные (часто неизвестные) нелинейности, которые могут быть как однозначными, так и двузначными (петлевыми), симметричными и несимметричными относительно начала координат [15].

В зависимости от реализуемой конструктивно-кинематической схемы набор элементов (звеньев) может быть различным. Однако рассматриваемая система может быть отнесена к нелинейным автоматических системам первого класса, собственное движение которых описывается дифференциальным уравнением вида [16]:

$$Q(p) + R(p)\Phi(x, px) = 0, \qquad (1)$$

где $Q(p)$ и $R(p)$ – операторные многочлены с вещественными постоянными коэффициентами $\Phi(x, px)$.

Наличие периодического движения ПУ дает возможность использовать для оценивания характеристик системы метод гармонической линеаризации, который позволяет представить нелинейную функцию в виде:

$$\Phi(x, px) = qx + q'px, \qquad (2)$$

где q и q' – коэффициенты гармонической линеаризации, зависящие от вида нелинейности.

В общем случае уравнение, описывающее движение ПУ, будет иметь вид:

а) при линейном перемещении

$$m\ddot{x} + \mu_x\dot{x} + c_x x = F(x); \qquad (3)$$

б) при угловом перемещении

$$J\phi'' + \mu\phi' + c\phi = M(\phi), \qquad (4)$$

где m – масса; J – момент инерции; μ – коэффициент демпфирования; c – коэффициент жесткости упругих подвесов.

Оба приведенных уравнения можно представить в виде:

$$(T_1{}^2p^2 + 2\xi T_1 p + 1)x = F(x),$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_x}}, \quad \left(T_1 - \sqrt{\frac{J}{c_\phi}}\right);$$

$$F(x) = \frac{k_{КП}}{T_2 p + 1} U_{КП}(x),$$

а $k_{КП}$ – коэффициент преобразования компенсирующего преобразователя (в скобках приведены выражения для углового движения ПУ).

Несмотря на приближенность метода гармонической линеаризации, он дает приемлемые для практических целей результаты применительно ко многим типам нелинейных систем, позволяя в удобной и наглядной форме решать задачи анализа и синтеза, определять непосредственные зависимости между основными характеристиками процессов и параметрами систем. Существенным достоинством метода является то, что при его использовании не приходится решать исходные нелинейные уравнения для определения динамики процессов во времени, поскольку искомые результаты находятся путем составления алгебраических уравнений, связывающих непосредственно параметры систем с такими общими показателями процессов, как амплитуда и частота колебаний.

Метод гармонической линеаризации особенно удобен для исследований автоколебательных систем, поскольку физические предпосылки, заложенные в основу метода, базируются именно на наличии периодического сигнала на входе нелинейной части системы.

Таким образом, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$[(T_2 p + 1)(-T_1{}^2p^2 + 2\xi T_1 p + 1) + \\ + k_{ДС}(q + q'p)]x = 0, \qquad (5)$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_x}}, \quad \xi = \frac{\mu_x}{2\sqrt{mc_x}}, \quad k_{ДС} = \frac{F_a}{U_{ДС_m}} = 0{,}00092\ \frac{\text{Н}}{\text{В}}.$$

Постоянная времени T_2 может быть рассчитана следующим образом:

$$T_2 = L/R,$$

где L – индуктивность; R – сопротивление обмотки КП.

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (n \cdot l + 2b_0) \cdot \left(\ln\frac{4l}{b} - 0{,}75\right).$$

Как уже указывалось выше, для возбуждения устойчивых автоколебаний в контур прибора вводится нелинейное звено с известной характеристикой преобразования. Пример такого звена показан на рис. 3.

На этапе предварительного анализа или синтеза системы весьма удобно использовать частотный способ определения параметров периодического решения, основанный на исследовании амплитудно-фазовой частотной характеристики и амплитудной характеристики системы, которые определяются соотношением:

$$W(i\Omega) = W_л(i\Omega)W_н(A).$$

Наличие в характеристическом уравнении замкнутой системы пары чисто мнимых корней по критерию устойчивости Найквиста соответствует прохождению системы через точку (-1, 0). Следовательно, периодическое решение определяется равенством:

$$W_л(i\Omega)W_н(A) = -1.$$

Амплитудно-частотная характеристика (АФХ) системы может быть получена на основе (1) и (2).

$$W_л(i\Omega) = -\frac{1}{W_н(A)}. \qquad (6)$$

АФХ линейной части системы имеет вид:

$$W_л(i\Omega) = \frac{k_{ДС}}{(T_2 i\Omega + 1)(-m\Omega^2 + \mu_x i\Omega + c_x)}.$$

Амплитудная характеристика (АХ) нелинейной части системы имеет вид:

$$W_н(A) = q + jq'.$$

Для нелинейной функции, приведенной на рис. 3, коэффициенты гармонической линеаризации имеют вид:

$$q = \frac{1}{\pi A}\int_0^{2\pi} F(A\sin\Omega)\sin\Omega d\Omega = \frac{4U_{дс}}{\pi A}\sqrt{1 - \frac{x_m^2}{A^2}}; \quad (7)$$

$$q' = \frac{1}{\pi A}\int_0^{2\pi} F(A\sin\Omega)\cos\Omega d\Omega = -\frac{4U_{дс}x_m}{\pi A}. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что коэфициенты q и q' могут зависеть от амплитуды A и частоты Ω искомого решения, но в тоже время они являются постоянными величинами, поскольку рассматривается именно периодическое решение.

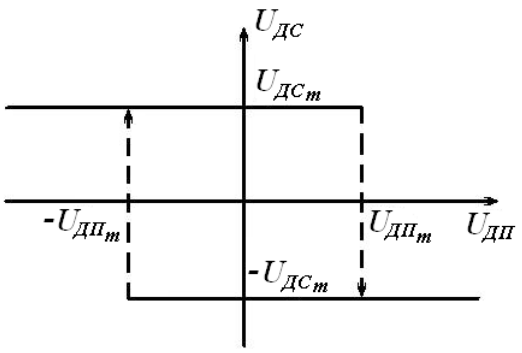


Рис. 3. Пример характеристики НРЗ

Таблица 1

Параметры ММА

Обозначение параметра	Значение параметра
Масса ИМ, m, кг	$4{,}15 \cdot 10^{-6}$
Сила Ампера, F_a, Н	0,37
Ширина гистерезисной петли, x_m, м	$40 \cdot 10^{-6}$
Величина напряжения, $U_{\text{пДС}}$, В	5
Постоянная времени магнитоэлектрического ДС, T_2, с	10^{-8}

В качестве апробации предлагаемого метода были проведены расчеты характеристик собственного движения ИМ акселерометра, параметры которого приведены в табл. 1.

Результаты расчета в виде графиков приведены на рис. 4.

Точка пересечения данных графиков определяет искомое решение:

а) значение циклической частоты Ω в данной точке;

б) значение амплитуды A. В приведенном примере эти значения равны: Ω = 2198 1/с = 350 Гц; $A = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$ м.

Результаты, полученные при графоаналитическом решении, (амплитуда и частота автоколебаний), становятся основой для дальнейшего исследования, так как опираясь на них можно подобрать значения коэффициентов жесткости и демпфирования, варьируя этими величинами при компьютерном моделировании с разными их значениями до получения требуемых частоты и амплитуды.

Имитационная модель автоколебательного ММА построена на основе уравнения (2) собственного движения ИМ.

Реакцией на измеряемое ускорение является изменение положения ИМ вдоль оси OX относительно корпуса прибора.

На подвижный узел ЧЭ данного устройства действует внешняя сила $F_{\text{возб}}(x)$, вызванная ускорением по оси OX прибора, что приводит к изменению положения ПУ. С датчиков положения, стоящих на оси возбуждения OX, сигнал поступает на нелинейное релейное звено (НРЗ), пример характеристики которого представлен на рис. 5. Это звено формируется на основе последовательно включенных компаратора и электронного ключевого устройства.

В автоколебательном ММА был использован магнитоэлектрический ДС, постоянная времени T_2 которого должна быть учтена. Данный ДС может быть описан как апериодическое звено первого порядка [17, 18].

Динамика системы и ее переходные функции могут быть исследованы с использованием имитационного моделирования.

Методом подбора коэффициентов при научных исследованиях удалось добиться частоты автоколебаний 350 Гц и амплитуды, равной $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ м, что совпадает со значениями, полученными при графоаналитическом методе, при этом значение коэффициента демпфирования оказалось равным $\mu_x = 8 \cdot 10^{-4}$ Н·с/м, а коэффициента жесткости подвесов $c_x = 5$ Н/м.

Собственная частота механической описанной системы и постоянная времени колебательного звена:

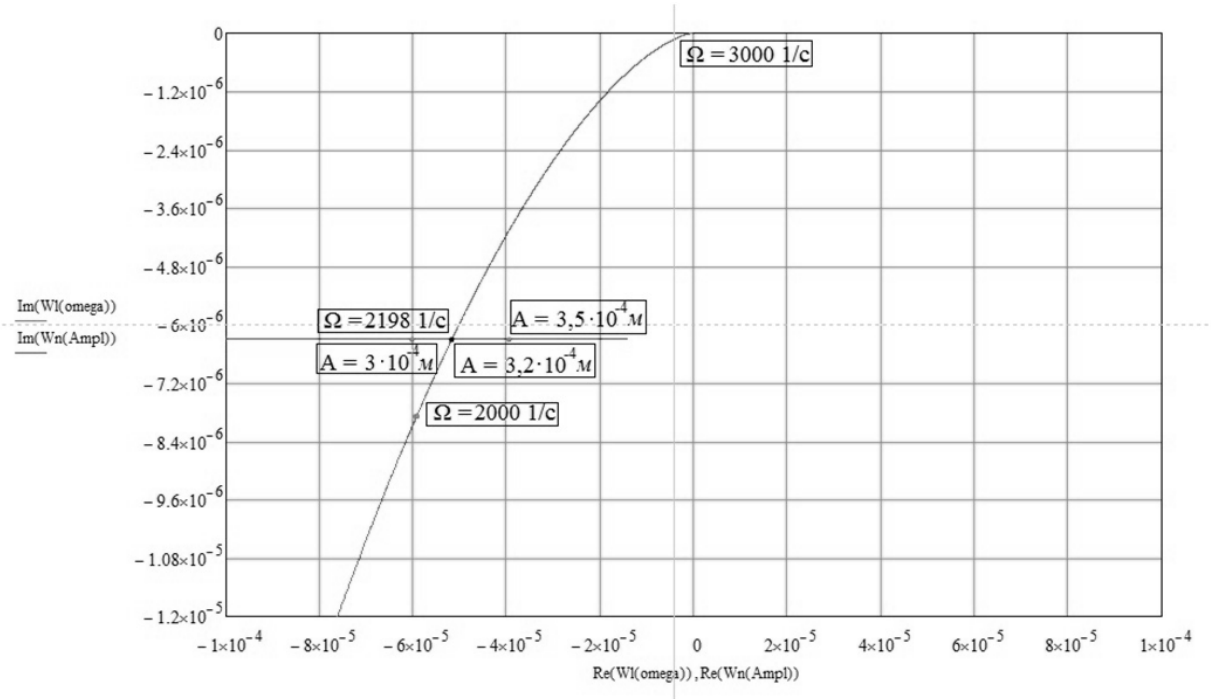


Рис. 4. Графики $W_l(i\Omega)$ и $W_n(A)$, отображенные на комплексной плоскости

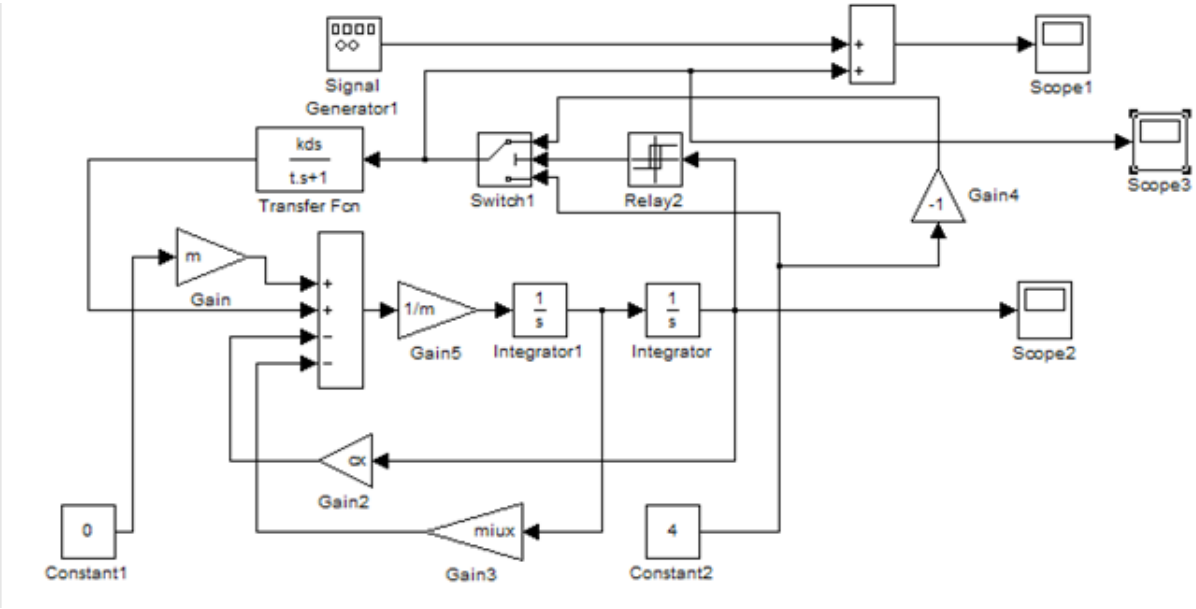


Рис. 5. Имитационная модель ММА

$$\nu_c = \sqrt{\frac{c}{m}} = 1097 \text{ Гц},$$

$$T_1 = 1/\nu_c = 10^{-3} \text{ с}.$$

Результаты проведенного моделирования проиллюстрированы следующими графиками (рис. 6–11):

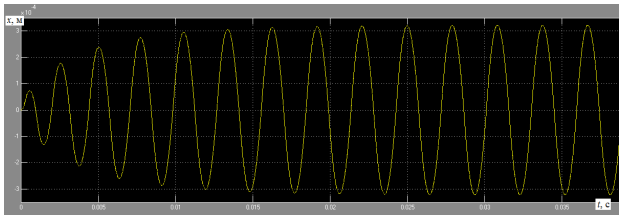


Рис. 6. Амплитуда колебаний ИМ при нулевом входном воздействии

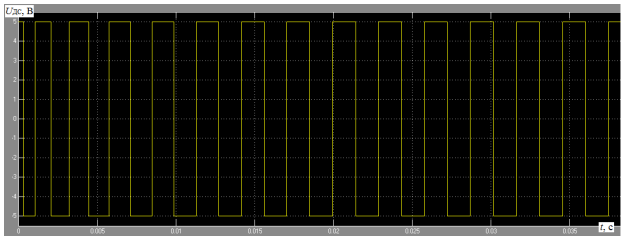


Рис. 7. Выходной сигнал при нулевом воздействии

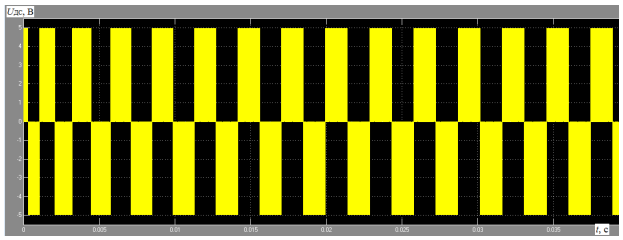


Рис. 8. Формирование импульсов при нулевом входном воздействии

Сравнивая графоаналитическое решение поставленной задачи с результатами проведенного имитационного моделирования в научно-исследовательской лаборатории университета, получен адекватный результат, доказывающий правильность разработанной методики оценивания

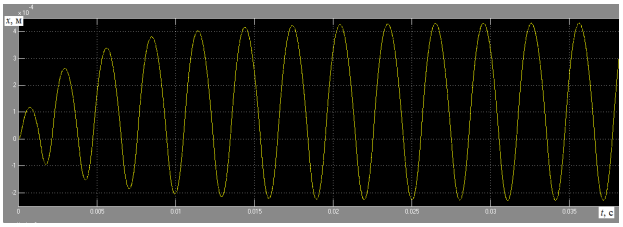


Рис. 9. Амплитуда колебаний ИМ при входном воздействии в 40g

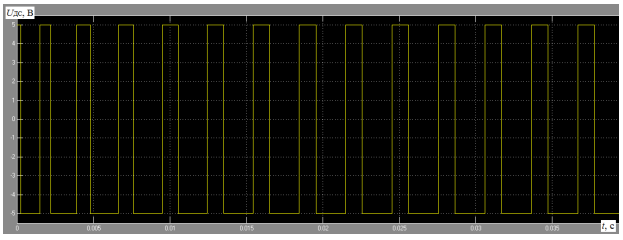


Рис. 10. Выходной сигнал при воздействии в 40g

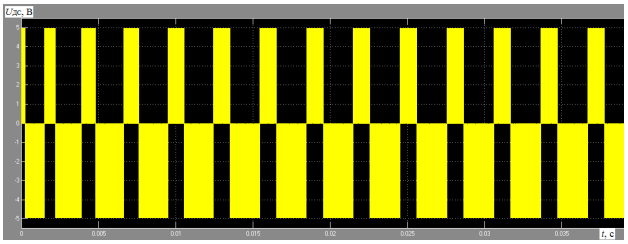


Рис. 11. Формирование импульсов при входном воздействии 40g

основных характеристик ДПИ, работающих в автоколебательных режимах с предлагаемой математической моделью.

Дальнейшая последовательность выполнения аналитического расчета и имитационного моделирования является закономерной в решении задач разработки нового микромеханического оборудования. В настоящее время определены некоторые параметры проектируемого устройства (его габаритные размеры, материалы изготовления отдельных элементов), что позволяет провести расчет силы тока в проводниках, индукции магнита и индукции в воздушном зазоре. Благодаря имитационному моделированию осуществляется подбор параметров для дальнейшего расчета.

Библиографический список

1. *Тыртычный А. А.* Разработка принципов построения и анализ характеристик автоколебательного микромеханического гироскопа: дис. канд. техн. наук. СПб.: ГУАП, 2014.

2. Разработка новых принципов построения микромеханических датчиков для систем навигации: отчет о НИР. Ч. 4 // Транспортные и космические системы. СПб., 2016. № 114103140061.

3. *Боднер В. А.* Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.

4. *Тыртычный А. А.* Анализ характеристик микромеханического гироскопа в режиме автоколебаний. СПб.: ГУАП, 2010.

5. *Скалон А. И., Аман Е. Э.* Расчет магнитоэлектрического преобразователя микромеханического акселерометра «обращенной» схемы // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Судометрика. СПб., 2016. С. 65–68.

6. *Thomas B., Nenad G.* Nenadic Electromechanics and MEMS. Cambridge University Press, 2013. 577 p.

7. *Новиков П. В., Новиков В. В., Шейпак А. А.* Интегрированная навигационная система наземного транспортного средства // Научная электронная библиотека, 2015. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25113509 (дата обращения: 20.11.2018).

8. *Чупрынин В. И.* Нелинейные процессы в природе, сопутствующие автоколебаниям // Научная электронная библиотека, 2015. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23145335 (дата обращения: 15.11.2018).

9. Structural, magnetic and magnetoelectric properties of the magnetoelectric composite material / D. Sapate, A. Kale, K. Pandit, M. Jadhav // Springer Link, 2014. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-014-1938-7 (дата обращения: 15.11.2018).

10. Линейный микроакселерометр: пат. 2410703 РФ. № 2009125120/28; заявл. 30.06.2009; опубл. 27.01.2011; бюл. № 3. 8 с.

11. Линейный микроакселерометр: пат. 2561303 С1 РФ. № 2014124052/28; заявл. 11.06.2014; опубл. 27.08.2015; бюл. № 24. 8 с.

12. *Браславский Д. А.* Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 391 с.

13. Угловой акселерометр: пат. 239915 С1 РФ. № 2009116309/28; заявл. 28.04.2009; опубл. 20.09.2010; бюл. № 26. 9 с.

14. Линейный акселерометр: пат. 2509307 С1 РФ. № 2012125448/28; заявл. 19.06.2012; опубл. 10.03.2014; бюл. № 7. 7 с.

15. *Пальтов И. П.* Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах. М.: Наука, 1975. 368 с.

16. *Пальтов И. П., Попов Е. П.* Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. М.: Физматгиз, 1960. 792 с.

17. *М. Я. Израилович, А. Н. Обухов, Р. Имаш.* Генерация устойчивых автоколебаний высокой интенсивности при наличии нелинейной упругости и двух источников возбуждения // Научная электронная библиотека, 2015. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=11618929 (дата обращения: 20.11.2018).

18. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

УДК 621.865.8+62-503.5

В. В. Жога*
доктор физико-математических наук, профессор
В. В. Дяшкин-Титов**
кандидат технических наук, доцент
И. А. Несмиянов**
доктор технических наук, профессор
А. В. Дяшкин**
кандидат технических наук, доцент
**Волгоградский государственный технический университет*
***Волгоградский государственный аграрный университет*

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ УСИЛИЙ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА

Формирование управляющих усилий исполнительных приводов манипулятора-трипода осуществляется методом решения обратной задачи динамики с использованием алгоритма управления по ускорению. Контуры управления исполнительными двигателями синтезируются в процессе построения алгоритма траекторного управления. Синтез алгоритма стабилизации программных перемещений захвата, заданных в параметрической форме, осуществляется по назначенной траектории с использованием сигналов датчиков обратной связи.

Ключевые слова: *манипулятор, параллельная структура, трипод, динамика, управляющие силы.*

V. V. Zhoga*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
V. V. Dyashkin-Titov**
PhD Sc., Tech., Associate Professor
I. A. Nesmiyanov**
Dr. Sc. Tech., Professor
A. V. Dyashkin**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Volgograd State Technical University*
***Volgograd State Agrarian University*

ALGORITHM TO SYNTHESIZE CONTROL FORCE FOR TRIPOD MANIPULATOR DRIVES

The control efforts of tripod manipulator actuators are generated by solving the inverse dynamics problem by means of an acceleration control algorithm. Actuator control loops are synthesized while algorithmizing the trajectory control. The algorithm to stabilize the programmed gripper motions as set in a parametric form is synthesized by the assigned trajectory using feedback sensor signals.

Keywords: *manipulator, parallel structure, tripod, dynamics, control forces.*

Описание объекта исследования

В последнее время большее внимания уделяется исследованиям механизмов параллельной структуры [1–4]. Кинематические схемы таких механизмов представляют собой структуры с замкнутым контуром, обладающие большой жесткостью и высокой точностью отработки программных перемещений [5–7]. Механизмы параллельной структуры находят применение в технологических процессах, когда требуется высокие скорость и ускорение при перемещении больших масс в ограниченной области рабочего пространства. При динамическом анализе манипуляторов решаются две задачи: прямая и обратная [8]. Обратная задача заключается в определении управляющих сигналов, обеспечивающих программное перемещение рабочего органа [9, 10]. Результаты решения служат для формирования структурной схемы системы управления [11].

Исполнительные линейные звенья манипулятора в точках A, B, C связаны с неподвижным

основанием двухподвижными шарнирами, а в точке M звенья связаны пятиподвижным сферическим шарнирным узлом [12]. Конструкция сферического шарнира обеспечивает пересечение геометрических осей исполнительных звеньев в точке. Поэтому внешняя нагрузка, приложенная в точке M, не вызывает изгибающих моментов в линейных звеньях. Все актуаторы снабжены встроенным аналоговым датчиком перемещения.

Геометрические параметры манипулятора: длины исполнительных звеньев $l_k(t)$; углы ϕ_k и δ_k, (k=1÷3), задающие ориентацию звеньев в пространстве, а также декартовые координаты захвата $x_M(t)$, $y_M(t)$, $z_M(t)$ относительно неподвижной системы координат $Oxyz$, которые описывают конфигурацию манипулятора в текущий момент времени. Три координаты являются независимыми.

Направляющие косинусы исполнительных звеньев относительно неподвижной координатной оси $Oxyz$ определяются выражениями

$$\alpha_{31k}=\sin\delta_k,\ \alpha_{32k}=-\cos\delta_k\sin\varphi_k,$$
$$\alpha_{33k}=\cos\delta_k\cos\varphi_k. \qquad (1)$$

Направляющие косинусы, выраженные через длины звеньев, координаты точек крепления на основании и координаты захвата, имеют вид:

– для первого звена

$$a_{311}=\frac{X_M}{l_1},a_{321}=\frac{y_M-OA}{l_1},a_{331}=\frac{z_M}{l_1}\ ; \qquad (2)$$

– для второго звена

$$a_{312}=\frac{X_M-OB}{l_2},a_{321}=\frac{y_M}{l_2},a_{331}=\frac{z_M}{l_2}\ ; \qquad (3)$$

– для третьего звена

$$a_{313}=\frac{X_M+OB}{l_3},a_{323}=\frac{y_M}{l_3},a_{331}=\frac{z_M}{l_3} \qquad (4)$$

На все координаты наложены девять голономных связей, которые формируются из выражений (1–4):

$$f_1=\phi_2-\phi_3=0,\ f_2=l_3\cos\delta_3-l_2\cos\delta_2=0,$$
$$f_3=l_1\cos\delta_1\cos\phi_1-l_2\cos\delta_2\cos\phi_2=0,$$
$$f_4=l_3\sin\delta_3-l_2\sin\delta_2-2OB=0,$$
$$f_5=l_1\sin\delta_1-l_2\sin\delta_2-OB=0,$$
$$f_6=l_1\cos\delta_1\sin\phi_1-l_2\cos\delta_2\sin\phi_2-OA=0$$
$$f_7=x_M-l_1\sin\delta_1=0,$$
$$f_8=y_M+l_2\cos\delta_2\sin\phi_2=0,$$
$$f_9=z_M-l_3\cos\delta_3\cos\phi_3=0. \qquad (5)$$

Математическая модель

Уравнения Лагранжа с дополнительными голономными связями [13]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial\dot q_S}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_S}=Q_S-\frac{\partial\Pi}{\partial q_S}+\sum_{i=1}^{9}\lambda_i\frac{\partial f_i}{\partial q_S},\ s=1\div12, \qquad (6)$$

где T – кинетическая энергия манипулятора; Q_s – обобщенная сила, соответствующая s координате; λ_i – множители Лагранжа; $-\partial\Pi/\partial q_S$ – обобщенная сила потенциальных сил.

Кинетическая энергия T складывается из кинетической энергии корпусов актуаторов T_k при их сферическом движении, кинетической энергии штоков при переносном движении вместе с корпусами и при прямолинейном поступательном движении относительно корпусов, а также кинетической энергии сферического шарнира T_4

$$T=\sum_{k=1}^{3}T_k+\sum_{k=1}^{3}T_{kr}+T_4.$$

Кинетическую энергию манипулятора выражаем через двенадцать обобщенных координат

$$T=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{3}\left[\begin{array}{c} m_{k2}\dot l_k^2+\left(\begin{array}{c} I_k+I_{kr}+\\ +m_{k2}\left(l_k(t)-0.5l_{k0}\right)^2\end{array}\right)\times\\ \times\left(\dot\delta_k^2+\dot\phi_k^2\cos^2\delta_k\right)\end{array}\right]+$$
$$+m_4\left(\dot x_M^2+\dot y_M^2+\dot z_M^2\right), \qquad (7)$$

где m_{k2} – масса штока k линейного звена; I_k, I_{kr} – момент инерции корпуса линейного звена относительно подвижных координатных осей и главный центральный момент инерции штока этого звена; m_4 – масса груза и пятиподвижного сферического шарнирного узла; l_{k0} – длина корпуса исполнительного звена.

Потенциальная энергия манипулятора имеет вид:

$$\Pi(q_k)=-m_4g\cdot z_M-$$
$$-\sum_{k=1}^{3}\left(0.5m_kl_{i0}+m_{k2}z_{ck}\right)g\cos\delta_k\cos\phi_k. \qquad (8)$$

Здесь m_k – масса исполнительного звена; штока исполнительного звена $z_{ck}=l_k$–$0,5l_{i0}$ – координата центра масс штока исполнительного звена.

Воспользовавшись (5), (7) и (8) из (6), получаем

$$\left(\ddot\delta_k+\phi_k^2\cos\delta_k\sin\delta_k\right)I_{ipr}+2m_{k2}\dot l_k\dot\delta_k\left(l_k-0.5l_{k0}\right)+$$
$$+\sum_{n=1}^{3}\left(0.5m_nl_{n0}+m_{n2}z_{ci}\right)g\sin\delta_n\cos\phi_n=b_k \qquad (9\text{-}11)$$

$$\left(\ddot\phi_k\cos^2\delta_k-2\dot\phi_k\dot\delta_k\cos\delta_k\sin\delta_k\right)I_{kpr}+$$
$$+2m_{k2}\dot l_k\dot\phi_k\cos^2\delta_k\left(l_k-0.5l_{k0}\right)^2+$$
$$+\sum_{n=1}^{n=3}\left(0.5m_nl_{n0}+m_{n2}z_{ci}\right)g\cos\delta_n\sin\phi_n=b_{k+3} \qquad (12\text{-}14)$$

$$m_4\ddot x_M=\lambda_7,m_4\ddot y_M=\lambda_8,m_4\ddot z_M-m_4g=\lambda_9 \qquad (15\text{-}17)$$

$$m_k\ddot l_k+0.5m_k\left(\dot\phi_k^2\cos^2\delta_k+\dot\delta_k^2\right)\left(l_{k0}-2l_k\right)-$$
$$-\sum_{k=1}^{3}m_{k2}g\cos\delta_k\cos\phi_k-F_k=b_{k+9}, \qquad (18\text{-}20)$$

где введены обозначения:

$$b_1 = -\lambda 3 l_1 \cos\phi_1 \sin\delta_1 + \lambda 5 l_1 \cos\delta_1 - \\ -\lambda_6 l_1 \sin\phi_1 \sin\delta_1 - \lambda_7 l_1 \cos\delta_1,$$

$$b_2 = \lambda_2 l_2 \sin\delta_2 + \lambda_3 l_2 \cos\phi_2 \sin\delta_2 - \\ -\lambda_4 l_2 \cos\delta_2 - \lambda_5 l_2 \cos\delta_2 + \\ +\lambda l_2 \sin\phi_2 \sin\delta_2 - \lambda_8 l_2 \sin\delta_2 \sin\phi_2,$$

$$b_3 = -\lambda_2 l_3 \sin\delta_3 + \lambda_4 l_3 \cos\delta_3 + \\ +\lambda_9 l_3 \sin\delta_3 \cos\phi_3,$$

$$b_4 = -\lambda_3 l_1 \cos\delta_1 \sin\phi_1 + \lambda_6 l_1 \cos\phi_1 \cos\delta_1,$$

$$b5 = \lambda_1 + \lambda_3 l_2 \cos\delta_2 \sin\phi_2 - \\ -\lambda_6 l_2 \cos\phi_2 \cos\delta_2 + \\ +\lambda 8 l2 \cos\delta_2 \cos\varphi_2,$$

$$b_6 = -\lambda_1 + \lambda_9 l_3 \cos\delta_3 \sin\phi_3,$$

$$b_7 = \lambda_7,\ b_8 = \lambda_8,\ b_9 = \lambda_9,$$

$$b_{10} = \lambda_3 \cos\varphi_1 \cos\delta_1 + \lambda_5 \sin\delta_1 + \\ +\lambda_6 \cos\delta_1 \sin\phi_1 - \lambda_7 \sin\delta_1,$$

$$b_{11} = -\lambda_2 \cos\delta_2 - \lambda_3 \cos\phi_2 \cos\delta_2 - \lambda_4 \sin\delta_2 - \\ -\lambda_5 \sin\delta_2 - \lambda_6 \cos\delta_2 \sin\phi_2 + \lambda_8 \cos\delta_2 \sin\phi_2,$$

$$b_{12} = \lambda_2 \cos\delta_3 + \lambda_4 \sin\delta_3 - \\ -\lambda_9 \cos\delta_3 \cos\phi_3,$$

$$I_{kpr} = I_k + I_{kr} + m_{k2}(l(t) - 0{,}5l)^2,\ k = 1-3.$$

Статическая характеристика приводного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид [14, 15]:

$$F_k = ru_k - s\dot{l}_k,\ k = 1-3, \qquad (21)$$

где r, s – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя и механической передачи; u_k – управляющее напряжение.

Система двадцати четырех уравнений (5), (9)–(20) и (21) для нахождения такого же количества неизвестных q_s (s=1–12), λ_i (i=1–9) и u_k (k=1–3) позволяет проводить динамические исследования манипуляторов [16–18].

3. Синтез алгоритма формирования управляющих сигналов

Так как уравнения (5) линейно независимые, а матрица, составленная из коэффициентов при множителях Лагранжа первых девяти уравнений (9)–(17), является транспонированной по отношению к подматрице 9×9 системы (5), то из этих уравнений можно выразить множители Лагранжа λ_i, i=1–9.

Воспользовавшись методом Крамера [19], решение линейной системы уравнений (9–17) получаем в виде:

$$\lambda_i\ (q_s, q_s, q_s) = \frac{D_i}{D},$$

где D – главный определитель системы (9–17); D_i – вспомогательный определитель, полученный из главного определителя D системы при замене его i-го столбца столбцом из свободных членов (левые части уравнений). Подставляя выражения λ_i в три остальных (18–20) и учитывая (21), находим явные зависимости ускорений исполнительных звеньев от обобщенных координат, скоростей, ускорений и управляющих напряжений выражения λ_i в три остальных (18–20); учитывая (21), находим явные зависимости ускорений исполнительных звеньев от обобщенных координат, скоростей, ускорений и управляющих напряжений:

$$m_1 \ddot{l}_1 = ru_1 - s\dot{l}_1 - 0.5m_1\left(\dot{\phi}_1^2 \cos^2\delta_1 + \dot{\delta}_1^2\right)\times \\ \times\left(l_{10} - 2l_1\right) + D_3/D\cos\phi_1\cos\delta_1 + D_5/D\sin\delta_1 + \\ +D_6/D\cos\delta_1\sin\phi_1 - D_7/D\sin\delta_1; \qquad (22)$$

$$m_2 \ddot{l}_2 = ru_2 s\dot{l}_2 - 0.5m_2\left(\dot{\phi}_2^2 \cos^2\delta_2 + \dot{\delta}_2^2\right)\times \\ \times\left(l_{20} - 2l_2\right) - D_2/D\cos\delta_2 - D_3/D\cos\phi_2\cos\delta_2 - \\ -D_4/D\sin\delta_2 - D_5/D\sin\delta_2 - D_6/D\cos\delta_2\sin\phi_2 + \\ +D_8/D\cos\delta_2\sin\phi_2; \qquad (23)$$

$$m_3 \ddot{l}_3 = ru_3 - s\dot{l}_3 - 0.5m_3\left(\dot{\phi}_3^2 \cos^2\delta_3 + \dot{\delta}_3^2\right)\times \\ \times\left(l_{30} - 2l_3\right) + D_2/D\cos\delta_3 + D_4/D\sin\delta_3 - \\ -D_9/D\cos\delta_3\cos\phi_3. \qquad (24)$$

Траектория перемещения захвата манипулятора $x_M^{pr}(t), y_M^{pr}(t), z_M^{pr}(t)$ задана в параметрической форме в виде функций времени. Предполагается, что эти функции дважды дифференцируемы по времени. Необходимо сформулировать алгоритм вычисления управляющих напряжений (21) в функции обобщенных координат и скоростей, обеспечивающих перемещение захвата из начальной точки в конечную точку по назначенной траектории.

Для модели движения в виде (22)–(24) законы управления можно строить по алгоритму [20], согласно которому сначала находятся ускорения программные законы изменения длин исполнительных звеньев $\ddot{l}_k^{pr}(t)$, при которых реализуется назначенная траектория перемещения захвата. Затем определяются управляющие усилия F_k (22)–(24), по которым находятся законы изменения управляющих напряжений (21). В этом случае фактическая траектория захвата соответствует заданной траектории в том случае, когда модель манипулятора и его параметры достоверно описывают реальную физическую модель. Реализация этого алгоритма для модели (22)–(24) требует большого объема вычислений.

Анализ дифференциальных уравнений (15)–(17) показывает, что физический смысл множителей Лагранжа $\lambda_7 - \lambda_9$ заключается в равенстве их сумме проекций управляющих усилий на соответствующие оси неподвижной системы координат $Oxyz$ [21]. Тогда их можно записать в форме дифференциальных уравнений несвободной материальной точки

$$m_4\ddot{x}_M=\lambda_7=F_1\frac{x_M}{l_1}+F_2\frac{x_M-OB}{l_2}+F_3\frac{x_M+OB}{l_3},$$

$$m_4\ddot{y}_M=\lambda_8=F_1\frac{y_M-OA}{l_1}+F_2\frac{y_M}{l_2}+F_3\frac{y_M}{l_3},$$

$$m_4\ddot{z}_M=\lambda_9=F_1\frac{z_M}{l_1}+F_2\frac{z_M}{l_2}+F_3\frac{z_M}{l_3}+m_4g.$$

Выражения для управляющих усилий F_k получаем, вычисляя обратную матрицу:

$$F_1=\frac{m_4l_1}{OA}\left[-\ddot{y}_M+\frac{y_M}{z_M}\left(\ddot{z}_M-g\right)\right]; \quad (25)$$

$$F_2=\frac{m_4l_2}{2OA}\left[\begin{array}{c}-\ddot{x}_M\dfrac{OA}{OB}+\ddot{y}_M+\\ +\left(\ddot{z}_M-g\right)\dfrac{OA\cdot OB+OAx_M-OBy_M}{OBz_M}\end{array}\right];$$

(26)

$$F_3=\frac{m_4l_3}{2OB}\left[\begin{array}{c}\ddot{x}_M+\ddot{y}_M\dfrac{OB}{OA}+\\ +\left(\ddot{z}_M-g\right)\dfrac{OA\cdot OB-OAx_M-OBy_M}{OAz_M}\end{array}\right]. \quad (27)$$

Синтез алгоритма управления для компенсации отклонений от программной траектории проведем по следующей схеме [20]. Алгоритм формирования управляющих напряжений $u_k(t)$, поступающих на входы приводов манипулятора формируем из условия, чтобы отклонения

$$\delta_X(t)=x_M^{pr}-x_M,\delta_y(t)=$$
$$=y_M^{pr}-y_M,\delta_Z(t)=z_M^{pr}-z_M,$$

соответствовали решениям дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\ddot{x}_{\text{M}}(t)=\ddot{x}_{\text{M}}^{pr}(t)+\alpha_{1x}+\dot{\delta}_x(t)+\alpha_{2x}+\delta_x(t)=0; \quad (28)$$

$$\ddot{y}_{\text{M}}(t)=\ddot{y}_{\text{M}}^{pr}(t)+\alpha_{1y}+\dot{\delta}_y(t)+\alpha_{2y}+\delta_y(t)=0; \quad (29)$$

$$\ddot{z}_{\text{M}}(t)=\ddot{z}_{\text{M}}^{pr}(t)+\alpha_{1z}+\dot{\delta}_z(t)+\alpha_{2z}+\delta_z(t)=0. \quad (30)$$

Коэффициенты при отклонениях программных координат и скоростей от текущих координат и скоростей принимаются постоянными и положительными.

Управляющие силы F_k^{pr}, реализующие законы движения по программной траектории, находятся из уравнений (25)–(27) в результате подстановки ускорений (28)–(30). Алгоритм формирования управляющих напряжений находим, подставляя полученные выражения управляющих сил в (21). Тем самым находим окончательное решение задачи синтеза программных перемещений захвата манипулятора:

$$ru_1=\frac{m_4l_1}{OA}\left[\begin{array}{c}-\ddot{y}_{\text{M}}^{pr}-\alpha_{1y}\dot{\delta}_y-\alpha_{2y}\delta_y+\dfrac{y_{\text{M}}}{z_{\text{M}}}\times\\ \times\left(\ddot{z}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1z}\dot{\delta}_z+\alpha_{2z}+\delta_z-g\right)\end{array}\right]+s\dot{l}_1; \quad (31)$$

$$ru_2=\frac{m_4l_2}{2OA}\left[\begin{array}{c}-\left(\ddot{x}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1x}\dot{\delta}_x+\alpha_{2x}\delta_x\right)\dfrac{OA}{OB}+\\ +\ddot{y}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1y}\dot{\delta}_y+\alpha_{2y}\delta_y+\\ +\left(\ddot{z}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1z}\dot{\delta}_z+\alpha_{2z}\delta_z-g\right)K_2\end{array}\right]; \quad (32)$$

$$K_2=\frac{OA\cdot OB+OAx_{\text{M}}-OBy_{\text{M}}}{OBz_{\text{M}}};$$

$$ru_3=\frac{m_4l_3}{2OB}\left[\begin{array}{c}\ddot{x}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1x}\dot{\delta}_x+\alpha_{2x}\delta_x+\\ +\left(\ddot{y}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1y}\dot{\delta}_y+\alpha_{2y}\delta_y\right)\dfrac{OB}{OA}+\\ +\left(\ddot{z}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1z}\dot{\delta}_z+\alpha_{2z}+\delta_z-g\right)K_3\end{array}\right]; \quad (33)$$

$$K_3=\frac{OA\cdot OB+OAx_{\text{M}}-OBy_{\text{M}}}{OAz_{\text{M}}}.$$

Для вычисления управляющих напряжений (21) необходимо вычислить текущие значения координат захвата и их скорости. С этой цель записываются уравнения связей между координатами точки M, координатами точек крепления звеньев на основании и длинами звеньев l_k

$$l_1=\sqrt{x_{\text{M}}^2+\left(y_{\text{M}}-OA\right)^2+z_{\text{M}}^2}; \quad (34)$$

$$l_2=\sqrt{\left(x_{\text{M}}-OB\right)^2+y_{\text{M}}^2+z_{\text{M}}^2}; \quad (35)$$

$$l_3=\sqrt{\left(x_{\text{M}}+OB\right)^2+y_{\text{M}}^2+z_{\text{M}}^2}. \quad (36)$$

Решая прямую задачу, из системы (34)–(36) находим зависимости координат точки $M(x_M, y_M, z_M)$ от длин звеньев и координат точек крепления звеньев на основании манипулятора:

$$x_{\text{M}}=\frac{l_3^2-l_2^2}{4OB}; \quad (37)$$

$$y_{\text{M}}=\frac{-l_1^2+0.5l_2^2+0.5l_3^2-OB^2+OA^2}{2OA}; \quad (38)$$

$$z_{\text{M}}=\left(l_1^2-\frac{\left(l_3^2-l_2^2\right)^2}{16OB}-\frac{L^2}{4OA^2}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad (39)$$

$$L=\left(-l_1^2+0.5l_2^2+0.5l_3^2-OB^2-OA^2\right).$$

Скорости находятся дифференцированием (37)–(39).

Контуры управления имеют обратные связи по положению, скорости и ускорению всех исполнительных звеньев. Устойчивость алгоритма обеспечивается выбором коэффициентов дифференциальных уравнений (28)–(30) таким образом, чтобы корни их характеристических уравнений имели отрицательные действительные части. Действительно после подстановки управляющих сил в (25)–(27), получаем дифференциальные уравнения кинематической траектории движения замкнутой системы:

$$\ddot{x}_{\text{M}}+\alpha_{1x}\dot{x}_{\text{M}}+\alpha_{2x}x_{\text{M}}=\ddot{x}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{1x}\dot{x}_{\text{M}}^{pr}+\alpha_{2x}x_{\text{M}}^{pr},$$

$$\ddot{y}_{\text{M}}+\alpha_{1x}\dot{y}_{\text{M}}+\alpha_{2x}y_{\text{M}}=\ddot{y}^{\,pr}_{\text{M}}+\alpha_{1x}\dot{y}^{\,pr}_{\text{M}}+\alpha_{2x}y^{\,pr}_{\text{M}},$$

$$\ddot{z}_{\text{M}}+\alpha_{1x}\dot{z}_{\text{M}}+\alpha_{2x}z_{\text{M}}=\ddot{z}^{\,pr}_{\text{M}}+\alpha_{1x}\dot{z}^{\,pr}_{\text{M}}+\alpha_{2x}z^{\,pr}_{\text{M}}.$$

Решениями этих уравнений являются экспоненциальные функции

$$x_{\text{M}}(t)=x^{\,pr}_{\text{M}}(t)+C_{1x}e^{\beta_{1x}t}+C_{2x}e^{\beta_{2x}t};$$

$$y_{\text{M}}(t)=y^{\,pr}_{\text{M}}(t)+C_{1y}e^{\beta_{1y}t}+C_{2y}e^{\beta_{2y}t};$$

$$z_{\text{M}}(t)=z^{\,pr}_{\text{M}}(t)+C_{1z}e^{\beta_{1z}t}+C_{2z}e^{\beta_{2z}t},$$

где C_{1x}, C_{2x}, C_{1y}, C_{2y}, C_{1z}, C_{2z} – постоянные, определяемые начальными условиями; β_{1x}, β_{2x}, β_{1y}, β_{2y}, β_{1z}, β_{2z} – корни характеристических уравнений (28)–(30).

Так как коэффициенты в этих уравнениях положительные, то действительная часть корней всегда отрицательная, поэтому текущие значения декартовых координат захвата приближаются к программным значениям с необходимой точностью за время, определяемое динамикой синтезированной системы управления. Рекомендации по выбору значений коэффициентов приведены в работах [20, 22]. Если технически возможно достоверно проводить измерения ускорений с помощью датчиков (акселерометров), алгоритм вычисления управляющих напряжений значительно упрощается.

Пример реализации алгоритма

Одним из распространенных перемещений рабочего органа манипулятора является перемещение по пространственной прямой. Уравнение прямой, проходящей через две точки в канонической форме [23, 24], имеет вид:

$$\frac{x^{\,pr}_{\text{M}}(t)-x^{\,pr}_{\text{M0}}}{\Delta x}=\frac{y^{\,pr}_{\text{M}}(t)-y^{\,pr}_{\text{M0}}}{\Delta y}=\frac{z^{\,pr}_{\text{M}}(t)-z^{\,pr}_{\text{M0}}}{\Delta z},$$

где

$$\Delta x=x^{\,pr}_{\text{M}k}-x^{\,pr}_{\text{M0}},\Delta y=y^{\,pr}_{\text{M}k}-y^{\,pr}_{\text{M0}},\Delta z=z^{\,pr}_{\text{M}k}-z^{\,pr}_{\text{M0}}$$

определяются начальным и граничными условиями:

$$x^{\,pr}_{\text{M}}(0)=x^{\,pr}_{\text{M0}},y^{\,pr}_{\text{M}}(0)=y^{\,pr}_{\text{M0}},z^{\,pr}_{\text{M}}(0)=z^{\,pr}_{\text{M0}},$$

$$x^{\,pr}_{\text{M}}(T)=x^{\,pr}_{\text{M}k},\ y^{\,pr}_{\text{M}}(T)=y^{\,pr}_{\text{M}k},\ z^{\,pr}_{\text{M}}(T)=z^{\,pr}_{\text{M}k}.$$

Обозначая через

$$K_x=\frac{\sqrt{\Delta^2x+\Delta^2y+\Delta^2z}}{\Delta x},\ K_y=\frac{\sqrt{\Delta^2x+\Delta^2y+\Delta^2z}}{\Delta y},$$

$$K_z=\frac{\sqrt{\Delta^2x+\Delta^2y+\Delta^2z}}{\Delta z}.$$

Законы изменения декартовых координат $x^{\,pr}_{\text{M}}(t),y^{\,pr}_{\text{M}}(t),z^{\,pr}_{\text{M}}(t)$, точку M получаем в виде:

$$x^{\,pr}_{\text{M}}(t)=\frac{S(t)+x^{\,pr}_{\text{M0}}K_x}{K_x};$$

$$y^{\,pr}_{\text{M}}(t)=\frac{S(t)+y^{\,pr}_{\text{M0}}K_y}{K_y};$$

$$z^{\,pr}_{\text{M}}(t)=\frac{S(t)+z^{\,pr}_{\text{M0}}K_z}{K_z},\qquad(40)$$

где $S(t)$ – закон изменения дуговой координаты.

Закон изменения дуговой координаты принимаем в форме [25]:

$$S(t)=\left(10-15t/T+6t^2/T^2\right)t^3/T^3S_e,$$
$$T\ge t\ge 0,\qquad(41)$$

где S_e – длина траектории, равная

$$S_e=\sqrt{\left(x^{\,pr}_{\text{M}}-x^{\,pr}_{\text{M0}}\right)^2+\left(y^{\,pr}_{\text{M}}-y^{\,pr}_{\text{M0}}\right)^2+\left(z^{\,pr}_{\text{M}}-z^{\,pr}_{\text{M0}}\right)^2}.$$

Закон (31) удовлетворяет граничным условиям мягкого трогания и касания в фиксированный момент:

$$\dot{x}^{\,pr}_{\text{M}}(0)=\ddot{x}^{\,pr}_{\text{M}}(0)=\dot{y}^{\,pr}_{\text{M}}(0)=\ddot{y}^{\,pr}_{\text{M}}(0)=$$
$$=\dot{z}^{\,pr}_{\text{M}}(0)=\ddot{z}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{t})=0,$$
$$\dot{x}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=\ddot{x}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=\dot{y}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=\ddot{y}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=$$
$$=\dot{z}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=\ddot{z}^{\,pr}_{\text{M}}(\text{T})=0.$$

Расчеты проводились для следующих значений параметров манипулятора и траектории: $m_4=1{,}5$ кг, $x^{\,pr}_{\text{M0}}=-162{,}2$ мм, $y^{\,pr}_{\text{M0}}=154{,}1$ мм, $z^{\,pr}_{\text{M0}}=778{,}6$ мм, $x_{\text{M0}}=-170$ мм, $y_{\text{M0}}=160$ мм, $z_{\text{M0}}=770$ мм, $x_{\text{M}k}=300$ мм, $y_{\text{M}k}=50$ мм, $z_{\text{M}k}=950$ мм, OA=454 мм, OB= 262 мм, $\alpha_1=10$, $\alpha_2=30$, r=133,3, s=20000, T=4 с.

В начальный момент времени точка M захвата манипулятора не совпадала с начальной точкой программной траектории $\delta_x(0)$=7,8 мм, $\delta_y(0)$=–5,9 мм, $\delta_z(0)$=8,6 мм.

Заключение

Синтез алгоритма контурного управления перемещением манипулятора-трипода по ускорению не требует знания параметров механической части манипулятора. Алгоритм формирования управляющих напряжений формируется с учетом кинематических параметров манипулятора по всем степеням свободы. Математическое моделирование показало, что предложенный алгоритм позволяет реализовать перемещение захвата по программной траектории с ошибкой не более 1%. Алгоритм хорошо функционирует и при наличии начальных возмущений.

Библиографический список

1. *Бушуев В. В., Хольшев И. Г.* Механизмы параллельной структуры в машиностроении. СТИН. 2001. № 1. С. 3–8.

2. *Афонин В. Л., Подзоров П. В., Слепцов В. В.* Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры: учеб. пособие / Под общ. ред. В. Л. Афонина. М: МГТУ СТАНКИН; Янус-К, 2006. 448 с.

3. *Глазунов В. А., Колискор А. Ш, Крайнев А. Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 с.

4. *Рыбак Л. А., Гриненко Г. П.* Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 7 (25). С. 32–39.

5. Робот-манипулятор FlexPicker IRB 360 компании ABB. URL: http://www.robotic-turnkeysolutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf.

6. Роботы с параллельной кинематикой EXPT.

7. Роботы серии Delta. URL: http://omron.nt-rt.ru/images/manuals/Delta.pdf.

8. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod: Proceedings of Romansy, 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing Switzerland / V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun et al. 2014.Vol. 22. P. 463–471.

9. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 8. Т. 17. С. 525–530.

10. *Дяшкин-Титов В. В., Воробьева Н. С., Терехов С. Е.* Алгоритм позиционирования захвата манипулятора-трипода // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. СПб.: Политехнический ун-т, 2016. С. 634–644.

11. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod. Communications in Computer and Information Science. Springer International Publishing Switzerland 2015: CIT&DS, CCIS 535 / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, V. Skakunov et al. 2015. P. 392–404.

12. Пат. 2616493 РФ, МПК B66C 23/44. Манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин и др.; опубл. 17.04.2017; бюл. № 11.

13. *Лурье А. И.* Аналитическая механика. М., 1961. 824 с.

14. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. / А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес; отв. ред. С. М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. М.: Наука. Кн. 1. 2006. 383 с.

15. *Кобринский А. А., Кобринский А. Е.* Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 343 с.

16. *Коловский М. З., Слоущ А. В.* Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука, 1998. 240 с.

17. Dynamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod / V. Zhoga, V. Gerasun, I. Nesmiyanov et al. // Journal of Machinery Manufacture and Reability. 2015. Vol. 44. No. 2. P. 181–186.

18. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. Конференции. / В. В. Дяшкин-Титов, В. В Жога, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева; под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. СПб.: Политехнический ун-т, 2017. С. 439–449.

19. *Журавлев В. Ф.* Основы теоретической механики. Изд. 2-е, перераб. М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. 320 с.

20. *Крутько П. Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. М.: Наука, 1988. 328 с.

21. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода / Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов, В. В. Жога, И. А. Несмиянов // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3. С. 32–41.

22. *Хапкина И. К.* Алгоритм управления манипуляционными роботами, построенный на уравнениях динамики // Известия ТулГУ. Технические науки, 2016. Вып. 2. С. 296–304.

23. Dynamics of tripod drive with elastic self-sustaining transmission / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, N. Vorobieva, V. Dyashkin-Titov // VP Vibroengineering PROCEDIA. 2016. Vol. 8. P. 512–516.

24. Dynamics of the Manipulator Parallel-Serial Structure: Evgrafov A. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, N. Vorobieva, V. Dyashkin-Titov. 2018. P. 33–43.

25. On the unstable operating modes of manipulator electric drives. Journal of Machinery Manufacture and Reability / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, N. Vorobieva, V. Dyashkin-Titov et al. 2017. Vol. 46. No. 3. P. 232–239.

УДК 681.518.3

А. А. Зайцев*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ

В статье обзорно рассматриваются режимы автоматического управления полетом квадракоптера, на конкретном примере анализируется разработка системы управления режимом полета, а также приведено одно из решений задачи слежения БПЛА за движущимся по земле объектом, используя методы компьютерного зрения. Также представлены способы идентификации объекта на изображении, полученном с помощью фронтальной камеры, закрепленной на летательном аппарате, рассмотрены алгоритмы нахождения расстояния до объекта преследования и расстояния до земли.

Ключевые слова: *система управления, беспилотный летательный аппарат, анализ потока изображений, компьютерное зрение.*

A. A. Zaitsev*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

UAV FLIGHT CONTROL ALGORITHM FOR TRACKING A MOVING OBJECT

The article reviews the automatic flight control modes of a quadrocopter, analyzes the development of a flight mode control system on a specific example, and also given one of the solutions to the problem of tracking UAV moving on the ground object using computer vision. The methods of object identification on the image obtained with the front camera mounted on the aircraft are also presented, the algorithms for finding the distance to the object of pursuit and the distance to the ground are considered.

Keywords: *control system, unmanned aerial vehicle, image flow analysis, computer vision.*

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в наши дни используются практически во всех сферах: мониторинг, наука, безопасность, фотосъемка. Они дают возможность предотвращать катастрофы, вести наблюдение за объектами и выполнять многие другие важные задачи.

В области контроля полетов БПЛА на сегодняшний день существует два актуальных вида управления: ручное управление с помощью человека и автоматическое интеллектуальное управление, реализуемое с помощью датчиков и программного обеспечения, которое определяет набор команд управления летательным аппаратом. При интеллектуальном управлении наиболее используемым является управление в режиме «путевых точек» (Waypoints), когда заранее записывается сложная траектория пути. Человеку остается только наблюдать, как БПЛА способен не только двигается по заданному пути, но и управлять скоростью и высотой полета автоматически. Среди разновидностей данного режима можно выделить полет вокруг «точки интереса» (Pointofinterest), при котором аппарат летает на заданных высоте, скорости и удаленности от определенной точки, полет «следуй за мной» (Followme), при котором используется передатчик (например, телефон) в качестве маяка, за которым летальный аппарат следует на заданных скорости и высоте. Также встречается полет с «блокировкой курса» (Courselock), при котором, как бы ни развернулся БПЛА, правая сторона остается правой, и полет с «блокировкой домашней точки» (Homelock), когда летальный аппарат гарантированно возвращается в заданную «домашнюю точку» [1].

Для большего понимания задачи системы управления стоит упомянуть, что в полете БПЛА может поддерживать горизонтальное положение относительно поверхности земли, может зависать, перемещаться в стороны, вверх и вниз.

Система управления режимом полета призвана решать задачу полета по траекториям различной сложности, но наиболее актуальной становиться при наличии ограничительных условий. Ими могут быть как ограничения по вре-

мени, скорости, угловой скорости, высоте, так и ограничения в контрольных точках по времени, скорости и ориентации БПЛА, однако наиболее серьезные последствия могут вызвать пространственные ограничения, так как их нарушения способны привести к фатальным последствиям. Препятствия, которые неподвижны в исходной системе координат, могут задаваться в виде трехмерных объектов, а чтобы таким же образом представить подвижные препятствия, нужно сначала задать закон движения. Нередко бывает необходимо задать фиксируемый допустимый коридор отклонения траектории от ломаной, соединяющей контрольные точки. В общем случае для своевременной корректировки траектории полета летательного аппарата необходимо непрерывно отслеживать положение подвижного объекта в пространстве.

Для начала рассмотрим задачу обнаружения препятствий, решение которой позволит предотвратить как повреждение самого аппарата, так и травмирование людей. Чтобы спроектировать систему управления, рассмотрим в качестве примера квадрокоптер – беспилотный четырехвинтовой вертолет. Входные параметры для задачи контроля полетом вышеупомянутого летательного аппарата, которые определяют его положение и ориентацию:

x, y, z – координаты центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат;

v_{xb}, v_{yb} – проекции вектора скорости (v_x, v_y, v_z) на локальные оси X, Y;

a_x, a_y, a_z – векторы ускорения;

ψ, φ, θ – углы Эйлера (показаны для данного примера на рис. 1).

Также вводятся обозначения:

ψ', φ', θ' – угловые скорости;

$\psi'', \varphi'', \theta''$ – угловые ускорения.

Входные параметры БПЛА передает примерно 200 раз/с на приемник устройства дистанционного управления. Начало локальной системы координат совпадает с центром масс аппарата. Чтобы перейти из неподвижной системы координат в локальную, нужно сначала сделать поворот вокруг оси z на угол рысканья $\psi(-\infty;+\infty)$, потом вокруг оси y на угол тангажа $\theta(-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2})$ и, наконец, вокруг оси x на угол крена $\varphi(-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2})$ [2].

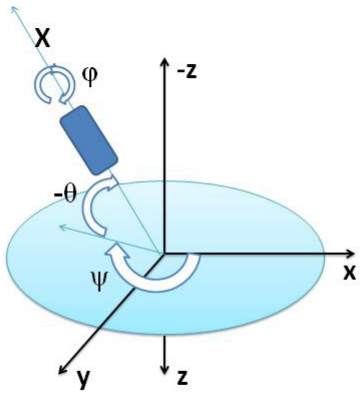


Рис. 1. Углы Эйлера для поставленной задачи

Управляющими параметрами квадрокоптера являются $\varphi, \theta, \psi', v_z$. Такой летательный аппарат может принимать команды управления примерно каждые 30 м/с.

Маршрут полета квадрокоптера определяется набором контрольных точек $P_1, \ldots, P_n$ в пространстве координат x, y, z, где P_1 – начальная точка маршрута, а P_n – конечная точка. Прежде чем начать полет, необходимо смоделировать траекторию полета – непрерывную кривую, проходящую по контрольным точкам, причем $T(0) = P_1$ и $T(1) = P_n$:

$$T(u) = (x(u), y(u), z(u)), u \in [0,1]. \quad (1)$$

В случае когда для каждой контрольной точки дополнительно фиксируется время ее прохождения, траектория принимает вид:

$$T(t) = (x(t), y(t), z(t)), t \in [0, t_{\max}]. \quad (2)$$

Самая простейшая траектория – это ломаная линия, но она не является оптимальной по времени, так как в контрольных точках летательный аппарат будет вынужден полностью останавливаться, чтобы продолжить маршрут в соответствии с заданной линией. Оптимальными по времени траекториями считаются гладкие кривые, построенные с учетом маневренности квадрокоптера [2].

Чтобы определить положение и ориентацию, используется малогабаритная инерциальная система, которая состоит из микромеханического гироскопа, акселерометра, барометрического высотомера и трехосного магнитометра. Система управления разрабатывает и выдает готовое навигационное решение по координатам и углам ориентации с помощью интегрирования данных, получаемых с этих датчиков, с данными приемника GPS/ГЛОНАСС [2].

Параметры управления определяют команду для того, чтобы установить требуемые показатели ориентации скорости БПЛА, их значения задаются в ограниченных диапазонах. При навигации только с помощью инерциальных датчиков постепенно накапливаются ошибки в определении координат местоположения, возникают дополнительные трудности.

Система управления квадрокоптером соединяет в себе элементы жесткого («система не должна опаздывать никогда») и мягкого («система не должна опаздывать, как правило») реального времени [3]. Так как траектория движения объекта заранее не известна, система управ-

ления должна планировать и корректировать траекторию движения квадрокоптера или любого другого летательного аппарата.

Львиная доля спроектированных и используемых БПЛА используют радиокомандную или комбинированную системы управления. Чтобы определить точное местоположение и управлять движением БПЛА, применяют систему глобального позиционирования, обеспечивающую высокую радионавигационную точность, допускающую ошибки в отклонении определения местоположения БПЛА, не превышающее 10 м [4]. Все же существуют обособленные участки, в которых благодаря естественным или искусственно созданным помехам сигналы геолокации GPS/ГЛОНАСС имеют очень низкое качество приема или даже совсем недоступны, к примеру, в современных городах с большим количеством высотной застройки или сильными источниками электромагнитного излучения. Наибольшую опасность представляют линии электропередач (ЛЭП), так как они являются малоразмерным объектом и имеют большую протяженность между опорами. Вероятность верного обнаружения ЛЭП зависит от условий освещенности и разрешающей способности оптической системы. Если наблюдение выполняется с помощью инфракрасного (ИК) излучения, – то от температуры ЛЭП.

Здесь и имеют место широкие возможности применения различных способов управления, навигации, информационного обеспечения и наведения летающих аппаратов, главным образом малоразмерных и маловысотных БПЛА, чтобы не зависеть от спутников.

Повышение так называемой живучести при управлении полетом является одной из важных стратегий развития систем с БПЛА. На сегодняшний день методы решения задачи планирования маршрута полета в основном сводятся к процессу поочередного облета и наблюдения неподвижных объектов [5]. Также существует немало методов маршрутизации полета, начиная от метода ветвей и границ и заканчивая нейросетевыми алгоритмами планирования. Отличаются они тем, что в исходных данных указываются координаты местоположения наблюдаемых объектов, а решением задачи является последовательность облета пунктов планируемого маршрута. Отметим, что наряду с вышеуказанными задачами повышения живучести БПЛА в условиях маловысотных полетов при сильно пересеченной местности существенной является проблема облета групп препятствий и в вертикальной плоскости. Для пилотируемых летательных аппаратов при осуществлении полетов над пересеченной местностью используется специальный радиолокационный комплекс – радиоэлектронная система управления маловысотным полетом, формирующая профильный полет БПЛА, при котором траектория полета ЛА повторяет профиль рельефа местности.

Но в таких методах не уделяется должного внимания выбору маршрута облета препятствий, в первую очередь возникающих в ходе полета, то есть тех, информация о которых не заложена в память аппарата перед предстоящим вылетом. Другими словами, ясно, что использование аналогичного комплекса в составе бортового оборудования БПЛА представляется нецелесообразным по критерию «стоимость-эффективность». Кроме того, для решения некоторых специализированных задач применение активного радиолокатора не рекомендуется, потому это может служить сильным демаскирующим фактором. Особенность вопроса выбора маршрута облета препятствий применительно к БПЛА в том, что в случае внезапных непредвиденных изменений динамично меняющейся обстановки задача перепланирования маршрута должна осуществляться автоматически [6].

Способы сканирования изображений, измерения расчетных параметров и методы представление объектов в двухмерном формате принято именовать плоскими, а в трехмерном – многомерным. Разработка абсолютно автономных воздушных объектов, «умных» БПЛА разной области применения и класса – это одно из основных направлений развития военной и гражданской авиации. Большинство производителей стремятся воссоздать летательные аппараты, пилотируемые с помощью специального программного обеспечения с внедрением искусственного интеллекта. Немаловажное значение имеет совершенствование прогресса в области элементной базы оптико-электронных систем, разработка и использование приборов и технологий сканирования пространства и моделирования изображений в трехмерном формате.

Таким образом, повышается уровень актуальности проблем, которые, во-первых, описывают характеристики и способы создания аппаратуры и различных средств, дающих возможность формировать и воплощать в жизнь трехмерные модели ландшафта, во-вторых, позволяют быстро обрабатывать и транслировать информации, а также получать и использовать голографические изображения объектов и отбирать самые оптимальные маршруты полета БПЛА [7].

Усложняя вышерассмотренную задачу, добавим новые условия: следование за объектом на определенном расстоянии от него и на определенной высоте от земли. Также предполагается, что объект двигается по земле. Слежение считается оконченным либо при достижении заданного местоположения, либо по истечении заданного времени, либо при получении команды

о прекращении полета. Система локации объекта может реализовываться при помощи системы компьютерного зрения, радара или радиомаяка, GPS приемника. Слежение с использованием компьютерного зрения реализуется посредством видеокамеры, прикрепленной на БПЛА.

Существует несколько алгоритмов распознания объектов на изображении, основанных на границе между заранее определенным объектом и фоном. Некоторые базовые методы поиска целевого объекта на изображении приведены ниже.

Контурный анализ применяется для выделения и анализа контура объекта. Такой подход использует анализ свойств яркости, а именно разрывности и однородности: первый сводится к делению изображения на небольшие области и поиску резких перепадов сигнала яркости; второй – к разбиению изображения на однородные участки по определенному критерию. Процесс фильтрации основан на перемещении маски фильтра между всеми точками и выделении тех, которые имеют яркость, отличающуюся от окружающего фона [8].

Метод Канни применяется для идентификации границ искомого объекта, используя два порога для так называемых сильных и слабых границ. При такой методике «слабые» границы возникают только в случае, если они соединены с «сильными». Алгоритм показывает высокую результативность при очень зашумленных изображениях, однако требует существенных временных затрат [9].

Чтобы идентифицировать перемещение объекта слежения, применяются методы покадрового анализа потока изображений. В данной работе рассматривается метод, использующий сравнение двух последовательных кадров. Результатом становится выделение областей, на которых произошли изменения по сравнению с предыдущим кадром, что означает перемещение объекта [10]. Достоинствами такого метода являются его простота и необходимое быстродействие, однако становится весьма затруднительной задача выделения объекта в условиях движущегося фона. Наиболее оптимален алгоритм поиска объекта на каждом следующем кадре и сравнение его положения с положением на предыдущем. Достоинством такого метода является возможность пренебречь меняющимся фоном и возможность сузить область поиска на новом снимке.

Стоит отметить, что приведенные выше алгоритмы не позволяют решить задачу определения расстояния до объекта. А также, поскольку на БПЛА прикреплена только одна фронтальная камера, невозможно использовать метод стереоскопического зрения. Чтобы узнать искомую величину, применяется метод, основанный

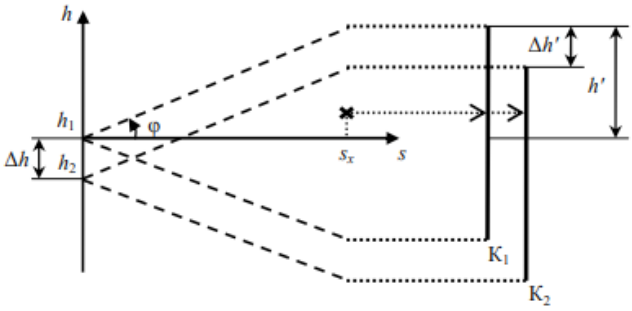


Рис. 2. Схема работы алгоритма для измерения расстояния до объекта

на периодичной смене высоты полета на определенную заданную величину и сравнении двух снимков, сделанных на различных высотах [11]. На рис. 2 представлена схема такого алгоритма.

Обозначения на рис. 2: (h_1 и h_2 – высота полета, м; Δh – изменение высоты, м; φ – половина угла обзора, град.; s_x – расстояние до объекта, м; K_1 и K_2 – снимки, полученные с камеры на разной высоте; h' – захватываемая объективом камеры высота, м; $\Delta h'$ – изменение положения цели на изображении в пикселах).

В зависимости от расстояния до цели объектив камеры захватывает различное расстояние по вертикали [12] на линии объекта, которое определяется формулой:

$$h' = s_x \tan(\varphi). \qquad (3)$$

Допустим камера, которой оборудован квадрокоптер, имеет формат съемки 1280 × 720, каждому пикселу на изображении соответствует реальная высота $\frac{h'}{360}$. Изменение высоты Δh полета квадрокоптера вызовет соответствующее перемещение $\Delta h'$ объекта слежения на изображении, а следовательно, эквивалентом одному пикселу по высоте будет $\frac{\Delta h}{h'}$:

$$1пкс = \Leftrightarrow \frac{h'}{360} = \frac{\Delta h}{\Delta h'} \Rightarrow h' = 360\frac{\Delta h}{h'}. \qquad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим формулу для вычисления расстояния до объекта слежения:

$$s_x = \frac{360\Delta h}{\tan(\varphi)\Delta h'}. \qquad (5)$$

Изменение высоты летательного аппарата является разницей значений h_1 и h_2.

На основе информации, полученной с бортовой видеокамеры, производится анализ перемещения объекта, и формируются команды управления летательным аппаратом для облета возможных препятствий и корректировки траектории полета.

Качество работы системы управления можно оценить с помощью таких параметров как: минимальное отклонение от управляющих па-

раметров, нахождение объекта в центре кадра, плавность траектории БПЛА, плавный горизонт в кадре [13].

На сегодняшний день становится актуальной не только разработка отдельных алгоритмов управления беспилотным летательным аппаратом, но и исследование постановки задачи различных типов управления БПЛА в целом с анализом и разбором множества разнообразных методов.

Библиографический список

1. Интеллектуальные режимы полета квадрокоптеров от DJI. URL: http://www. rcteam. ru/intellektualnye-rezhimy-poleta-kvadrokopterov-ot-dji. html (дата обращения: 02.12.2018).

2. *Тумуров Э. Г., Шелехов В. И.* Требования к системе управления квадрокоптером // Системная информатика. 2015. № 5. С. 39–54.

3. *Хухлаев Е.* Операционные системы реального времени и Windows NT // Открытые системы. 1997. № 5. С. 48–51.

4. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий: учеб. пособие / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.

5. *Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А.* Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 12. С. 41–47.

6. *Буянов И. А., Исламов В. К.* Автономная система ориентирования беспилотного летательного аппарата: состав и схема функционирования в формате 3D // Молодой ученый. 2018. № 1. С. 10–16.

7. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий: учеб. пособие / Под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.

8. *Литвинов Ю. В., Мазулина В. В., Фролов С. Н.* Использование веб-камеры для обнаружения препятствия на пути движения мобильного робота // Сб. матер. МНПК. Системы обработки информации. Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и информационных систем. Харьков, 2013. Вып. 7 (114).

9. *Герман Е. В.* Алгоритмы совмещения разнородных изображений в бортовых системах визуализации: дис. канд. техн. наук. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014.

10. *Shapiro L., Stockman G.* Textbook. Computer Vision. NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000.

11. *Валюс Н. А.* Стерео: фотография, кино, телевидение. М., 1986.

12. *Тумуров Э. Г., Шелехов В. И.* Требования к системе управления квадрокоптером // Системная информатика. 2015. № 5. С. 39–54.

УДК 621.38

И. Г. Криволапчук*
старший преподаватель
М. В. Бураков*
кандидат технических наук, доцент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ-МАХОВИКОМ

Рассмотрены подходы к построению отдельных компонентов и реализации spice-модели системы управления двигателем-маховиком, приведены некоторые результаты моделирования.

Ключевые слова: *двигатель-маховик, управление, моделирование, электронные компоненты, spice-модель.*

I. G. Krivolapchuk*
Senior Teacher
M. V. Burakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
D. O. Yakimovsky*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PARTICULAR FEATURES OF THE REACTION WHEEL CONTROL UNIT SPICE MODELLING

The article describes some aspects of a model building and modeling process of a reaction wheel control unit. Partial modeling results are included.

Keywords: *reaction wheel, control unit, spice model, simulation.*

Реактивный двигатель-маховик (ДМ) используется в системах управления космическими аппаратами (КА) в качестве органа управления. В задачу ДМ входит создание управляющего момента, прикладываемого к корпусу КА. Конструктивно ДМ представляет собой электродвигатель с ротором, имеющим большой момент инерции. В качестве электродвигателя используется бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Направление момента электродвигателя обеспечивается дискретной коммутацией обмоток электронным коммутатором в соответствии с сигналами датчика положения ротора. Электромагнитный момент двигателя пропорционален величине тока, протекающего в обмотках статора.

Совершенствование и оптимизация алгоритмов работы блока управления двигателем-маховиком (БУД) не возможна без подробного анализа процессов, происходящих в электрических цепях. По ряду причин проведение такого анализа даже на инженерном макете блока является достаточно трудной задачей. Это связано как с особенностями работы системы БУД-ДМ, так и с особенностями проведения измерений. К примеру, не все интересующие измерения могут быть проведены без нарушения целостности схемы, а для получения согласованных во времени результатов из некоторых точек схемы могут потребоваться дорогостоящие инструментальные средства – дифференциальные щупы.

Еще одним существенным фактором при работе с макетом являются особенности работы цифровых осциллографов, ставших в настоящий момент основным инструментом при исследовании цепей и сигналов. За счет дискретизации по времени и дальнейшей интерполяции часть значимых характеристик сигнала может

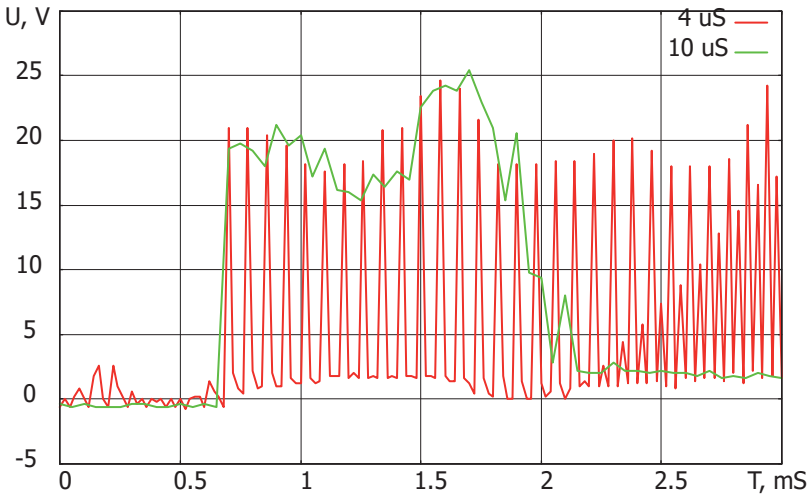


Рис. 1. Влияние настроек развертки на воспроизведение сигнала

скрываться, а в некоторых случаях и сам сигнал может быть значительно искажен. В первую очередь это относится к сигналам, имеющим периодическую составляющую. Рис. 1 иллюстрирует сказанное. Осциллограммы сняты при разной длительности горизонтальной развертки и, соответственно, при разных частотах оцифровки.

Одним из подходов к решению указанных проблем может стать использование системы моделирования электрических схем на базе симулятора SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Поскольку существующая схема содержит как цифровые, так и аналоговые компоненты, система моделирования должна поддерживать возможность работы с композитными схемами. Поддержку моделирования композитных схем имеют многие современные реализации SPICE, сочетающие в себе расширения базового ядра моделирования (как правило, версии Spice3f5) и проекта XSPICE. В частности, к таким реализациям относится система NGSpice. Основными аргументами в пользу такого выбора являются кроссплатформенность пакета и ориентированность на пакетную работу. Второе свойство является весьма важным, учитывая значительное (от десятков минут до часов) время моделирования.

Блок-схема моделируемой части системы представлена на рис. 2. Она включает в себя как реальные фрагменты принципиальной схемы, так и элементы, реализованные алгоритмически в микроконтроллере. В частности, таким элементом является распределитель импульсов управления (РИ) для инвертора. Для удобства программирования и отладки представленные блоки выполняются в виде независимых SPICE-модулей, объединяемых основным модулем, включающим в себя также описание задачи моделирования и управление результатами. Подготовка исходных модулей заключается в построении описания имеющейся принципиальной схемы на языке симулятора [1, 2], разработке моделей отсутствующих в базовой би-

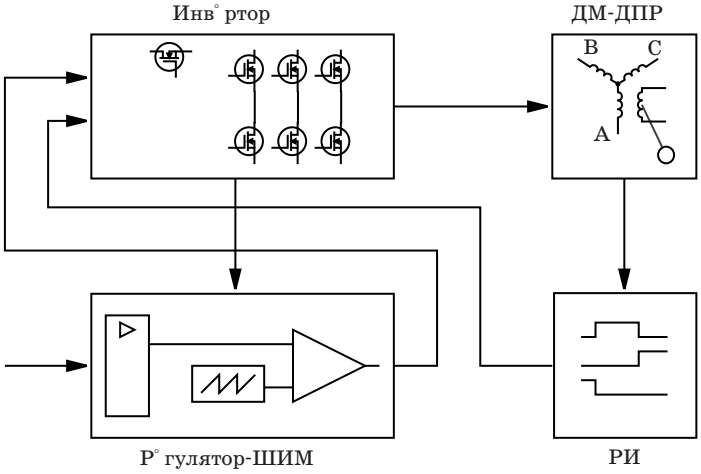


Рис. 2. Блок-схема SPICE-модели системы БУД-ДМ

блиотеке элементов схемы и предварительном подборе режимов моделирования.

Особенностью пакета моделирования NGSpice является наличие в библиотеке компонентов только базовых аналоговых и цифровых примитивов. Большинство моделей транзисторов в основном базируется на встроенных параметризованных примитивах, позволяющих использовать как упрощенные, так и достаточно сложные описания. Например, для описания MOSFET-транзисторов библиотека содержит семь различных моделей, учитывающих технологические особенности, конструктивное исполнение и другие важные факторы. Использование в схемах таких элементов, как операционные усилители (ОУ) или компараторы, требует предварительного построения SPICE-моделей на основе полных принципиальных или упрощенных схем с учетом основных параметров. Крупные производители электронных компонентов, такие как Analog Devices (AD) или Texas Instruments (TI), предоставляют библиотеки моделей своих изделий для использования в наиболее распространенных симуляторах. Данные модели, как правило, содержат подробное описание, соответствующее реальной принципиальной схеме.

Анализ сигналов в цепях блока управления (рис. 3) показывает, что там присутствуют сигналы со значительной импульсной составляющей – скорость нарастания фронтов сигналов составляет $25 \div 30\ 10^6$ В/с. Это означает, что шаг интегрирования при моделировании таких цепей будет составлять ~10^{-9} с (единицы наносекунд) для выполнения условий по точности и устойчивости расчетов. Таким образом, для получения приемлемого времени счета желательно использование упрощенных моделей компонентов схемы. Степень упрощения моделей определяется возможностью сохранения параметров выходных сигналов.

В [3] рассмотрены несколько уровней моделирования операционных усилителей. Сравнительное моделирование фрагментов блока управления, содержащих ОУ с использованием моделей level-1, level-2 и модели от AD, показало, что наиболее значимым параметром в конкретном случае является скорость нарастания выходного сигнала, поэтому для дальнейшего использования была выбрана реализация уровня 1.5 в классификации [3].

Еще одним компонентом схемы, требующим построения особой модели, является защитный диод – супрессор. Диоды данного типа в одно- и биполярном исполнении применяются для подавления импульсов напряжения, возникающих при коммутации цепей блока управления, и могущих вызвать повреждения активных элементов схемы. В основу модели положена структура, предложенная в [4].

Рассмотрим модели компонентов блок-схемы, представленной на рис. 2.

Модель двигателя-маховика представлена на рис. 4. Электрическая подсистема двигателя описывается элементами $L_{\{a,b,c\}}$, $R_{\{a,b,c\}}$ и $E_{\{a,b,c\}}$, соответственно представляющими индуктивность и сопротивление обмоток и противо-ЭДС, наводимую в обмотках. В механическую подсистему входят элементы G_T – электромагнитный момент; C_J – момент инерции ротора; R_F – момент трения и $G_{T\omega}$, характеризующий противодействующий вращению момент вентиляторного типа. Элементы G_θ и C_θ предназначены для формирования внутреннего сигнала электрического угла, на основе которого формируется трапецеидальная характеристика распределения коэффициента $K_{\{a,b,c\}}$ противо-ЭДС (элементы $PWL_{\{a,b,c\}}$).

Зависимые источники E_θ и E_T формируют вспомогательные (измерительные) сигналы, соответствующие механическому углу поворота и электромагнитному моменту.

Датчик положения ротора (ДПР) представлен тремя источниками ЭДС, формирующими сдвинутые на 120 электрических градусов сигналы, пропорциональные синусу электрического угла

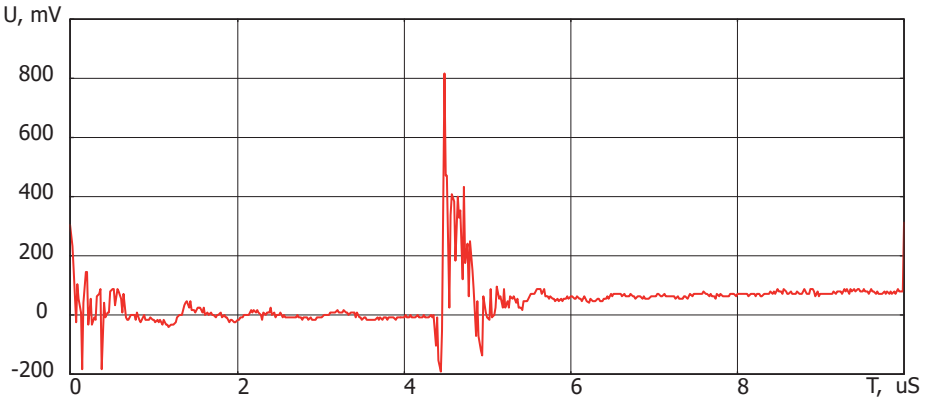


Рис. 3. Сигнал датчика тока двигателя

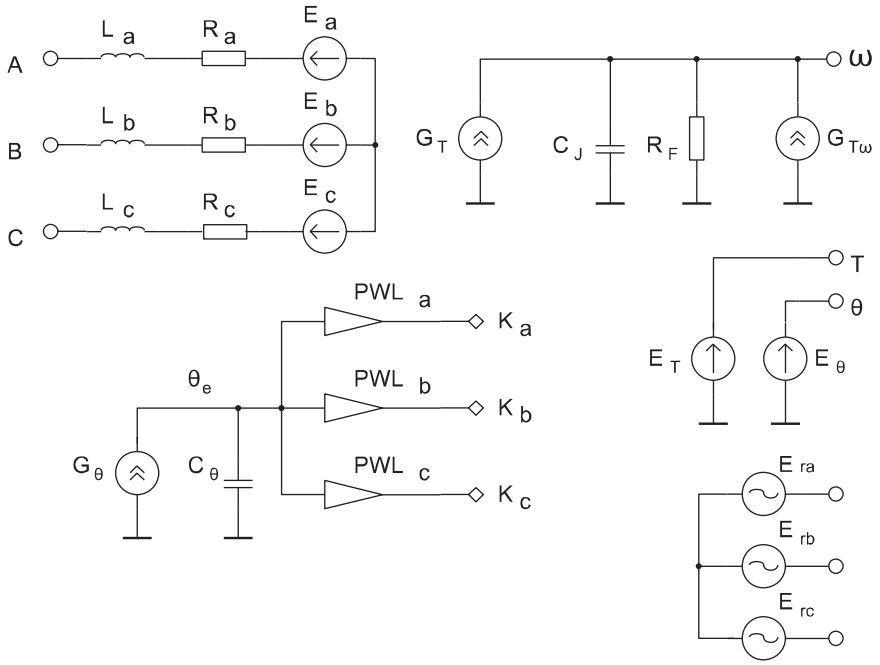


Рис. 4. SPICE-модель двигателя-маховика с датчиком положения

поворота ротора. Сигнал возбуждения датчика из соображений упрощения модели не используется. При необходимости модулированный сигнал ДПР может быть получен во внешних по отношению к модели цепях.

Основные уравнения, описывающие электрическую и механическую части модели, представлены ниже:

$$V_{a,b,c} = R \cdot i_{a,d,c} + L\frac{di_{a,d,c}}{dt} + E_{a,b,c}, \quad (1)$$

$$E_{a,b,c} = Ke \cdot \omega \cdot F_{a,b,c}(\Theta_e), \quad (2)$$

$$T_{a,b,c} = Ki \cdot i_{a,b,c} \cdot F_{a,b,c}(\Theta_e), \quad (3)$$

$$T_\Sigma - T_\omega = J\frac{d^2\Theta}{dt^2} + \beta\frac{d\Theta}{dt}, \quad (4)$$

$$\Theta_e = p\Theta, \quad (5)$$

$$E_{ra} = A \cdot \sin(\Theta_e),\ E_{rb} = A \cdot \sin\left(\Theta_e - \frac{2\pi}{3}\right),\ E_{rc} = A \cdot \sin\left(\Theta_e + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (6)$$

где V_k – фазное напряжение; $k = a, b, c$; R, L – сопротивление и индуктивность фазных обмоток соответственно; E_k – противо-ЭДС; Ke и Ki – коэффициенты противо-ЭДС и момента; F_k – функция, описывающая зависимость коэффициентов от угла поворота ротора (рис. 5); T_Σ – суммарный электромагнитный момент; T_ω – вентиляторный момент сопротивления; J – момент инерции ротора; β – коэффициент трения; ω – угловая скорость ротора; Θ, Θ_e – геометрический и электрический углы поворота ротора; p – число пар полюсов; E_{rk} – ЭДС фаз ДПР.

Распределитель импульсов реализован в виде гибридной аналого-цифровой модели. В макете блока управления физически реализован только детектор сигналов ДПР. Преобразование сигналов датчика в импульсы управления ключами реализовано алгоритмически в микроконтроллере. В модели для преобразования сигналов датчика используются элементы, представляющие собой модель запоминающего устройства вида N × 1 или N × M.

Из соображений минимизации преобразований сигналов в модель РИ введены также ключи для микширования сигналов управления с сигналом ШИМ. Сопряжение с аналоговой частью системы осуществляется посредством аналого-цифровых и цифро-аналоговых мостов, взаимно

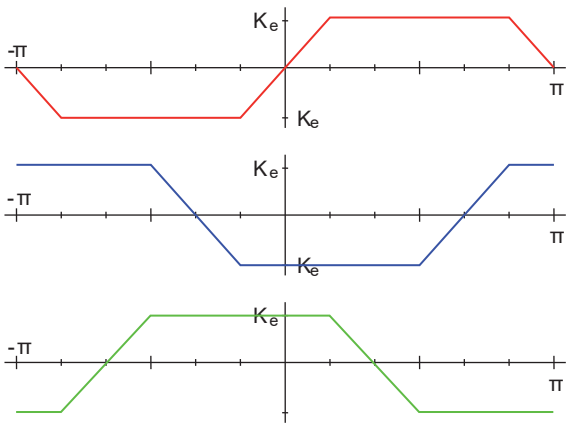


Рис. 5. Зависимость коэффициента противо-ЭДС от положения ротора

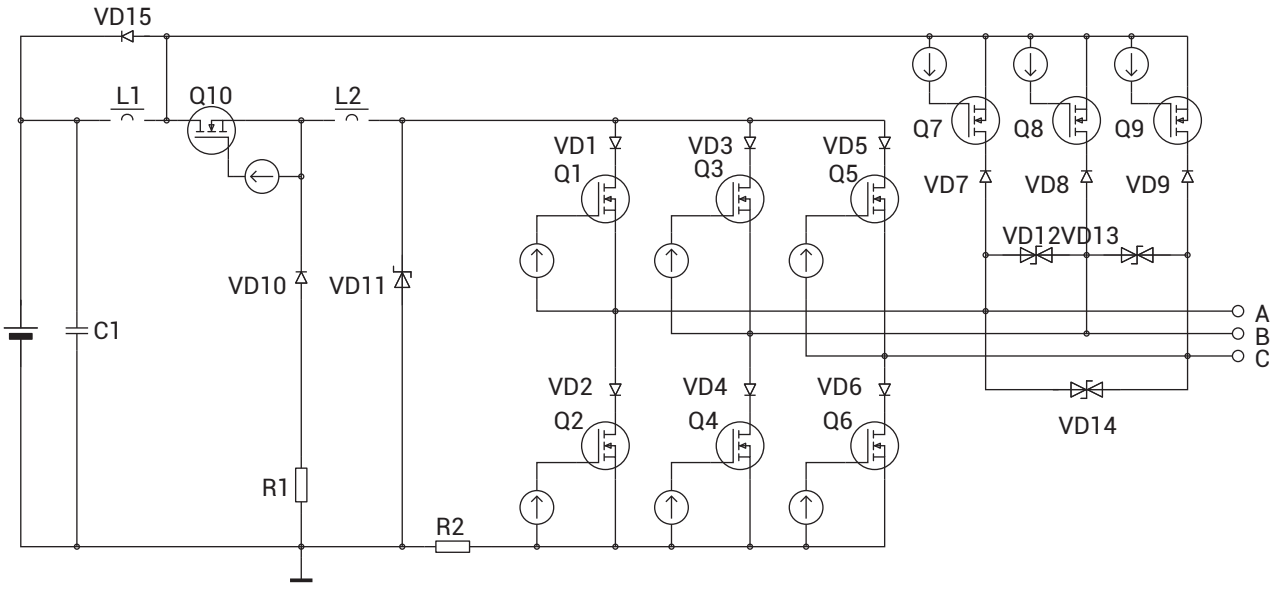


Рис. 6. SPISE-модель силового преобразователя (инвертора)

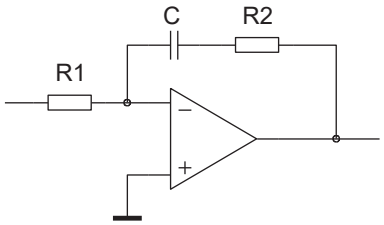


Рис. 7. ПИ-регулятор (изодромное звено)

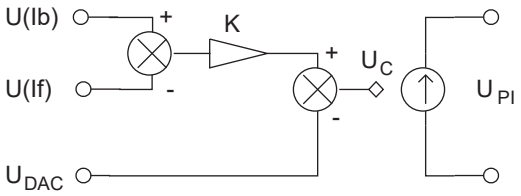


Рис. 8. SPICE-модель ПИ-регулятора

преобразующих уровни напряжений в логические значения «0» и «1».

Схема модели инвертора приведена на рис. 6. Как видно из рисунка, основное отличие от принципиальной схемы заключается в замене драйверов силовых ключей управляемыми источниками ЭДС. Такая замена обусловлена достаточно сложной внутренней структурой драйверов, приводящей к существенному замедлению вычислений. Для сохранения параметров процессов данные источники имеют аналогичные драйверам уровни и скорости нарастания управляющих сигналов.

Пропорционально-интегральный усилитель в блоке управления реализован по схеме изодромного звена (рис. 7). Подобная реализация оптимальна с точки зрения количества использованных элементов, но имеет определенные неудобства с точки зрения моделирования.

Преобразуем передаточную функцию звена так, чтобы она представляла собой параллельное соединение пропорциональной и интегральной ветвей (7), (8):

$$W_{pi} = \frac{K_p(T_u p + 1)}{T_u p} = \left(K_p + \frac{K_i}{p}\right), \qquad (7)$$

где

$$K_p = \frac{R2}{R1},\ T_u = R2 \cdot C, K_i = \frac{K_p}{T_u}. \qquad (8)$$

Структура, реализующая преобразованный регулятор и включающая в себя дифференциальный усилитель сигнала датчика тока, представлена на рис. 8.

В терминах языка описания модели данная структура представляется двумя зависимыми источниками ЭДС и учитывает ограничения на выходное напряжение интегратора:

EUc Uc 0 value{K*V(Ulb, Ulf) – V(Udac)}

EUpi o + o – value{-limit(Kp*V(Uc,0)

+ Ki*sdt(V(Uc, 0), – 3V, 3V)}

ШИМ-сигнал в блоке управления формируется на основе выдаваемых микроконтроллером прямоугольных импульсов (меандр), преобразуемых RC-цепочкой в близкое по форме к треугольному напряжение. При построении модели было решено сохранить цепочку, так как на формирование сигнала заметное влияние оказывают внутренние цепи микроконтроллера.

Рис. 9 представляет сравнение модельных сигналов и осциллограммы, полученной на макете блока. Из рисунка видно, что сигналы меандра совпадают, а амплитуда сформированного модельного сигнала (отмечен звездочками)

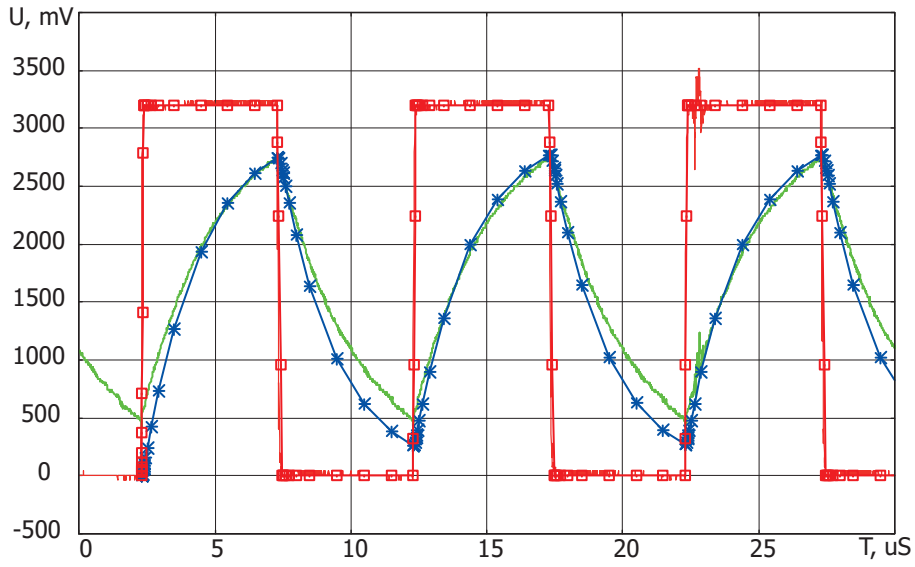


Рис. 9. Сравнение сигналов формирователей

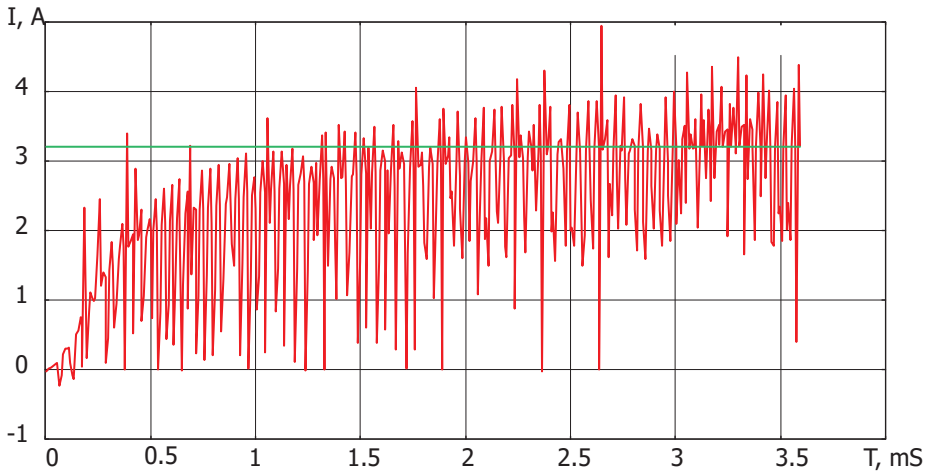


Рис. 10. Выход регулятора на заданное значение тока двигателя

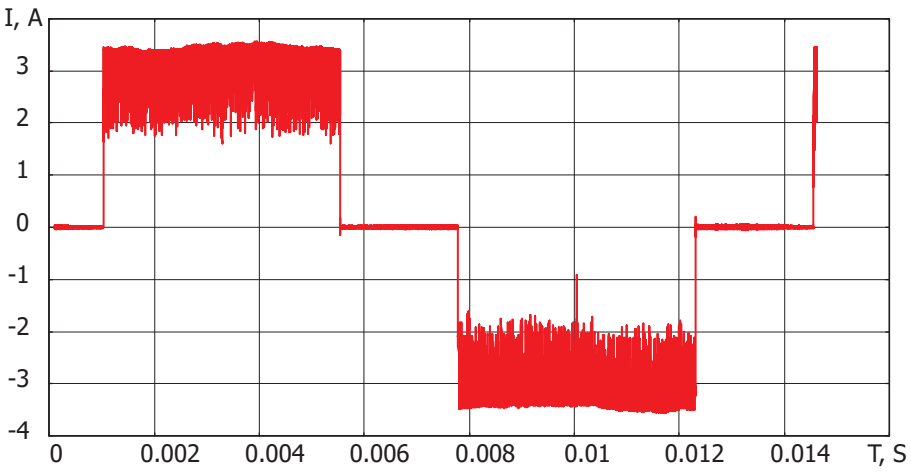


Рис. 11. Ток фазы двигателя за оборот ротора

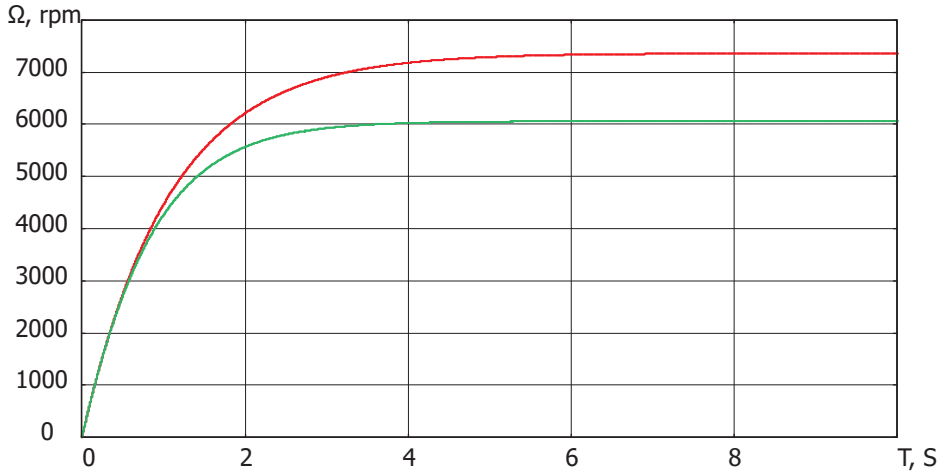


Рис. 12. Изменение скорости в процессе разгона

больше реального. Это объясняется тем, что внутренняя цепь разряда конденсатора имеет повышенное относительно среднего паспортного значение сопротивления и должно быть учтено в модели.

Компаратор ШИМ представлен упрощенной моделью вида:

ECOMP 3 0 TABLE {V(1, 2)} =
=(-1MV 0V) (1MVS, 3V).

В модели ОУ и компаратора введены лимитаторы скорости нарастания выходного сигнала в соответствии с паспортными данными использующихся в макете компонентов.

Проверка модели показала, что, несмотря на предпринятые упрощения, время счета остается крайне большим, поэтому при моделировании системы с регулятором момент инерции двигателя был уменьшен на три порядка относительно реального, что позволило не только сократить время моделирования, но и существенно уменьшить объем данных при сохранении информативности.

Рис. 10–12 представляют некоторые результаты моделирования.

Библиографический список

1. *Vladimirescu A.* The SPICE Book. John Wiley & Sons, Inc., 1994, 427 p.

2. *Vogt H.* NGspice User Manual. Version 29. October 21. 2018. 635 p.

3. Circuit Center: Op Amp Models. URL: http://www. ecircuitcenter. com/ OpModels/OpampModels. htm (дата обращения: 11.02.2019).

4. *Lepkowski J.* Zener Macro-Models Provide Accurate SPICE Simulations. Publication Order Number: AND8250/D, Semiconductor Components Industries, LLC, 2006.

УДК 004.021

Т. Н. Круглова*
кандидат технических наук, доцент
А. С. Власов*
аспирант
Южно-Российский государственный политехнический институт (НПИ) им. М. И. Платова

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ВОЖДЕНИЯ ПО ЗМЕЙКЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Современная мобильная робототехника не обходится без такой важной части проектирования систем управления, как составление алгоритмов построения маршрутов. Так как сельскохозяйственная техника использует траектории типа «змейка», важно при уборке и засеве урожая последовательно пройти каждый участок на поле с наименьшей погрешностью в позиционировании при поворотах и прямолинейном движении. Данный алгоритм базируется на составлении маршрута по заданным координатам без глобальной системы позиционирования.

Ключевые слова: *алгоритм управления, одометрия, беспилотные транспортные средства.*

T. N. Kruglova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. S. Vlasov*
PhD Student
**Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)*

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR BUILDING A ROUTE OF A UNMANNED VEHICLE FOR WORK IN AGRICULTURE

Modern mobile robotics cannot do without such an important part of the design of control systems as the compilation of algorithms for constructing routes. Since agricultural machinery uses the trajectory type "snake". It is important when harvesting and sowing the crop, to consistently pass each section on the field with the least error in positioning during turns and straight-line movement. This algorithm is based on drawing up a route according to given coordinates without a global positioning system.

Keywords: *control algorithm, odometry, unmanned vehicles.*

Существует множество подходов к разработке алгоритмов управления для беспилотных транспортных средств (БТС), например как в работе [1]. В зависимости от кинематики и задач способы управления могут различаться, но вся проблематика состоит в том, чтобы добиться требуемой точности позиционирования во время всего технологического процесса. Существуют несколько основных систем позиционирования: глобальная, локальная и смешанная, которая объединяет в себе достоинства первых двух и пытается устранить их недостатки. Такие системы базируются на сложности в проектировании систем управления в мобильной робототехнике. Таким образом, различного типа модификации должны проводиться на протяжении всей разработки алгоритмов управления. В сельскохозяйственной отрасли это требует особого внимания. Так как глобальные системы позиционирования работают при хорошем сигнале с погрешностью около метра, а только локальные можно использовать в помещениях с дополнительной оснасткой, актуальной задачей является разработка одометрических систем управления. Данная статья описывает кинематику испытуемой физической модели и ее работу с использованием разработанного алгоритма.

1. Расчет кинематики БТС с дифференциальным приводом

На основе двух составляющих скорости БТС можно рассчитать пройденное расстояние в каждом направлении [2]. Таким образом, пе-

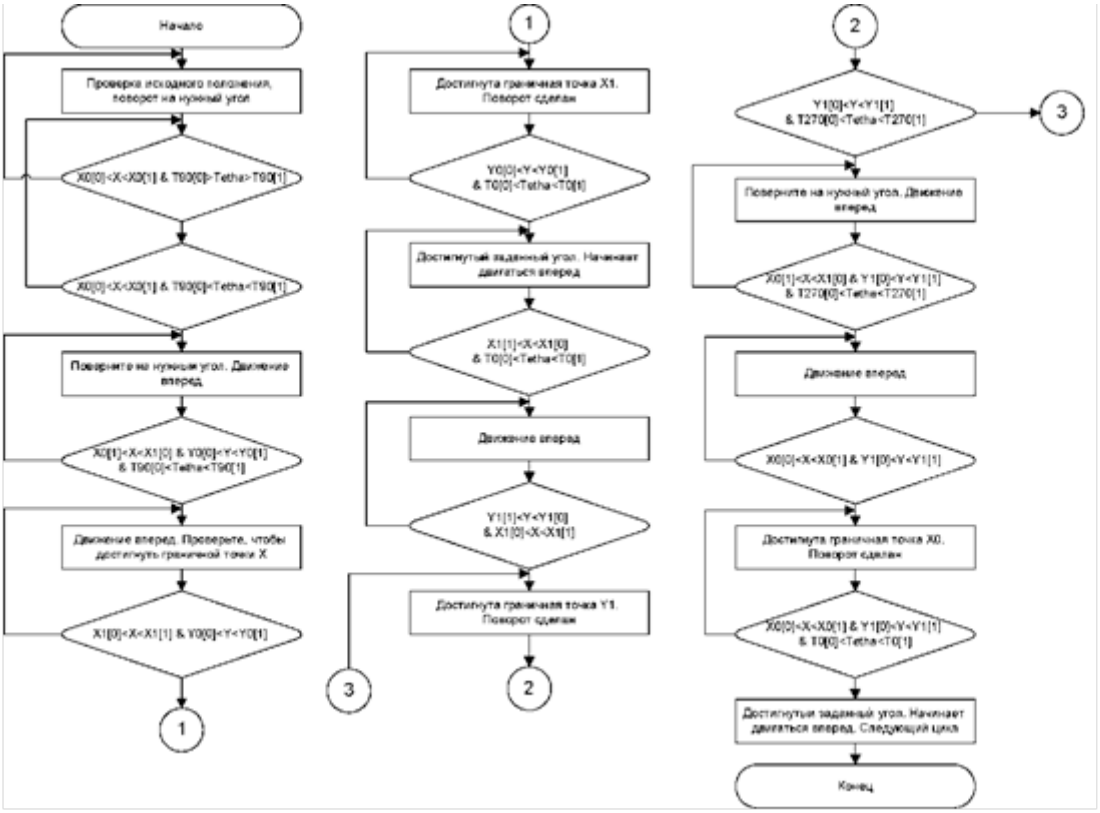


Рис. 1. Алгоритм работы беспилотного транспортного средства

ремещение по координатам x (уравнение 1) и y (уравнение 2) будет равно:

$$dx = v_x(t)dt; \quad (1)$$

$$dy = v_y(t)dt. \quad (2)$$

Аналогичным образом можно найти угловое положение БТС по формуле 3:

$$d\theta = \omega t(dt)\ . \quad (3)$$

Интегрируя уравнения (1, 2, 3), получаем:

$$X_P(t) = \int v\sin(\theta(t))dt + x_0\ ; \quad (4)$$

$$Y_P(t) = \int v\cos(\theta(t))dt + y_0\ ; \quad (5)$$

$$\theta_{rob}(t) = \int \omega(t)dt + \theta_0\ . \quad (6)$$

Объединяя уравнения (4, 5, 6), получаем систему дифференциальных уравнений 7:

$$\begin{cases} \dfrac{dX_P}{dt} = \left(\dfrac{V_{BR} - V_{BL}}{2}\right)\sin(\theta) + x_0 \\ \dfrac{dY_P}{dt} = \left(\dfrac{V_{BR} - V_{BL}}{2}\right)\cos(\theta) + y_0\ . \\ \dfrac{d\theta_{rob}}{dt} = \left(\dfrac{V_{BR} - V_{BL}}{L}\right) + \theta_0 \end{cases} \quad (7)$$

2. Разработка алгоритма движения беспилотного транспортного средства

Основной концепцией для разработки данного алгоритма являлась идея о построении маршрута без использования глобальной системы позиционирования, поэтому, ориентируясь на одометрию и кинематические характеристики робота из уравнения 7, был разработан принцип управления, где по заданным точкам системы координат БТС передвигается по заданному маршруту. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

По разработанному алгоритму была написана программа управления для БТС, и был проведен ряд опытов. Результаты предоставлены на рис. 2.

Данный алгоритм показывает высокую эффективность при позиционировании как на прямых участках пути, так и при поворотах. Средняя погрешность составляет 1,98173% по координате X и 1,9003 по координате Y (табл. 1).

3. Выводы

Резюмируя вышеизложенное, делаем вывод, что такая система управления позволяет добить-

Таблица 1

Среднее отклонение от эталонной траектории движения

№ опыта	Ошибка по X, %	Ошибка по Y, %
1	1,9839	2,0129
2	3,2703	0,0552
3	0,6910	3,6328
Среднее значение	1,98173	1,9003

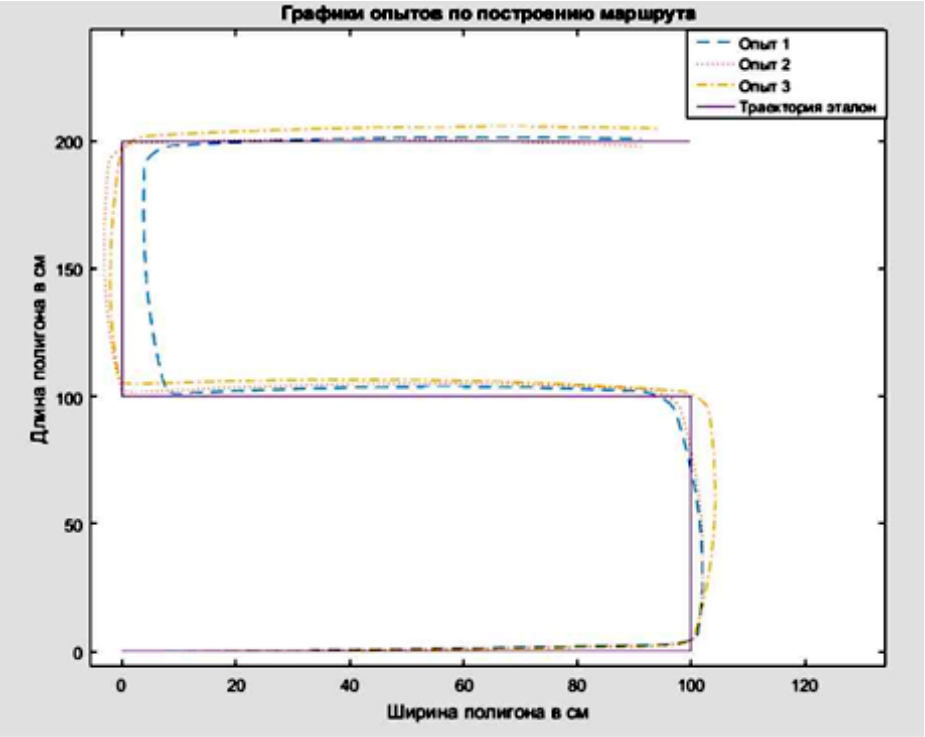


Рис. 2. Траектории движения беспилотного транспортного средства

ся точности позиционирования с ошибкой менее 5%, что удовлетворяет стандартным требованиям к системам автоматического управления. Для улучшения точности и универсальности задания маршрута для беспилотного транспортного средства будет проводиться модификация алгоритма, предложенного в этой статье.

Статья подготовлена по результатам работ, полученным в ходе выполнения проекта по конкурсу УМНИК 17–12 (б). М.: Автонет-2017.

Библиографический список

1. *Мартыненко Ю. Г.* Управление движением мобильных колесных роботов. Фундаментальная и прикл. матем. 2005. Т. 11. Вып. 8. С. 29–80.

2. *Farhan A.* Salem. Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots // International Journal of Current Engineering and Technology. P. 253–263.

УДК 004.942

Б. В. Лушников*
кандидат технических наук, доцент
И. В. Егельский*
студент
**Юго-Западный государственный университет, г. Курск*

НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА И НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РУЛЯ ВЫСОТЫ КОНВЕРТОПЛАНА СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА MATLAB/SIMULINK

Представлены результаты разработки системы автоматического управления электроприводом руля высоты конвертоплана, используемого для наблюдения за изменениями окружающей среды с низких высот. Приведены результаты настройки ПИД-регулятора и нечеткого регулятора, проанализированы графики переходного процесса.

Ключевые слова: *беспилотные летающие аппараты, конвертоплан, Fuzzy Logic, переходный процесс.*

B. V. Lushnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. V. Egelsky*
Stutent
**SouthWest State University, Kursk*

PID-CONTROLLER AND FUZZY CONTROLLER TUNING FOR THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ELEVATOR ELECTRIC DRIVE OF THE HELIPLANE BY USING MATLAB/SIMULINK

The paper presents the results of the development of the automatic control system for the height rudder of the tiltrotor used to monitor changes in the environment from low altitudes. The results of setting the PID controller and fuzzy controller are presented. The graphs of transient processes are analyzed.

Keywords: *unmanned flying vehicles, tiltrotor, Fuzzy Logic, transition process.*

Введение

Для контроля за окружающей средой часто применяются беспилотные летательные аппараты, к которым предъявляются достаточно жесткие требования по управляемости и маневренности [1–4]. К таковым могут быть отнесены и конвертопланы – летательные аппараты с поворотными винтами или поворотными крыльями, которые позволяют осуществлять вертикальный взлет и посадку, а в режиме полета развивать скорость, близкую к скорости самолета.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы автоматического управления приводами конвертоплана.

Рассмотрим разработку системы автоматического управления (САУ) электроприводом руля высоты. С помощью руля высоты осуществляется управление углом тангажа летательного аппарата. Располагаются они чаще всего на хвостовой части. При повороте руля высоты в положительном направлении образуется дополнительная аэродинамическая сила, опускающая хвостовую часть относительно центра тяжести на некоторый угол, а при повороте в отрицательном направлении – поднимающая хвостовую часть относительно центра тяжести конвертоплана. В качестве двигателя выберем двигатель RE 30 компании «Maxon motor» (рис. 2).

На рис. 3 представлена структурная схема САУ электропривода руля высоты конвертоплана, основанная на функциональной схеме (см. рис. 1).

Система автоматического управления приводом работает следующим образом: датчик, установленный на выходном валу редуктора, измеряет текущее положение и передает полученные данные через преобразователь на компаратор, в котором происходит их сравнение с задающий воздействием. Полученная ошибка в виде управляющего напряжения через ПИД-регулятор поступает на двигатель, приводящий в движение привод руля высоты. Средствами программного пакета MatLab/Simulink смоделируем САУ руля высоты конвертопла-

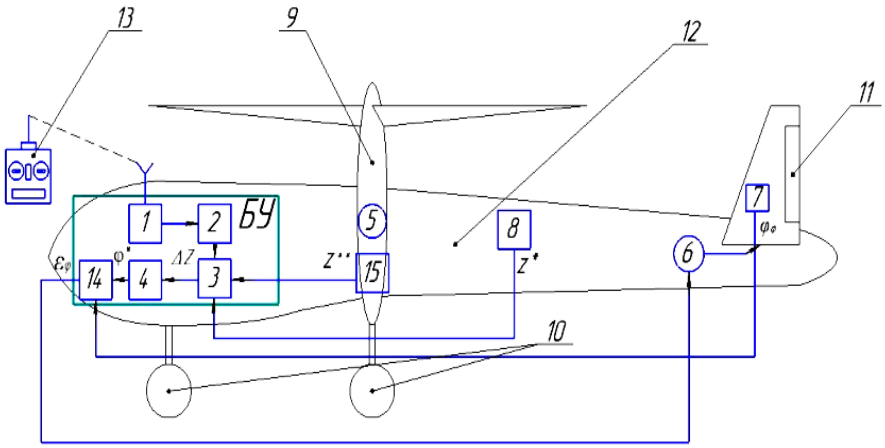
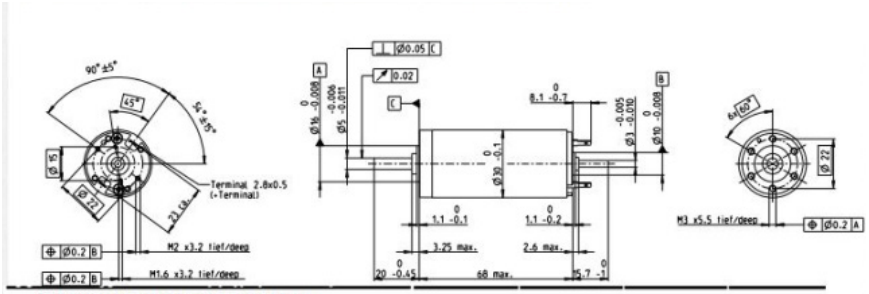


Рис. 1. Функциональная схема конвертоплана:
1 – приемник сигнала; 2 – дешифратор; 3 – блок сравнения; 4 – блок принятия решения; 5 – привод винтов; 6 – привод руля высоты; 7 – датчик положения руля высоты; 8 – альтиметр; 9 – винт; 10 – колесные шасси; 11 – руль высоты; 12 – корпус; 13 – пульт управления; 14 – блок сравнения; 15 – датчик положения винтов; БУ – блок управления



	Значения при номинальном напряжении					
1	Номинальное напряжение	В	6	9	12	18
2	Скорость холостого хода	об/мин	2870	3310	2870	3190
3	Ток холостого хода	мА	41.6	33.4	20.8	15.9
4	Номинальная скорость	об/мин	2450	2870	2420	2770
5	Номинальный момент (макс. длительный момент)	мНм	53	53	53	53
6	Номинальный ток (макс. длительный ток)	А	2.7	2.08	1.35	1
7	Пусковой момент	мНм	364	402	342	401
8	Пусковой ток	А	18.3	15.5	8.58	7.45
9	Макс. КПД	%	90	91	90	91
	Характеристики					
10	Сопротивление цепи ротора	Ом	0.378	0.63	1.45	2.47
11	Индуктивность цепи ротора	мГн	0.07	0.119	0.281	0.513
12	Моментная постоянная	мНм/А	19.9	25.9	39.8	53.8
13	Скоростная постоянная	об/мин/В	479	369	240	178
14	Крутизна механической характеристики	об/мин/мНм	9.1	8.97	8.71	8.14
15	Механическая постоянная времени	мс	3.42	3.14	3.02	2.96
16	Момент инерции ротора	гсм²	35.9	33.5	33.1	34.7

Рис. 2. Бесколлекторный электродвигатель RE 30 и его характеристики

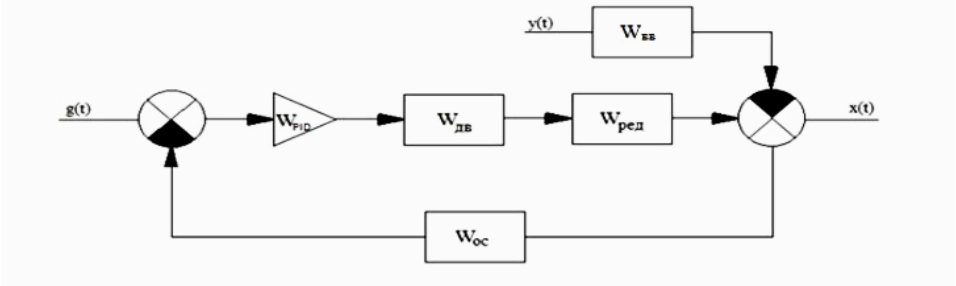


Рис. 3. Структурная схема САУ:
W_{PID} – передаточная функция PID-регулятора; Wдв – передаточная функция двигателя; Wред – передаточная функция редуктора; Wос – передаточная функция обратной связи; Wвв – передаточная функция возмущающего воздействия

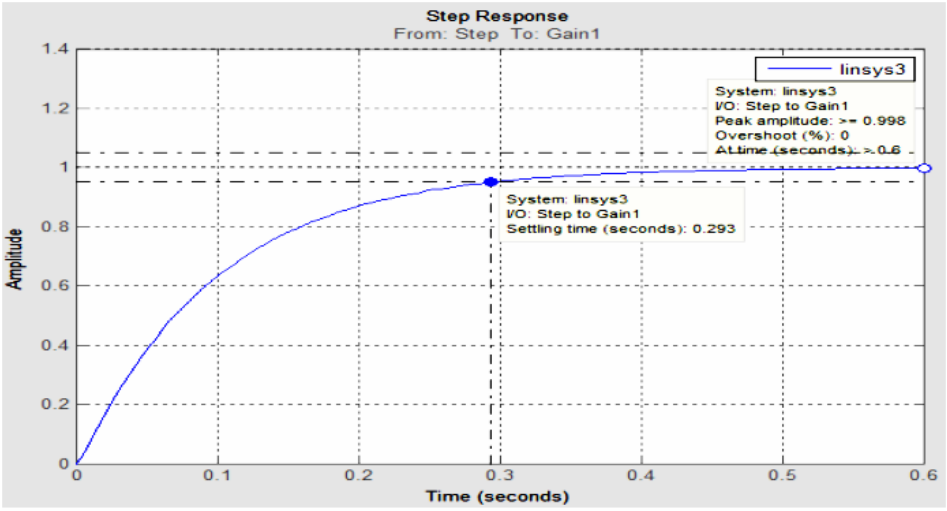


Рис. 4. График переходного процесса САУ

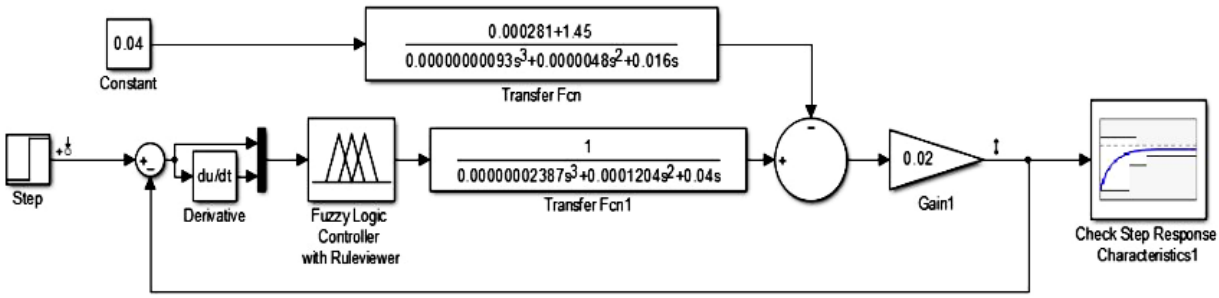


Рис. 5. Блок-схема для исследования нечеткого регулятора

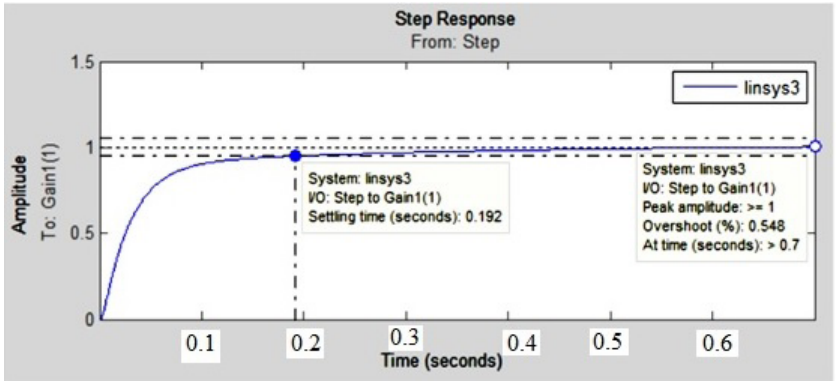


Рис. 6. График переходного процесса САУ с использованием нечеткого ПД-регулятора Fuzzy Logic

на, осуществляющую управление углом (блок-схема представлена на рис. 4), и настроим ПИД-регулятор. Данная САУ прошла проверку на устойчивость.

Произведем настройку нечеткого регулятора (Fuzzy Logic). С помощью программы MatLab/Simulink построим схему для исследования нечеткого регулятора, которая представлена на рис. 5.

Преобразуем четкие переменные в нечеткие, чтобы воспользоваться методом нечеткой логики. Такая операция называется фаззификацией. Зададим график функции принадлежности для выходных и входных переменных и введем для них термы. Сформируем правила для работы нечеткого регулятора, с помощью которых будем осуществлять управление напряжением. В результате настройки системы автоматического регулирования с помощью нечеткого регулятора и реализации процесса дефаззификации был получен график переходного процесса, представленный на рис. 6.

График переходного процесса является удовлетворительным для данной системы.

Заключение

Таким образом, была разработана САУ электроприводом руля высоты конвертоплана, настроены ПИД-регулятор и нечеткий ПД-регулятор (Fuzzy Logic) с помощью программы MatLab/Simulink. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что оба настроенных регулятора обеспечивают требуемое качество переходного процесса управления приводом руля высоты конвертоплана. А выбор конкретного варианта регулятора должен быть осуществлен после аппаратно-программной реализации и экспериментальной проверки.

Библиографический список

1. *Хохлов А. В., Лушников Б. В.* Проектирование системы автоматического управления приводами малогабаритного квадрокоптера // Теория. Практика. Инновации. 2017. № 11 (23). С. 38–45.

2. *Лушников Б. В., Дмитриев В. А., Антипов В. М.* Исследование влияния площади крыла робота-орнитоптера на силы аэродинамического сопротивления при вертикальном взлете // Молодежь и XXI век – 2018: Материалы VIII Междунар. молодежной научной конф. В 5 т.; отв. ред. А. А. Горохов. 2018. С. 159–163.

3. Modeling the motion of a flapping wing aerial vehicle / L. Vorochaeva, S Efimov, O. Loktionova et al. // MATEC Web of Conferences-2017. С. 02008.

4. Моделирование движения летательного аппарата с машущим крылом / Л. Ю. Ворочаева, С. В. Ефимов, О. Г. Локтионова и др. // Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 4. С. 603–616.

5. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003.

УДК 681.5

А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
С. Л. Морева**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский горный университет*

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КОРПУСАХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Микроминиатюризация конструкций радиоэлектронных устройств приводит к тепловой нагруженности. Печатная плата рассматривается в качестве теплового источника, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую. Ее элементы в нагруженном состоянии представляют источники, стоки и приемники тепловой энергии. Показан расчет тепловых режимов и характеристик печатных плат при кондуктивном теплообмене.

Ключевые слова: *печатная плата, тепловая энергия, теплообмен, теплопроводность, контроль, диагностика, расчет теплового потока, радиатор.*

A. L. Lyashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. L. Moreva**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg Mining University*

CONTROL OF THERMAL FIELDS IN CASES OF RADIO ELECTRONIC MEANS

Microminiaturization of the structures of electronic devices leads to thermal stress. A printed circuit board is considered as a heat source, in which electrical energy is converted into heat. Its loaded elements represent sources, sinks and receivers of thermal energy. The calculation of thermal conditions and characteristics of printed circuit boards with conductive heat transfer is presented.

Keywords: *printed circuit board, heat energy, heat transfer, thermal conductivity, monitoring, diagnostics, heat flow calculation, radiator.*

При разработке блоков радиоэлектронных средств (РЭС) немаловажную роль для правильного их функционирования играет обеспечение допустимых тепловых режимов. При тепловых расчетах блок рассматривается как сложная система тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных полей внутри блока невозможно из-за больших вычислительных трудностей и неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов и т. д. Поэтому при расчете теплового режима блоков РЭА используют приближенные методы анализа и расчета. Целью расчета является определение температур нагретой зоны или его отдельных элементов, размеры и виды радиаторов мощных полупроводниковых приборов, что требует знаний и навыков теплофизического конструирования блоков РЭС. При выполнении расчетов рекомендуется использовать пакеты прикладных программ, такие как Microsoft Office, MathCAD и др.

На стадии проектирования тепловой режим электронной аппаратуры определяется на основе метода поэтапного моделирования [1]. В соответствии с уровнями конструктивной иерархии используются тепловые модели различной степени детализации. Сначала рассчитываются ориентировочные средние температуры корпуса, нагретой зоны и воздуха внутри прибора. На следующем этапе совместно решаются задачи определения в каждом канале скорости и температуры протекающего воздуха и расчета средних температур печатных плат. Результаты, полученные на этом этапе, служат исходными данными при расчете температур электронных компонентов (ЭК) на исследуемой печатной плате. Приведенная в [1] методика расчета температур ЭК содержит приближенные аналитические решения для промежуточных величин (тепло-

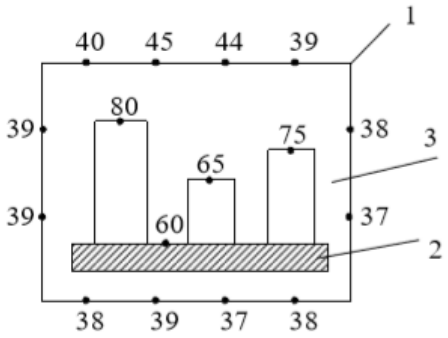


Рис. 1. Конструирование блока РЭС с крупными деталями

вых коэффициентов и фоновых температур), что увеличивает погрешность результатов.

Анализ тепловых полей РЭС путем математического описания – задача очень сложная. Практикой выработаны другие методы, когда анализ и решения задачи выполняются приближенными методами с большим количеством ограничений, условностей, допущений по отношению к реальному объекту. На определенном этапе проектирования это достигается путем замены реального блока его тепловой моделью (рис. 1), которая реализуется математически и адекватна изучаемому объекту [2].

На рис. 1 схематично представлена конструкция блока РЭС: корпус (1), шасси (2) с крупными радиоэлементами и среда (3), а также указана температура различных участков блока, что и является тепловой моделью блока. Плату или шасси с элементами в тепловой модели называют нагретой зоной. Недостаток такого схематичного изображения нагретой зоны состоит в том, что сложно рассчитать площадь поверхности, охватывающей зону нагрева. Для упрощения расчета площади поверхности нагретой зоны в тепловой модели ее представляют в соответствии с рис. 2 простейшей геометрической фигурой – прямоугольным параллелепипедом с определенными геометрическими параметрами.

Получаем более грубую, но удобную для расчета тепловую модель в виде системы двух тел:

1 – оболочка кожуха корпуса;

2 – нагретая зона в форме прямоугольного параллелепипеда.

Данная методика широко используется в настоящее время, но, как было отмечено, является приближенной и требует трудозатрат. Рассмотрение РЭА и печатных плат как объектов с распределенными параметрами позволит производить моделирование тепловых режимов более точно. Разработка математической модели на основе основных методов СРП даст возможность производить моделирование проектируемого изделия в различных условиях эксплуатации, которые могут быть заданы с указанием климатических и механических воздействий и их параметров.

При необходимости учета пространственной неравномерности температурного распределения температурное поле нагреваемого твердого тела в зависимости от времени и пространственных координат описывается дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных, известным под названием уравнения теплопроводности [3]. Оно может содержать дифференциальные операторы по пространственным переменным различного вида в зависимости от формы нагреваемого объекта и характера его перемещения в пространстве. В общем случае температурное поле $Q(x,y,z,t)$ описывается многомерным, нелинейным и неоднородным уравнением Фурье следующего вида:

$$c\rho\frac{\partial Q(x,y,z,t)}{\partial t} = div\left(\lambda grad Q(x,y,z,t)\right) - c\rho V grad Q(x,y,z,t) + F(x,y,z,t,Q).$$

Уравнение получается исходя из рассмотрения условий теплового баланса в элементарном объеме нагреваемого тела [4], где c, ρ, λ – теплофизические параметры нагреваемого материала соответственно, удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности, которые, вообще говоря, зависят от температуры; V – вектор скорости перемещения объекта в нагревательном агрегате; F – функция, характеризующая удельную мощность внутренних источников тепла.

В результате получено выражение теплопроводности:

$$\frac{\partial Q(x,y,z,t)}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial z^2}\right).$$

Используя данное уравнение, разрабатывается математическая модель для каждого элемента, расположенного на печатной плате, и для самой платы. Полученные уравнения отражают только общий характер протекающего процесса. Для составления полной математической модели объекта, которая соответствует рассматриваемой задаче, необходимо задание граничных условий, характеризующих: геометрическую форму и размеры объекта; физические свойства рассматриваемой среды (физические условия); распределение температур в нулевой момент времени (начальные условия); специфику процесса, протекающего на границах объекта, а также формулирующие условия теплообмена на границе соприкасающихся тел по закону теплопроводности, которые характеризуются равенством тепловых потоков, проходящих через

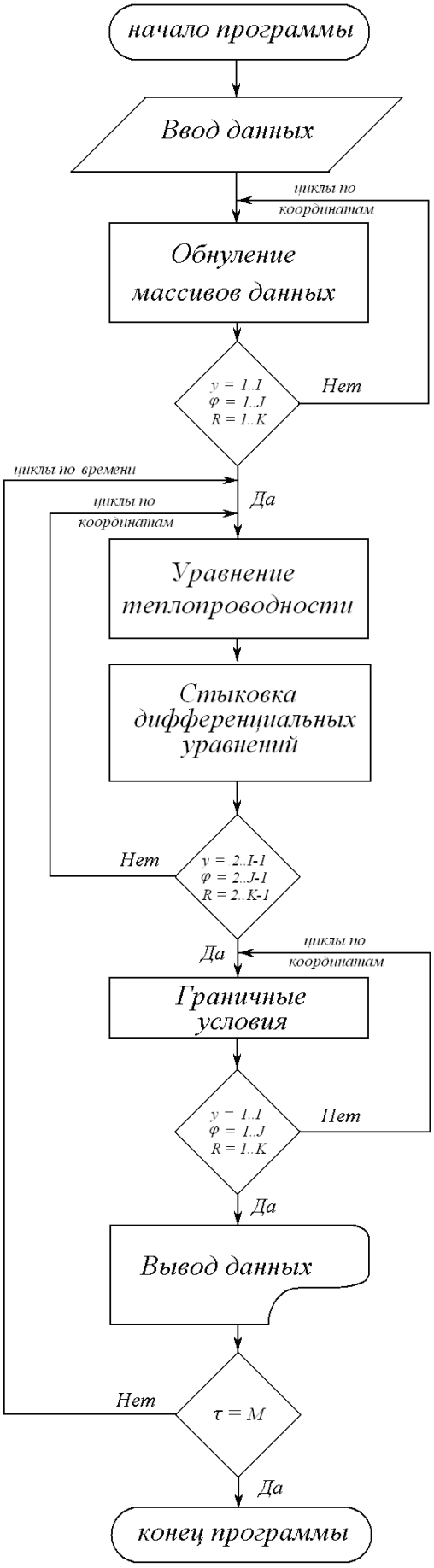


Рис. 2. Упрощенная блок-схема решения уравнений

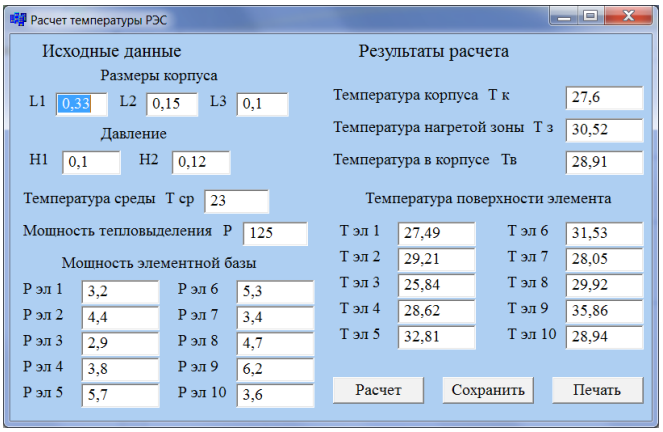


Рис. 3. Форма ввода исходных данных

поверхность контакта двух тел (условия сопряжения).

Для определения температурного поля печатной платы использован численный конечно-разностный метод; для моделирования тепловых полей объекта – вычислительная техника; для разработки программы – алгоритм решения математической модели, блок-схема которого представлена на рис. 2.

В качестве языка программирования выбран язык C++, а в качестве среды разработки C++ Builder. Язык C++ является продолжением языка C, в котором реализован наиболее полный механизм объектно-ориентированного программирования.

На рис 3. представлена форма ввода исходных данных, а именно геометрические размеры корпуса, давление среды вне корпуса блока и внутри корпуса блока, температура окружающей среды и мощность тепловыделения и результаты моделирования.

Результаты моделирования, полученные с помощью разработанного программного обеспечения, совпали с результатами, которые были рассчитаны с применением аналитических методов, используемых в настоящее время при проектировании электронных схем, и свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели [5]. Они могут быть отображены графическими средствами ПО или сохранены в файлы.

Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод, что предложенное ПО достаточно точно моделирует тепловые процессы, протекающие в радиоэлектронных схемах, и оно может быть применено с целью моделирования тепловых процессов в радиоаппаратуре.

Разработанная методика моделирования позволит проводить диагностирование физического состояния электронных схем на этапе проектирования, а также выявить возможные нарушения в их функционировании и прогнозировать варианты работы при различных возмущающих воздействиях.

Библиографический список

1. *Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В.* Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.

2. Конструирование радиоэлектронных устройств: лабораторный практикум / Образцов Н. С., Ткачук А. М., Смирнов Н. А. Минск: БГУИР, 2007. 35 с.

3. *Бутковский А. Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1979. 224 с.

4. *Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А.* Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2005. 550 с.

5. Конструирование блоков РЭС. Ч. I. Тепловой расчет блока РЭС: лабораторная работа / Сост.: Ю. Л. Муромцев, О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Е. Н. Яшин. Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т, 2009. 28 с.

УДК.681.5

А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

В представленной статье в качестве объекта управления рассматривается установка индукционного нагрева, которая используется для индукционного нагрева черных и цветных металлов. Для данного объекта разрабатывается адаптивная система управления, в которой будем использовать распределенный регулятор, реализующий пропорционально-интегральный закон управления. Полученные результаты показывают, что использование адаптивной системы на основе распределенного ПИ-регулятора позволяет существенно повысить быстродействие замкнутой системы управления.

Ключевые слова: *объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, адаптивная система, распределенный регулятор, средства контроля, автоматизация приборов контроля.*

A. L. Lyashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR AN INDUCTION FURNACE

In the presented article, the installation of induction heating, which is used for induction heating of ferrous and non-ferrous metals, is considered as a control object. An adaptive control system is being developed for this object, in which we will use a distributed controller that implements a proportional-integral control law. The results show that the use of an adaptive system based on a distributed PI controller can significantly increase the speed of a closed-loop control system.

Keywords: *objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, diagnostics, adaptive system, distributed controller, controls, automation of control devices.*

Введение

Во многих случаях динамические и статические свойства систем изменяются во времени, и регулятор с неизменной настройкой не может обеспечить оптимальный режим. Поэтому необходимо изменить установку задатчика или параметры каких-либо элементов, схему соединения элементов или ввести в действие новые элементы, такие как логические элементы, вычислительные машины и элементы автоматического поиска, что обуславливает создание автоматических систем со свойствами самонастройки или адаптации. В связи с этим в настоящие время развитие теории систем автоматического управления и ее практических приложений характеризуется интенсивной разработкой методов адаптивного управления. Такие методы служат для построения систем управления при значительной неопределенности параметров объекта управления и условий его функционирования (характеристик среды), имеющейся на стадии проектирования или до начала эксплуатации системы. Рассматриваются задачи управления, при которых динамические свойства объекта могут изменяться в широких пределах не известным заранее образом. Имеющейся начальной (*априорной*) информации недостаточно для построения систем управления с оптимальными (или заданными) показателями качества. В адаптивных системах управления недостаток априорной информации восполняется в процессе ее функционирования на основе текущих данных о поведении объекта. Эти данные обрабатываются в реальном масштабе времени (в темпе протекания управляемого процесса) и используются для повышения качества системы управления.

Применение принципов адаптации позволяет:

– обеспечить работоспособность системы в условиях значительного изменения динамических свойств объекта;

– произвести оптимизацию режимов работы объекта при изменении его параметров;

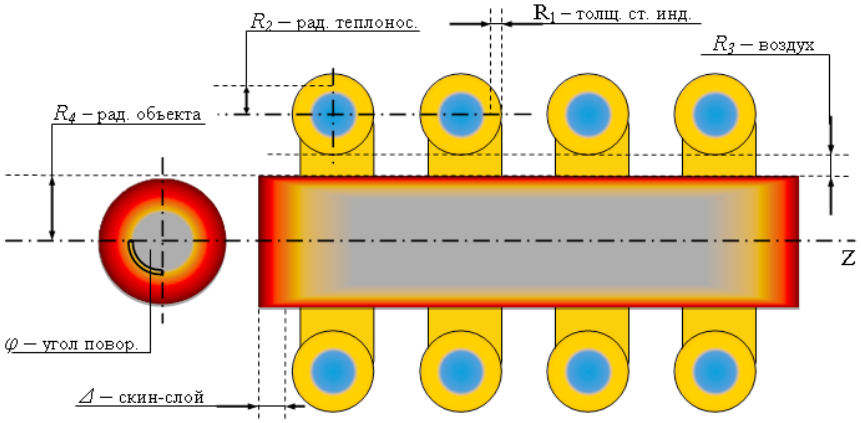


Рис. 1. Представление системы «индуктор – объект» в разрезе

– снизить технологические требования к изготовлению отдельных узлов и элементов системы;

– унифицировать отдельные регуляторы или блоки регуляторов, приспособив их для работы с различными видами однотипных объектов;

– сократить сроки конструкторских испытаний;

– повысить надежность системы.

Из-за недостаточности априорной информации при управлении объектами с переменными параметрами необходимо решать две задачи:

1 – изучать объект управления в процессе его функционирования с целью получения недостающей информации;

2 – управлять им. Причем задачу изучения объекта желательно совмещать с управлением. В этом случае управляющие воздействия $u(t)$ носят двойственный характер: они служат как средство управления оптимальным движением ОУ, так и средством его изучения. Такое управление получило название дуальное управление.

При построении оптимальных адаптивных систем управления для ОУ с переменными параметрами и переменными характеристиками сигналов внешних воздействий применяют принцип адаптивности.

Постановка задачи

В разрабатываемой адаптивной системе управления будем использовать распределенный регулятор [1], реализующий пропорционально-интегральный закон управления. Передаточная функция синтезируемого распределенного ПИ-регулятора согласно [3] имеет вид:

$$W(x,y,p)=E_1\cdot\left[\frac{n_1-1}{n_1}-\frac{1}{n_1}\nabla^2\right]+$$
$$+E_4\cdot\left[\frac{n_4-1}{n_4}-\frac{1}{n_4}\nabla^2\right]\cdot\frac{1}{p}, \qquad (1)$$

где E_1, E_4 – коэффициенты усиления; $\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$; n_1, n_4 – весовые коэффициенты.

Задача состоит в том, чтобы адаптировать коэффициенты регулятора (1) к изменяющимся коэффициентам объекта так, чтобы выполнялись следующие ограничения, наложенные на запасы устойчивости системы:

1) запасы по модулю $\Delta L\ge\Delta L_{зад}$;

2) запасы по фазе $\Delta\phi\ge\Delta\phi_{зад}$;

3) степень колебательности $m=m_{зад}$.

Описания объекта управления

В качестве объекта управления рассмотрим установку индукционного нагрева, которая используется для индукционного нагрева черных и цветных металлов. На рис. 1 представлена система «индуктор – объект» в разрезе.

Математическая модель объекта описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных.

Ниже представлен фрагмент математической модели исследуемого объекта.

Электромагнитное поле на объекте:

$$-J(x,y,z,t)=\frac{1}{\mu_a}\times$$
$$\times\left[\begin{array}{l}\frac{A(x-1,y,z,t)-2A(x,y,z,t)+A(x+1,y,z,t)}{\Delta x^2}+\\ +\frac{A(x,y-1,z,t)-2A(x,y,z,t)+A(x,y+1,z,t)}{\Delta y^2}+\\ \frac{A(x,y,z-1,t)-2A(x,y,z,t)+A(x,y,z+1,t)}{\Delta z^2}\end{array}\right]+$$
$$+\omega^2\cdot\varepsilon_a\cdot A(x,y,z,t). \qquad (2)$$

Электромагнитное поле на индукторе:

$$\Delta A(x,y,z,t)=\frac{\Delta t^2}{\varepsilon_a\mu_a}\times$$
$$\times\left[\frac{A(x-1,y,z,t)-2A(x,y,z,t)+A(x+1,y,z,t)}{\Delta x^2}+\right.$$

$$+\frac{A(x,y-1,z,t)-2A(x,y,z,t)+A(x,y+1,z,t)}{\Delta y^2}+$$
$$+\frac{A(x,y,z-1,t)-2A(x,y,z,t)+A(x,y,z+1,t)}{\Delta z^2}\Bigg]+$$
$$+\frac{J(x,y,z,t)}{\varepsilon_a}. \quad (3)$$

Температурное поле объекта в толщине скин-слоя:

$$\Delta T2(r_4,\phi,z,t)=a\Delta t\times$$
$$\times\Bigg[\frac{T(r_4-1,\phi,z,t)-2T(r_4,\phi,z,t)+T(r_4+1,\phi,z,t)}{\Delta r^2}+$$
$$+\frac{1}{r_4}\frac{T(r_4,\phi,z,t)-T(r_4-1,\phi,z,t)}{\Delta r}+$$
$$+\frac{1}{r_4}\frac{T(r_4,\phi-1,z,t)-2T(r_4,\phi,z,t)+T(r_4,\phi+1,z,t)}{\Delta\phi^2}+$$
$$+\frac{T(r_4,\phi,z-1,t)-2T(r_4,\phi,z,t)+T(r_4,\phi,z+1,t)}{\Delta z^2}\Bigg]+$$
$$+\frac{J^2(r_4,\phi,z,t)}{c\cdot\rho\cdot\sigma}. \quad (4)$$

Температурное поле на индукторе:

$$\Delta T2(r_2,\phi,z,t)=a\cdot\Delta t\times$$
$$\times\Bigg[\frac{T(r_2-1,\phi,z,t)-2T(r_2,\phi,z,t)+T(r_2+1,\phi,z,t)}{\Delta r^2}+$$
$$+\frac{1}{r_2}\frac{T(r_2,\phi,z,t)-T(r_2-1,\phi,z,t)}{\Delta r}+$$
$$+\frac{1}{r_2}\frac{T(r_2,\phi-1,z,t)-2T(r_2,\phi,z,t)+T(r_2,\phi+1,z,t)}{\Delta\phi^2}+$$
$$+\frac{T(r_2,\phi,z-1,t)-2T(r_2,\phi,z,t)+T(r_2,\phi,z+1,t)}{\Delta z^2}\Bigg]+$$
$$+\frac{J^2(r_2,\phi,z,t)}{c\cdot\rho\cdot\sigma}. \quad (5)$$

Температурное поле теплоносителя в катушке:

$$\Delta T1(r_1,\phi,z,t)=a\cdot\Delta t\times$$
$$\times\Bigg[\frac{T(r_1-1,\phi,z,t)-2T(r_1,\phi,z,t)+T(r_1+1,\phi,z,t)}{\Delta r^2}+$$
$$+\frac{1}{r_1}\frac{T(r_1,\phi,z,t)-T(r_1-1,\phi,z,t)}{\Delta r}+$$
$$+\frac{1}{r_1}\frac{T(r_1,\phi-1,z,t)-2T(r_1,\phi,z,t)+T(r_1,\phi+1,z,t)}{\Delta\phi^2}+$$
$$+\frac{T(r_1,\phi,z-1,t)-2T(r_1,\phi,z,t)+T(r_1,\phi,z+1,t)}{\Delta z^2}\Bigg]-$$
$$-\vartheta\cdot\frac{\partial T1}{\partial z}. \quad (6)$$

Температурное поле в воздушном зазоре и на объекте вне скин-слоя:

$$\Delta T3(r_3,\phi,z,t)=a\cdot\Delta t\times$$
$$\times\Bigg[\frac{T(r_3-1,\phi,z,t)-2T(r_3,\phi,z,t)+T(r_3+1,\phi,z,t)}{\Delta r^2}+$$
$$+\frac{1}{r_3}\frac{T(r_3,\phi,z,t)-T(r_3-1,\phi,z,t)}{\Delta r}+$$
$$+\frac{1}{r_3}\frac{T(r_3,\phi-1,z,t)-2T(r_3,\phi,z,t)+T(r_3,\phi+1,z,t)}{\Delta\phi^2}+$$
$$+\frac{T(r_3,\phi,z-1,t)-2T(r_3,\phi,z,t)+T(r_3,\phi,z+1,t)}{\Delta z^2}\Bigg]. \quad (7)$$

Разработка структуры распределенной адаптивной системы управления

Процесс адаптивного управления можно рассматривать как процесс взаимодействия трех подсистем:

– объекта;

– настраиваемого регулятора основного контура (собственно регулятора);

– блока адаптации.

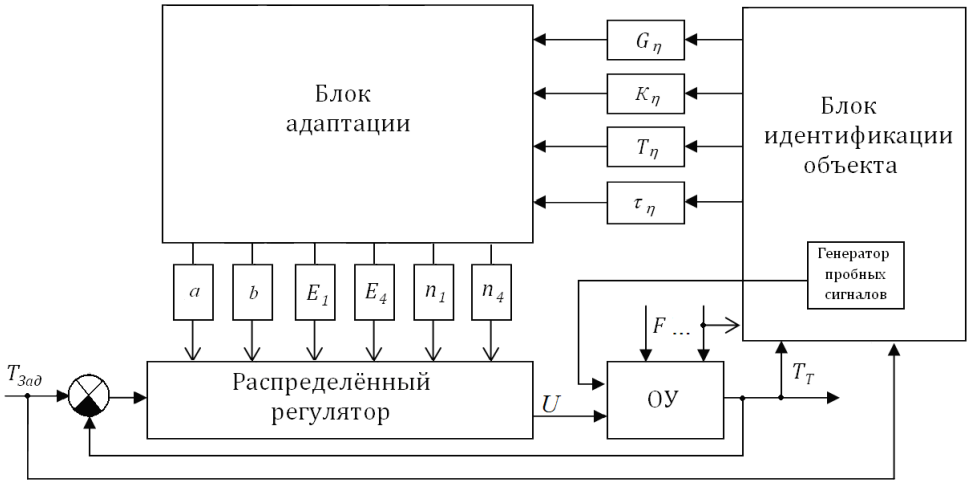


Рис. 2. Блок-схема адаптивной системы

Два последних блока объединяются в *адаптивный регулятор*, который имеет двухуровневую иерархическую структуру. Регулятор основного контура непосредственно формирует управляющее воздействие $u(t)$, поступающее на объект управления. Закон (алгоритм) управления в основном контуре зависит от некоторого набора *настраиваемых параметров* регулятора. Настройка этих параметров производится на втором уровне в соответствии с некоторым законом, называемым *алгоритмом адаптации*, на основе доступной текущей информации и без непосредственного использования значений параметров, априорно неизвестных.

На рис. 2 представлена блок-схема распределенной адаптивной системы управления.

Блок идентификации объекта

С помощью блока идентификации объекта управления определяем значения параметров K_η, T_η, τ_η по результатам численного моделирования.

Для этого генератор пробных сигналов формирует и подает на вход системы входное воздействие вида:

$$\alpha(x,y,p) = C_{\eta,\gamma}(s)Sin(\Psi_\eta \cdot x)\cdot Sin(\overline{\Psi}_\gamma \cdot y), \quad (8)$$

где $C_{\eta,\gamma} = e^{j\omega\tau}$; $\Psi_\eta = \pi\cdot\eta / x_l$; $\overline{\Psi}_\gamma = \pi\cdot\gamma / r_l$.

По результатам численного моделирования блок идентификации вычисляет по методике, представленной в [3], значения параметров K_η, T_η, τ_η, которые поступают на вход блока адаптации.

Блок адаптации

Блок адаптации вычисляет параметры регулятора в соответствии с методикой, изложенной в [5]. Для этого используются выражения:

$$K_П(G_\eta) = \frac{K_\eta}{T_\eta}\left[p_1 e^{-\tau_\eta/T_\eta} + p_2 T_\eta (1 - e^{-\tau_\eta/T_\eta})\right]; \quad (9)$$

$$K_И(G_\eta) = \frac{K_\eta}{T_\eta} p_2; \quad (10)$$

$$K_П(G_\eta) = E_1\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1}\cdot G_\eta\right]; \quad (11)$$

$$K_И(G_\eta) = E_4\left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4}\cdot G_\eta\right]. \quad (12)$$

Решая данные уравнения, определяем параметры E_1, n_1, E_4 и n_4, а также коэффициенты a и b

$$a = \frac{K_\eta}{T_\eta}\left[p_1 \frac{K_\eta}{T_\eta} - p_2 K_\eta\right]; b = \frac{K_\eta^{\,2}}{T_\eta} p_2.$$

Заключение

Для проверки полученных данных и моделирования замкнутой адаптивной системы управления было разработано с помощью Borland Delphi.7 специальное программное обеспечение, с помощью которого было выявлено, что применение адаптивной распределенной системы управления позволяет:

1) автоматически определять близкие к оптимальным настройки распределенного ПИ-регулятора;

2) вести процесс самонастройки при минимальном уровне пробного сигнала, не приводящего к нарушению нормального режима работы ОУ;

3) производить контроль процесса самонастройки и корректировки настроек со стороны оператора и в автоматическом режиме с целью исключения неустойчивой работы системы.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование адаптивной системы на основе распределенного ПИ-регулятора позволяет существенно повысить быстродействие замкнутой системы управления, а также добиться приемлемых показателей качества переходных процессов.

Библиографический список

1. *Першин И. М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск, РИА на КМВ. 2007. 244 с.

2. *Рапопорт Э. Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.

3. *Ляшенко А. Л.* Разработка методики синтеза оптимальных распределенных систем управления // Компоненты и технологии. 2013. № 2 (139). С. 122–124.

4. *Ляшенко А. Л.* Расчет настроек оптимального распределенного ПИ-регулятора // Материалы Международной молодежной научн. конф. «Математическая физика и ее приложения». Пятигорск: СКФУ. 2012. Т. 2. С. 35–37.

5. *Ляшенко А. Л.* Разработка адаптивной системы управления с распределенным ПИ-регулятором // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 1. С. 341–346.

УДК 681.5.015

И. М. Першин*
доктор технических наук, профессор
Т. В. Кухарова**
кандидат технических наук, ассистент
А. Л. Ляшенко****
кандидат технических наук, доцент
**Северо-Кавказский федеральный университет*
***Санкт-Петербургский горный университет*
****Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА СИНТЕЗА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрен пространственно-инвариантный распределенный объект, описываемый дифференциальным уравнением в частных производных. Осуществлено сравнение динамических характеристик непрерывной и дискретной моделей распределенного объекта. В работе показано, что если дискретные аналоги пространственных мод являются собственными векторами передаточной матрицы многомерного объекта, то данный объект может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных и является условно пространственно-инвариантным.

Ключевые слова: *объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, управление, пространственно-инвариантный объект, пространственная мода, комплексный передаточный коэффициент.*

I. M. Pershin*
Dr. Sc. Tech., Professor
T. V. Kukharova*
PhD Sc. Tech., Assistant
A. L. Lyashenko****
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**North-Caucasian Federal University*
***St. Petersburg Mining University*
****St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH OF THE POSSIBILITY AND CONDITIONS OF THE APPLYING OF THE FREQUENCY METHOD OF DISTRIBUTED SYSTEMS SYNTHESIS FOR MULTI-DIMENSIONAL OBJECTS

Considered spatially invariant distributed object described by differential equations in partial derivatives. Carried out a comparison of distributed object continuous and discrete models dynamic characteristics. The paper shows that if the discrete analogs of spatial modes are the eigenvectors of the multidimensional object transfer matrix, the object is conventionally spatially invariant and can be described by the differential equation in partial derivatives.

Keywords: *objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, spatial-invariant object, spatial mode, complex transfer coefficient.*

Поля различной природы и распределенные в пространстве объекты могут быть описаны дифференциальными уравнениями в частных производных. Если известны физические закономерности, определяющие распределенный объект управления, и рассчитанные на основе экспериментальных данных коэффициенты, такое описание позволяет получить информацию о состоянии поля или распределенного объекта в любой его точке. Но на практике закон, описывающий протекающие в объекте процессы, достаточно часто неизвестен, а измерению доступно ограниченное число точек объекта. В таком случае описание осуществляется передаточной матрицей, характеризующей влияние входных воздействий в каждой из точек дискретизации

на состояние объекта (управляемые параметры) в каждой из точек, то есть аналогично описанию многомерного сосредоточенного объекта. В данной работе приводится сравнение частотных характеристик непрерывной и дискретной моделей распределенного объекта, а также рассматривается условие, при котором многомерный сосредоточенный объект может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных.

Пусть имеется объект, описываемый дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = L\left(Y; \frac{\partial Y}{\partial x}; \ldots \frac{\partial^{n_1} Y}{\partial x^{n_1}}; \frac{\partial Y}{\partial y}; \ldots \frac{\partial^{n_2} Y}{\partial y^{n_2}}; \frac{\partial Y}{\partial z}; \ldots \frac{\partial^{n_3} Y}{\partial z^{n_3}} \right),$$

$$x, y, z \in V, \qquad (1)$$

где $Y(x, y, z, \tau)$ – фазовые переменные; x, y, z – пространственные координаты; τ – время; V – пространство изменения переменных; x, y, z; n_1, n_2, n_3 – заданные целые числа; L – линейный оператор [1].

Граничные условия для системы уравнений (1) полагаются однородными и заданы в виде:

$$\tilde{L}_{z,i}\left[Y(x,y,z,\tau) \right] = 0, \quad x,y,z \in \Gamma_{1,i}, \quad \left(i = \overline{1,n} \right),$$

$$\tilde{\tilde{L}}_{z,j}\left[Y_j\left(x, y, \overset{*}{z}_j, \tau \right), U_j(x,y,\tau) \right] = 0, \quad x,y \in \Gamma_{2,j}$$

$$\left(j = \overline{1,m} \right),$$

где $\tilde{L}_{z,i}, \tilde{\tilde{L}}_{z,j}$, $\left(i = \overline{1,n}; j = \overline{1,m} \right)$ – линейные операторы; $\Gamma_{1,i}, \Gamma_{2,j}$, $\left(i = \overline{1,n}; j = \overline{1,m} \right)$ – граничные подобласти пространства; V, n, m – заданные числа; $\overset{*}{z}_j$, $(j = \overline{1,m})$ – фиксированные значения координаты z; $U_j(x,y,\tau)$, $\left(j = \overline{1,m} \right)$ – входные воздействия [1].

Функциями выхода объекта являются значения фазовых переменных $Y\left(x, y, \overset{*}{z}, \tau \right)$ при фиксированных значениях $z = \overset{*}{z}$. Разложим входное воздействие в ряд Фурье и, подставив в описывающее объект уравнение, получим передаточные функции объекта по каждой из гармонических составляющих входного воздействия (по каждой моде входного воздействия) [2].

Затем построим дискретную модель объекта, описываемую матрицей передаточных функций, характеризующей влияние входного воздействия в каждой из точек дискретизации на формирование функции выхода в каждой из точек дискретизации. Такое описание распределенного объекта аналогично описанию многомерного сосредоточенного объекта. Осуществим частотный анализ данной модели и перейдем к матрице передаточных функций, характеризующих влияние каждой из входных пространственных мод на каждую моду выхода. Для пространственно-инвариантных объектов данная матрица является диагонально-доминантной.

Так как рассматриваемые модели являются описанием одного и того же объекта, ЛАФЧХ диагональных элементов матрицы передаточных функций по пространственным модам будут близки к ЛАФЧХ соответствующих комплексных передаточных коэффициентов.

Модальное представление распределенных объектов широко применяется при синтезе систем управления гидролитосферными объектами и процессами, при управлении тепловыми процессами, исследовании электромагнитных полей [2–8]. Применение данной методики для многомерных систем может позволить синтезировать регуляторы в случаях, когда исходная передаточная матрица объекта не является диагонально-доминантной [9], и более точно описать закономерности, которым подчиняется динамика объекта [10]. Проведенные исследования показывают, что условно пространственно-инвариантной является, в частности, основанная на параметрах накожной электропроводности модель динамики психического состояния человека [11–13].

В качестве примера рассмотрим двумерный распределенный пространственно-инвариантный объект, описываемый уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \right), \qquad (2)$$

где Y – измеряемый и подлежащий регулированию параметр; $\alpha = 0{,}1$ – коэффициент пропорциональности.

Граничные и начальные условия имеют вид:

$$Y(0,z,\tau) = Y\left(x_L, z, \tau \right) = 0, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial Y\left(x, z_L, \tau \right)}{\partial z} = 0, \qquad (4)$$

$$Y\left(x, 0, \tau \right) = U\left(x, \tau \right), \qquad (5)$$

$$Y\left(x, z, 0 \right) = 0. \qquad (6)$$

Примем $x_L = 6$, $z_L = 11$.

Функцией выхода является значения измеряемого параметра в точках $Y\left(x, z = \overset{*}{z}, \tau \right)$, где $\overset{*}{z}$ – заданное число ($0 < \overset{*}{z} < z_L$). Примем $\overset{*}{z} = 6$.

Разложим входное воздействие $U(x,\tau)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия (3),

входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x,\tau)=\sum_{\eta=1}^{\infty} C_\eta(\tau)\cdot\sin\left(\psi_\eta\cdot x\right),$$

где $$\psi_\eta=\pi\cdot{}^{\eta}\!/\!_{x_L}. \quad (7)$$

Реакцию объекта на каждую составляющую входного воздействия будем искать в виде:

$$Y_\eta(x,z,\tau)=H_\eta(z,\tau)\cdot\sin\left(\psi_\eta\cdot x\right). \quad (8)$$

Подставляя (3) в уравнение (2) и преобразуя, придем к следующему результату:

$$\frac{\dot H_\eta(z,\tau)}{\alpha}+H_\eta(z,\tau)\cdot\left(\psi_\eta^2\right)-\frac{\partial^2 H_\eta(z,\tau)}{\partial z^2}=0,$$

$$\left(\eta=\overline{1,\infty}\right). \quad (9)$$

Преобразуем (4) по Лапласу при нулевых начальных условиях:

$$-\frac{\partial^2\bar H_\eta(z,s)}{\partial z^2}+\left(\frac{s}{\alpha}+\psi_\eta^2\right)\cdot\bar H_\eta(z,s)=0,\ \left(\eta=\overline{1,\infty}\right), \quad (10)$$

где $\overline{H}_\eta(z,s)$ – изображение по Лапласу функции $H_\eta(z,\tau)$ при нулевых начальных условиях $\left(\eta=\overline{1,\infty}\right)$.

Решение уравнения (5) можно представить в виде:

$$\overline{H}_\eta(z,s)=D_{1,\eta}\cdot\exp\left(\beta_\eta\cdot z\right)+D_{2,\eta}\cdot\exp\left(-\beta_\eta\cdot z\right),$$

$$\left(\eta=\overline{1,\infty}\right), \quad (11)$$

где $\beta_\eta=\left(\frac{s}{\alpha}+\psi_\eta^2\right)^{1/2}$, $\left(\eta=\overline{1,\infty}\right)$.

Из граничных условий (4), (5) находим:

$$D_{1,\eta}=D_{2,\eta}; \quad (12)$$

$$D_{2,\eta}=\frac{\bar C_\eta(s)}{\exp\left(\beta_\eta\cdot z_L\right)+\exp\left(-\beta_\eta\cdot z_L\right)}\ \left(\eta=\overline{1,\infty}\right), \quad (13)$$

где $\bar C_\eta(s)$ – изображение по Лапласу функции $C_\eta(\tau)$ при нулевых начальных условиях $\left(\eta=\overline{1,\infty}\right)$.

Рассматривая совместно (11), (12), (13) с учетом (8), получим:

$$\bar Y_\eta(x,z,s)=$$

$$=\frac{\exp\left(\beta_\eta\cdot z\right)+\exp\left(-\beta_\eta\cdot z\right)}{\exp\left(\beta_\eta\cdot z_L\right)+\exp\left(-\beta_\eta\cdot z_L\right)}\cdot\bar C_\eta(s)\cdot\sin\left(\psi_\eta\cdot x\right), \quad (14)$$

где $\bar Y_\eta(x,z,s)$ – преобразованная по Лапласу функция $Y_\eta(x,z,\tau)$.

Передаточная функция объекта по η $\left(\eta=\overline{1,\infty}\right)$ моде входного воздействия имеет вид:

$$W_{0,\eta}(s)=\frac{\bar Y_\eta\left(x,z=\overset{*}{z},s\right)}{\bar C_\eta(s)\cdot\sin\left(\psi_\eta\cdot x\right)}=$$

$$=\frac{\exp\left(\beta_\eta\cdot\overset{*}{z}\right)+\exp\left(-\beta_\eta\cdot\overset{*}{z}\right)}{\exp\left(\beta_\eta\cdot z_L\right)+\exp\left(-\beta_\eta\cdot z_L\right)},$$

$$\left(\eta=\overline{1,\infty}\right). \quad (15)$$

Таким образом, рассматриваемый распределенный объект может быть представлен в виде совокупности передаточных функций $W_{0,\eta}(s)$ $\left(\eta=\overline{1,\infty}\right)$ по пространственным модам.

Найдем модуль и фазу передаточных функций объекта:

$$M(\omega)=\sqrt{\begin{array}{l}\left(\begin{array}{l}\exp\left(a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\cos\left(b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\cos\left(-b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\end{array}\right)^2+\\+\left(\begin{array}{l}\exp\left(a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\sin\left(b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\sin\left(-b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\end{array}\right)^2\end{array}}\Bigg/\sqrt{\begin{array}{l}\left(\begin{array}{l}\exp\left(a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\cos\left(b(\omega)\cdot z_L\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\cos\left(-b(\omega)\cdot z_L\right)\end{array}\right)^2+\\+\left(\begin{array}{l}\exp\left(a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\sin\left(b(\omega)\cdot z_L\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\sin\left(-b(\omega)\cdot z_L\right)\end{array}\right)^2\end{array}},$$

$$\varphi(\omega)=arctg\left(\begin{array}{l}\exp\left(a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\sin\left(b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\sin\left(-b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\\\hline\exp\left(a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\cos\left(b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)+\\+\exp\left(-a(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\cdot\cos\left(-b(\omega)\cdot\overset{*}{z}\right)\end{array}\right)-$$

$$-\operatorname{arctg}\left(\frac{\exp\left(a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\sin\left(b(\omega)\cdot z_L\right)+\exp\left(-a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\sin\left(-b(\omega)\cdot z_L\right)}{\exp\left(a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\cos\left(b(\omega)\cdot z_L\right)+\exp\left(-a(\omega)\cdot z_L\right)\cdot\cos\left(-b(\omega)\cdot z_L\right)}\right),$$

где

$$a(\omega)=\sqrt[4]{\psi^4+\frac{\omega^2}{\alpha^2}}\cdot\cos\left(\frac{1}{2}\cdot\operatorname{arctg}\left(\frac{\omega}{\alpha\cdot\psi^2}\right)\right);$$

$$b(\omega)=\sqrt[4]{\psi^4+\frac{\omega^2}{\alpha^2}}\cdot\sin\left(\frac{1}{2}\cdot\operatorname{arctg}\left(\frac{\omega}{\alpha\cdot\psi^2}\right)\right).$$

Построим амплитудную и фазовую характеристики передаточных функций по пространственным модам (на рис. 1, 2 в качестве примера приведены частотные характеристики по первой пространственной моде).

Построим дискретную модель рассматриваемого объекта. Число точек дискретизации выберем 5 по оси x и 10 по оси z. Параметры Δx и Δy примем равными единице. Точки с координатами ($\Delta x{\cdot}k$; $z=0$) рассмотрим как входы объекта (k – номер точки дискретизации), точки с координатами ($\Delta x{\cdot}k$; $z=z^*$) – как параметры выхода.

Реализуем модель объекта на языке программирования Паскаль. Подадим поочередно на каждый вход единичное входное воздействие.

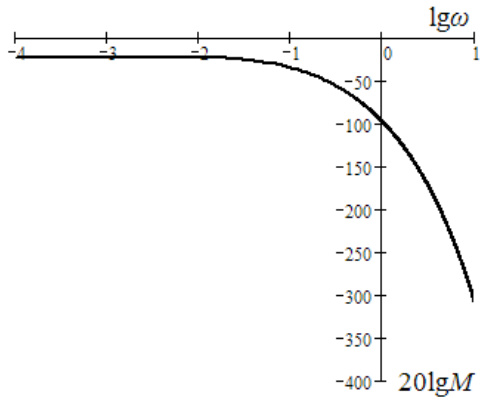


Рис. 1. ЛАЧХ передаточной функции объекта по 1-й пространственной моде

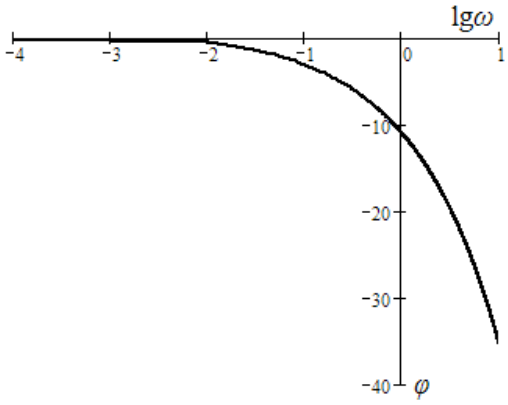


Рис. 2. ЛФЧХ передаточной функции объекта по 1-й пространственной моде

Динамику параметров выхода аппроксимируем как апериодические звенья с чистым запаздыванием. В результате получим матрицу передаточных функций объекта, характеризующую влияние каждого из входных воздействий на каждый выходной параметр:

$$W_1=\begin{pmatrix}0.00907205\cdot w_{ij} & 0.01310254\cdot w_{ij} & 0.01249946\cdot w_{ij} & 0.00923515\cdot w_{ij} & 0.00480862\cdot w_{ij}\\ 0.01310254\cdot w_{ij} & 0.02157151\cdot w_{ij} & 0.02233769\cdot w_{ij} & 0.01730808\cdot w_{ij} & 0.00923515\cdot w_{ij}\\ 0.01249946\cdot w_{ij} & 0.02233769\cdot w_{ij} & 0.02638013\cdot w_{ij} & 0.02233769\cdot w_{ij} & 0.01249946\cdot w_{ij}\\ 0.00923515\cdot w_{ij} & 0.01730808\cdot w_{ij} & 0.02233769\cdot w_{ij} & 0.02157151\cdot w_{ij} & 0.01310254\cdot w_{ij}\\ 0.00480862\cdot w_{ij} & 0.00923515\cdot w_{ij} & 0.01249946\cdot w_{ij} & 0.01310254\cdot w_{ij} & 0.00907205\cdot w_{ij}\end{pmatrix},$$

где $w_{ij}=\dfrac{1}{T_{ij}\cdot s+1}\cdot e^{-\tau_{ij}s}$.

Коэффициенты $T_{i,j}$ и $\tau_{i,j}$ передаточной матрицы объекта приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Матрица постоянных времени $T_{i,j}$ апериодических звеньев, аппроксимирующих дискретную модель рассматриваемого объекта

№ входа	№ выхода				
	1	2	3	4	5
1	41	46	48,5	50	51
2	46	47	49	49,5	50
3	48,5	49	50	49	48,5
4	50	49,5	49	47	46
5	51	50	48,5	46	41

Таблица 2

Матрица параметров чистого запаздывания $\tau_{i,j}$ апериодических звеньев, аппроксимирующих дискретную модель рассматриваемого объекта

№ входа	№ выхода				
	1	2	3	4	5
1	10	13	16	19	22
2	13	12	15	18	19
3	16	15	14	15	16
4	19	18	15	12	13
5	22	19	16	13	10

Используя полученную матрицу передаточных функций, реализуем модель дискретного объекта на языке программирования Pascal.

Исследуем дискретную модель рассматриваемого объекта. Подадим на вход дискретные аналоги пяти пространственных мод. Величина воздействия j-й моды на каждый вход (точку дискретизации) определяется по формуле:

$$Q_{ij} = \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot j}{L}\right),$$

где $i = \Delta x \cdot k$ – номер входа. (16)

Реакцию функций выхода в определенные моменты времени (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 175, 300, 500, 1000 с) разложим в ряд Фурье по пяти пространственным модам:

$$Y_k(t) = \sum_{j=1}^{5} b_j(t) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot j}{L}\right),$$

где k – номер выхода; $b_j(t)$ – коэффициент усиления амплитуды колебаний по j-й пространственной моде в момент времени t.

$$b_j(t) = \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{5} Y_k(t) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot j}{L}\right). \qquad (17)$$

Построим графики динамики коэффициентов усиления по пространственным модам (рис. 3–7):

Матрица передаточных функций по пространственным модам будет иметь вид:

$$\tilde{W}_1 = \begin{pmatrix} 0{,}077568 \cdot \tilde{w}_{ij} & 1{,}1 \cdot 10^{-16} \cdot \tilde{w}_{ij} & -3{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot \tilde{w}_{ij} & 5{,}1 \cdot 10^{-17} \cdot \tilde{w}_{ij} & 1{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot \tilde{w}_{ij} \\ -9{,}5 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} & 0{,}008131 \cdot \tilde{w}_{ij} & 2{,}3 \cdot 10^{-17} \cdot \tilde{w}_{ij} & -1{,}5 \cdot 10^{-17} \cdot \tilde{w}_{ij} & 1{,}4 \cdot 10^{-17} \cdot \tilde{w}_{ij} \\ 8{,}0 \cdot 10^{-19} \cdot \tilde{w}_{ij} & -3{,}0 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} & 0{,}001381 \cdot \tilde{w}_{ij} & 5{,}8 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} & -4{,}4 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} \\ -1{,}4 \cdot 10^{-19} \cdot \tilde{w}_{ij} & 3{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot \tilde{w}_{ij} & -1{,}1 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} & 0{,}000396 \cdot \tilde{w}_{ij} & 2{,}5 \cdot 10^{-18} \cdot \tilde{w}_{ij} \\ 1{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot \tilde{w}_{ij} & -5{,}9 \cdot 10^{-20} \cdot \tilde{w}_{ij} & 3{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot \tilde{w}_{ij} & -5{,}5 \cdot 10^{-19} \cdot \tilde{w}_{ij} & 0{,}000190 \cdot \tilde{w}_{ij} \end{pmatrix},$$

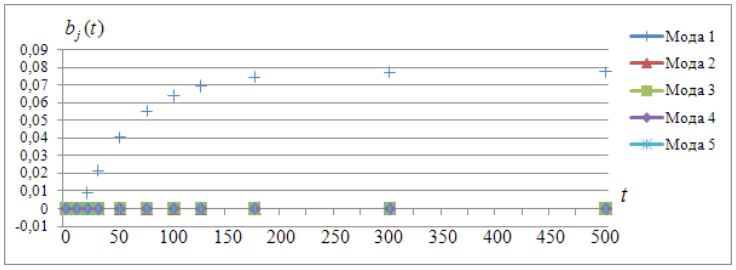


Рис. 3. Динамика коэффициентов усиления по составляющим функцию выхода пространственным модам при подаче на вход 1-й пространственной моды

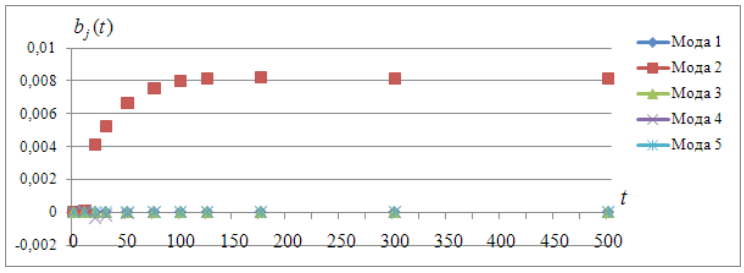


Рис. 4. Динамика коэффициентов усиления по составляющим функцию выхода пространственным модам при подаче на вход 2-й пространственной моды

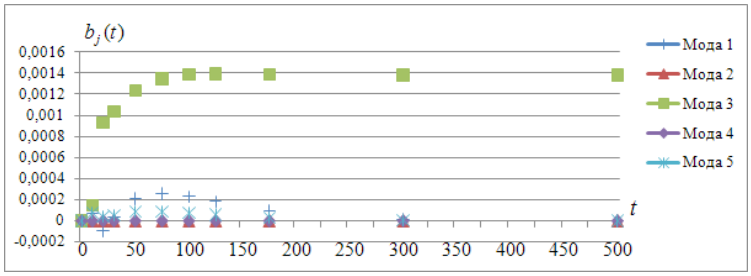


Рис. 5. Динамика коэффициентов усиления по составляющим функцию выхода пространственным модам при подаче на вход 3-й пространственной моды

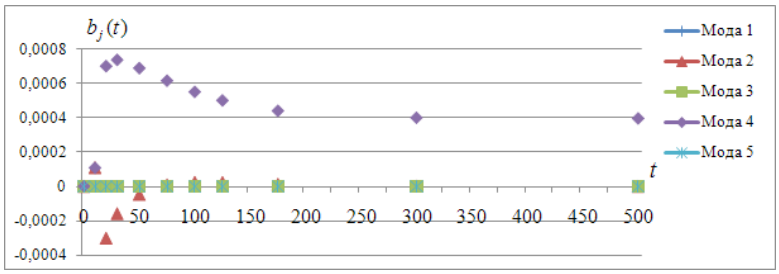


Рис. 6. Динамика коэффициентов усиления по составляющим функцию выхода пространственным модам при подаче на вход 4-й пространственной моды

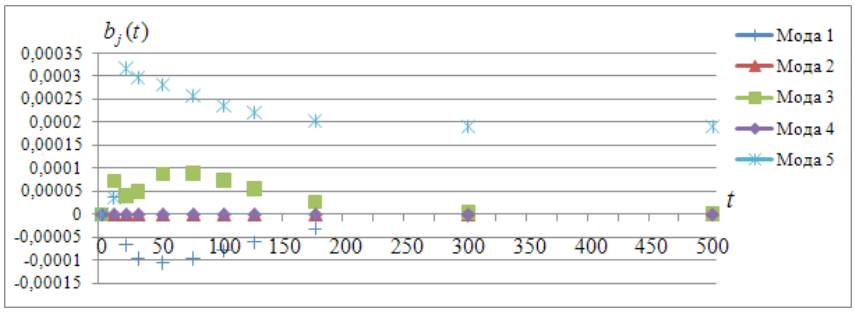


Рис. 7. Динамика коэффициентов усиления по составляющим функцию выхода пространственным модам при подаче на вход 5-й пространственной моды

где $\tilde{w}_{ij}$ – функции от s, характеризующие динамику объекта по j-й составляющей выхода при подаче на вход i-й пространственной моды.

Данная матрица близка к диагонально-доминантной. Аппроксимируем диагональные элементы передаточной матрицы в соответствии с графиками динамики коэффициентов усиления объекта по пространственным модам как апериодические звенья с чистым запаздыванием.

Тогда

$$\tilde{w}_{11} = \frac{1}{59 \cdot s + 1} \cdot e^{-13s}; \; \tilde{w}_{22} = \frac{1}{20 \cdot s + 1} \cdot e^{-10s};$$

$$\tilde{w}_{33} = \frac{1}{11 \cdot s + 1} \cdot e^{-9s}; \; \tilde{w}_{44} = \frac{1}{5 \cdot s + 1} \cdot e^{-7s};$$

$$\tilde{w}_{55} = \frac{1}{5 \cdot s + 1} \cdot e^{-4s}.$$

Построим частотные характеристики передаточных функций по пространственным модам (на рис. 8, 9 в качестве примера приведены частотные характеристики по первой пространственной моде).

Как видно из рис. 1–2 и рис. 8–9, частотные характеристики комплексных передаточных коэффициентов объекта по пространственным модам, полученных при исследовании (частотном анализе) модели объекта, описываемой дифференциальным уравнением в частных производных, близки к частотным характеристикам передаточных функций объекта по пространственным модам, полученным при анализе модели

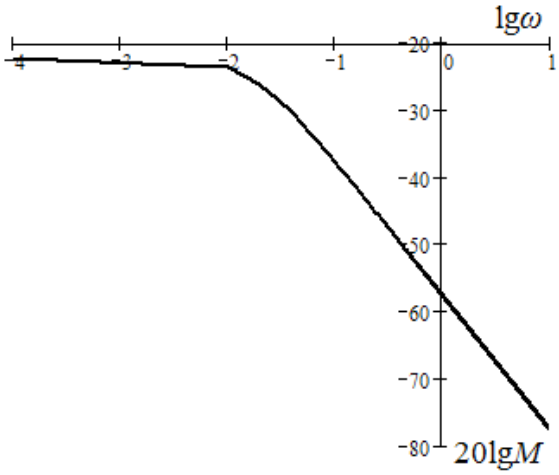


Рис. 8. ЛАЧХ аппроксимированной передаточной функции по первой пространственной моде

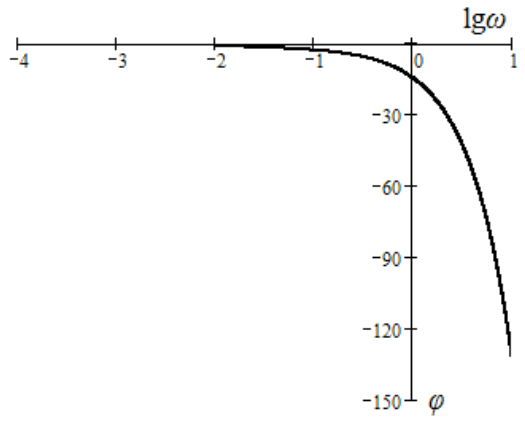


Рис. 9. ЛФЧХ аппроксимированной передаточной функции по первой пространственной моде

данного объекта, описываемой матрицей передаточных функций по каждой паре вход-выход.

Получено, что динамические характеристики многомерного сосредоточенного объекта совпадают с характеристиками дискретного аналога распределенного объекта. При этом дискретные аналоги пространственных мод являются собственными векторами передаточной матрицы многомерного объекта. В этом случае многомерный объект может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных и является условно пространственно-инвариантным, к которому применимы методы синтеза, разработанные для распределенных систем.

Библиографический список

1. *Першин И. М.* Распределенные системы обработки информации. Пятигорск: РИА-КМВ, 2008. 146 с.

2. *Малков А. В., Першин И. М.* Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476 с.

3. *Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И.* Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 8. С. 123–137.

4. *Першин И. М., Малков А. В., Криштал В. А.* Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. 2013. № 1. С. 17–23.

5. *Першин И. М., Малков А. В., Цаплева В. В.* Технологическая безопасность эксплуатации гидроминеральных источников // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 4 (129). С. 25–31.

6. *Першин И. М., Малков А. В., Дубогрей В. Ф.* Методика синтеза распределенных систем управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2012. № 2. С. 76–81.

7. *Drovosekova T. I., Zhernosek I. A.* Modeling of hydrolithospheric processes from the Caucasian Mineralnye Vody region // In the World of Scientific Discoveries, Series B. 2013. Т. 1. № 1. С. 44–52.

8. Карбидокремниевый нагревательный элемент с импульсными секционными нагревателями / Ю. В. Ильюшин, Д. А. Первухин, И. М. Першин, А. Б. Чернышев // Патент на полезную модель RUS 132938 06.05.2013.

9. *Кухарова Т. В.* Система оценки психического состояния человека и моделирование процесса лечения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 10 (159). С. 15–24.

10. О возможности применения методов теории управления в решении задач восстановительной медицины / И. В. Боев, И. М. Першин, В. А. Уткин и др. // Курортная медицина. 2014. № 3. С. 76–84.

11. *Кухарова Т. В.* Разработка системы диагностики психического состояния человека // Материалы конференции Информационные технологии в управлении. СПб.: ОАО Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2012. С. 612–618.

12. *Кухарова Т. В.* Управление «фазовым» состоянием человеческого организма // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 9 (134). С. 31–34.

13. Дифференциация экзогенных, эндогенных и психогенных психических расстройств на основе электродермальной активности / С. А. Ягода, С. В. Золотарев, О. И. Боев и др. // Психическое здоровье. 2011. № 10 (65). С. 77–80.

УДК 681.5

И. М. Першин*
доктор технических наук, профессор
А. Л. Ляшенко**
кандидат технических наук, доцент
**Северо-Кавказский федеральный университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ

В статье представлен анализ рынка по производству электроэнергии. Рассмотрены проблемы и возможные пути их решения. В качестве одного из возможных вариантов решения проблемы рассмотрен паровой котел как сложная система, для анализа которой применен метод многоуровневой декомпозиции. Разработана методика моделирования объектов с распределенными параметрами, дающая возможность проводить детальный анализ тепловых процессов, протекающих в котлах и в парогенераторах.

Ключевые слова: *топочная камера, экранные трубы, объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, программно-техническое обеспечение, средства контроля, автоматизация приборов контроля.*

I. M. Pershin*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. L. Lyashenko**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**North-Caucasian Federal University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DIAGNOSTICS AND CONTROL OF THERMAL PROCESSES IN STEAM BOILERS

The article presents an analysis of the market for the production of electricity. The problems and possible solutions are considered. As one of the possible solutions to the problem, the steam boiler was considered as a complex system, for the analysis of which a multi-level decomposition method was applied. A method for modeling objects with distributed parameters has been developed. The developed method makes it possible to carry out a detailed analysis of thermal processes occurring in boilers and steam generators.

Keywords: *combustion chamber, screen tubes, objects with distributed parameters, differential equation, simulation, control, diagnostics, software and hardware, controls, automation of control devices.*

В настоящее время энергетика представляет собой базовую отрасль экономики России, которая обеспечивает электрической энергией внутренние потребности народного хозяйства, и кроме того, осуществляет экспорт электричества в страны ближнего и дальнего зарубежья.

Электроэнергия вырабатывается на электростанциях различных типов: тепловых, гидравлических, атомных, а также на установках, использующих так называемые нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ). Основным типом электростанций являются тепловые электростанции. Среди НВИЭ наибольшее распространение в мире получили солнечные, ветровые, геотермальные электростанции, установки, работающие на биомассе и твердых бытовых отходах.

Основу производственного потенциала электроэнергетики России составляют электростанции общего пользования, на них приходится более 90% генерирующих мощностей. В структуре мощностей электростанций общего пользования лидируют паротурбинные ТЭС (рис. 1).

Как показывает анализ, многие электростанции характеризуется недостаточной эффективностью, что вызвано моральным и физическим старением их оборудования. Многие системы требуют модернизации или замены на принципиально новые.

В связи с этим основными направлениями развития в электроэнергетике являются:

– совершенствование эффективности парогазового цикла и увеличение на этой основе производства энергии;

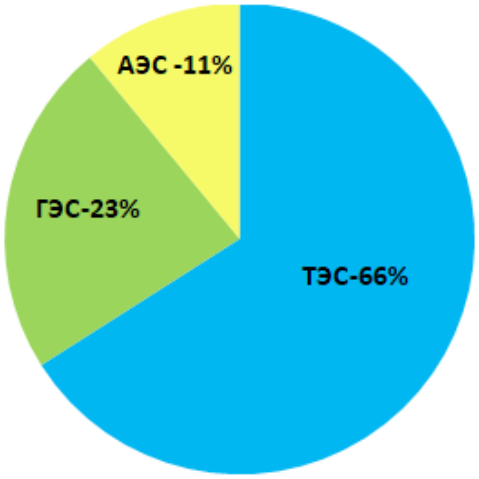


Рис 1. Структура генерирующих мощностей электроэнергетики

– расширение использования высокоэффективного комбинированного производства электрической и тепловой энергии;

– внедрение экологически чистых технологий на тепловых электростанциях;

– повышение КПД и снижение себестоимости производства энергии на энергетических установках малой и средней мощности, работающих на НВИЭ, а также использованием топливных элементов.

Реализация первого направления возможна путем разработки новых методов управления технологическими процессами, протекающими в паровом котле теплоэлектростанции.

Рассмотрим паровой котел как сложную систему, для анализа которой применим метод многоуровневой декомпозиции, широко используемый в системном анализе. Процедуру декомпозиции можно провести различными путями в зависимости от функций частей, конструкции системы, технологических процессов, протекающих в объекте, и т. д. В значительной мере способ декомпозиции определяется исследователем сложной системы. Декомпозиция производится до тех пор, пока не будут определены подсистемы самого низкого (нулевого) уровня. В случае математического моделирования непрерывных объектов модели подсистем нулевого уровня описываются системами дифференциальных [1]. Рассмотрим декомпозицию котла, где отдельно выделим декомпозицию парогенератора (рис. 2).

Нулевой уровень представляет собой результат формальной декомпозиции, отражающей применение метода конечных элементов. Выделено множество секций, процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями.

Первый уровень представляет собой подсистемы, полученные в результате раздельного рассмотрения зоны подогрева воды и двух зон испарения в экранных трубках парогенератора. На этом уровне декомпозиция отражает разли-

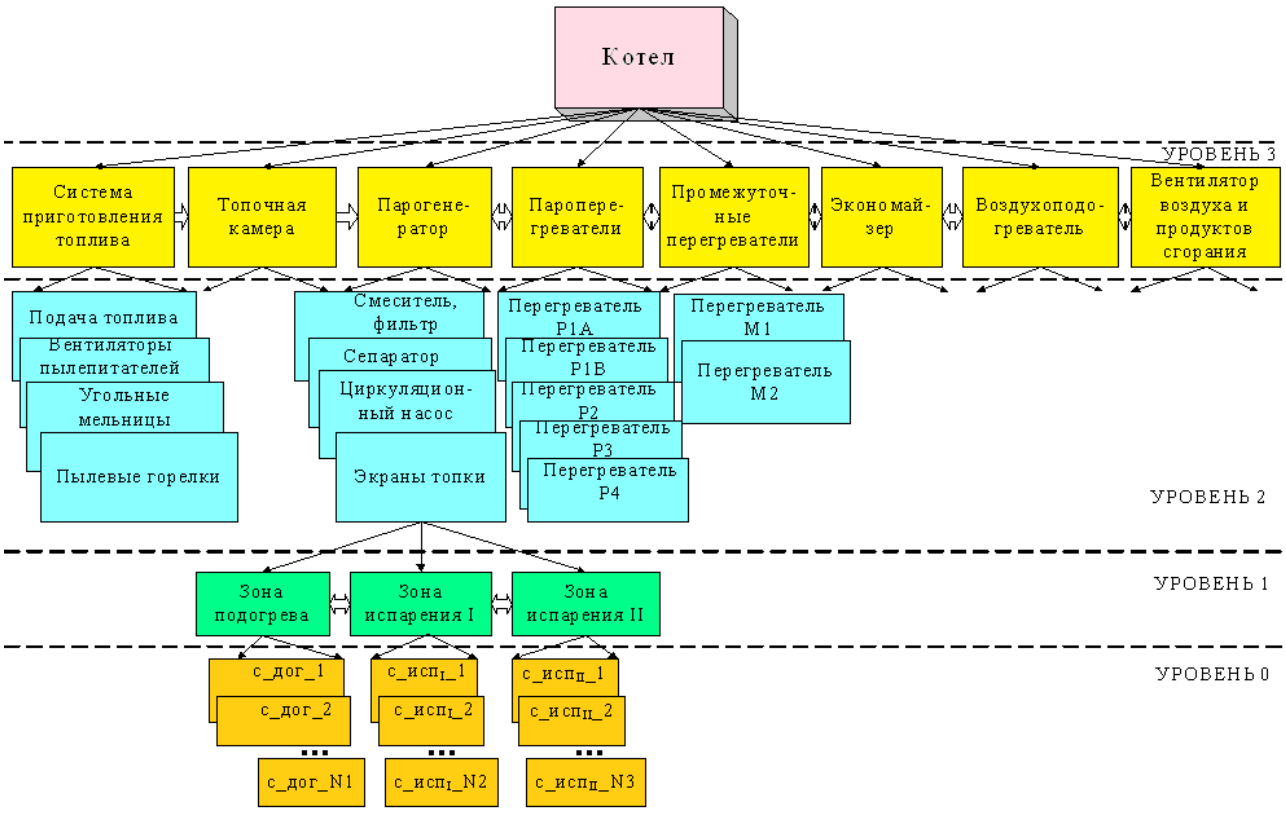


Рис. 2. Декомпозиция котла

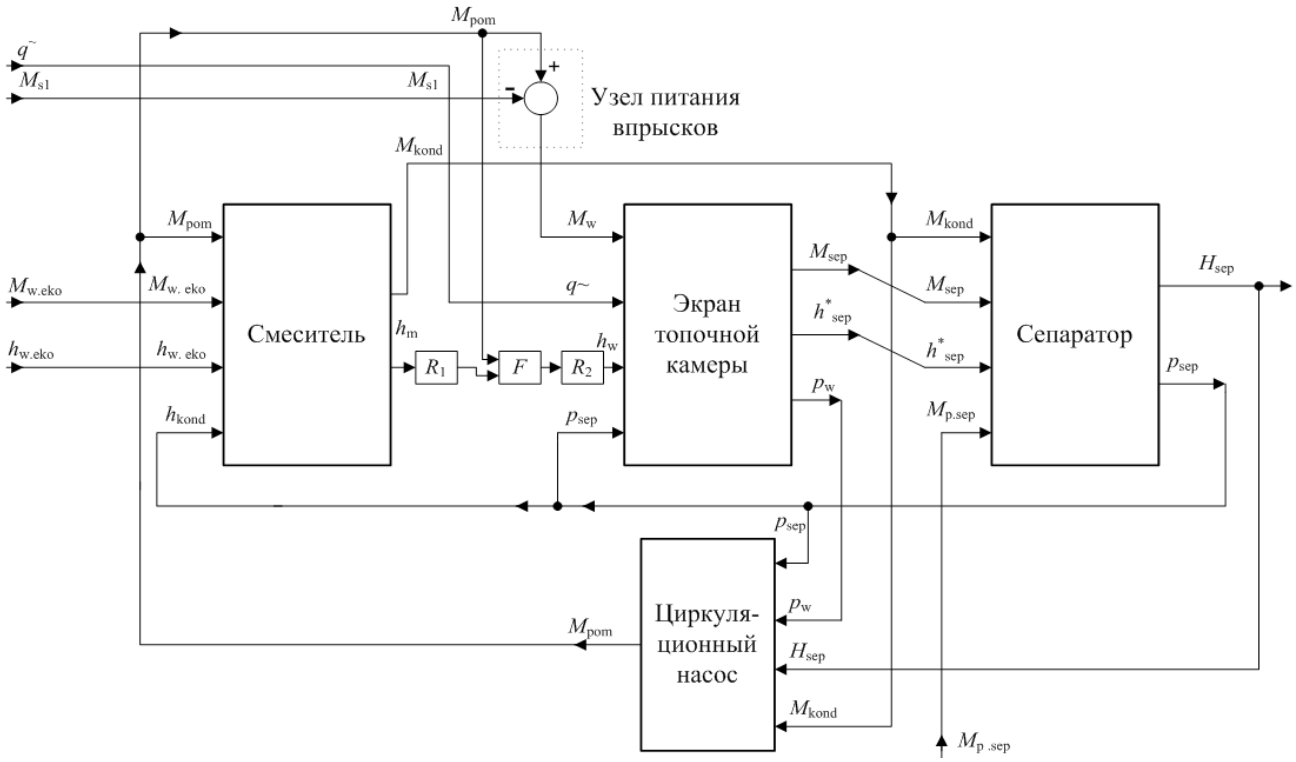


Рис. 3. Структура модели парогенератора котла

чие законов природы, которым подчиняются рассматриваемые явления.

Второй уровень представляет собой декомпозицию парогенератора и содержит: смеситель, экран топочной камеры, сепаратор, узел питания впрыскивающих пароохладителей, соединительные трубопроводы.

На третьем уровне иерархии системы парогенератор взаимодействует с другими подсистемами котла [2].

Используя диаграммы декомпозиции, разработаем модели узлов и агрегатов системы, которые можно описать перечислением векторов входа ${U_2}^i$ и выхода ${Y_2}^i$ и операторов подсистем ${F_2}^i$. На рис. 3 показана структура модели парогенератора.

В последующем применяется программа MATLAB/Simulink, которая дает возможность обрабатывать информацию о многоуровневых моделях в наглядной графической форме на языке графического редактора Simulink. Программа позволяет моделировать нелинейные системы, системы с дискретным временем, логические блоки, а также их гибриды. Ее возможности далее используются для создания, анализа и компьютерной имитации весьма сложных моделей парогенераторов.

Разработанная методика позволяет проводить детальный анализ технологических процессов, протекающих в котлах и в парогенераторах. Полученные результаты дают возможность осуществлять разработку новых принципов управления с применением новых алгоритмов управления, в том числе и с использованием распределенных высокоточных регуляторов [3, 4].

Библиографический список

1. *Смирнов О. К.* Математическое моделирование переходных процессов в паровых котлах: уч. пособие. М.: МЭИ, 1989.

2. *Станиславски В., Имаев Д. Х.* Динамические модели прямоточных парогенераторов как объектов управления иерархической структуры // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России. СПб.: СПбГПУ, 2002. С. 202–213.

3. *Ляшенко А. Л.* Синтез распределенной системы управления тепловыми полями в парогенераторных установках // Сб. трудов 7-й Всероссийской научной конференции Системный синтез и прикладная синергетика. Таганрог: ЮФУ, 2015. С. 131–138.

4. *Ляшенко А. Л.* Математическая модель тепловых процессов парового котла теплоэлектростанции // Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2018. С. 100–110.

УДК 681.532.55

Д. С. Положенцев*
инженер 1 категории, ассистент
**АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УПРАВЛЯЮЩЕГО ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

В статье рассмотрены вопросы проектирования электропривода управляющего двигателя-маховика с повышенными требованиями к погрешности реализации управляющего момента. Представлена структурная схема электропривода с обратной связью по скорости. Приведено математическое описание основных составных частей электропривода, представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: *управляющий двигатель-маховик, система управления угловой скоростью, система управления угловым ускорением, обратная связь по скорости, электропривод.*

D. S. Polozhentcev*
Engineer of the 1st Category, Assistant
**Joint-stock Company «Command Devices Reseach Institute», St-Peterburg; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGN AND SIMULATION OF REACTION FLYWHEEL ELECTRIC DRIVE

The article deals with the issues of designing a reaction flywheel electric drive with strict requirements for control moment implementation error. The article presents a block diagram for an electric drive with velocity feedback, a mathematical description of the main components of the electric drive, and the results of the electric drive simulation.

Keywords: *reaction flywheel, angular velocity control system, angular acceleration control system, velocity feedback, electric drive.*

Космический аппарат (КА) при выполнении своего функционального назначения должен занимать определенное угловое положение в орбитальной системе координат, что достигается с помощью системы ориентации (СО). Важными элементами СО являются исполнительные органы (ИО), которые создают моменты, прикладываемые к корпусу КА. В настоящее время наибольшее распространение в СО КА получили гироскопы с одной степенью свободы – управляющие двигатели-маховики (УДМ) [1], которые обеспечивают дозирование выходного воздействия в широком диапазоне без использования невозобновляемых источников энергии.

Электропривод УДМ предназначен для создания управляющего момента, воздействующего на КА по сигналам, поступающим из бортового комплекса управления (БКУ), и поддержания его с заданной точностью.

Электропривод УДМ включает две основные части:

– двигатель-маховик (ДМ) на базе бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, с датчиком положения ротора (ДПР), предназначенный для создания управляющих моментов в соответствии с задаваемым кодом момента;

– устройство управления двигателем (УУД), обеспечивающее прием сигналов и команд управления, формирование тока двигателя, формирование диагностической информации о скорости вращения ротора и о величине тока двигателя.

ДМ создает управляющий момент при изменении кинетического момента путем изменения скорости вращения своего ротора:

$$M_y = J\frac{d\omega}{dt} = \frac{dH}{dt},$$

где M_y – управляющий момент ротора ДМ; J – момент инерции ротора ДМ; ω – угловая скорость вращения ротора ДМ; H – кинетический момент ротора ДМ.

В настоящее время для создания управляющего момента УДМ широкое распространение получил косвенный способ управления моментом. Сущность этого способа заключается в за-

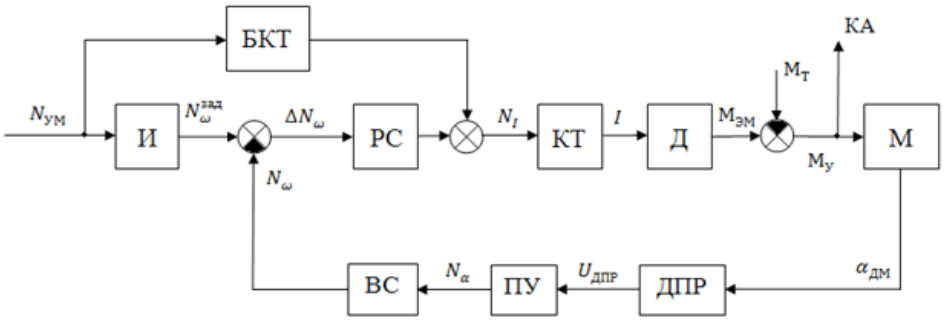


Рис. 1. Структурная схема электропривода УДМ

дании тока двигателя ДМ (и получении электромагнитного момента), пропорционального заданной величине управляющего момента. При этом управляющий момент будет составлять:

$$M_y = M_{ЭМ} - M_C \cdot \{\text{sign}\omega\} - M_B = \\ = I_Д \cdot K_M - M_C \cdot \{\text{sign}\omega\} - K_B \cdot \omega,$$

где $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент; M_C – момент сухого трения; M_B – момент вязкого трения. При этом:

$$M_{ЭМ} = I_Д \cdot K_M; \;\; M_B = K_B \cdot \omega,$$

где $I_Д$ – ток двигателя; K_M – коэффициент двигателя «ток-момент»; K_B – коэффициент вязкого трения «скорость-момент».

Таким образом, используя описанный способ, при создании электропривода УДМ остаются нескомпенсированными моменты сухого и вязкого трения, величины которых могут существенно изменяться в процессе эксплуатации.

В настоящее время создание современных КА требует все более высоких точностных характеристик УДМ, основной из которых является погрешность реализации управляющего момента. Описанный выше способ управления моментом позволяет обеспечить погрешность реализации управляющего момента на уровне 15–20%. На данный момент актуальна необходимость снижения этого параметра до уровня 5–10%. Очевидно, что для повышения точности отработки управляющего момента требуется охват контуром обратной связи всех элементов электропривода УДМ.

На рис. 1 представлена структурная схема электропривода УДМ [2], содержащего контур регулирования угловой скорости вращения ротора ДМ, где И – интегратор задаваемого момента; БКТ – блок компенсации трения; РС – регулятор скорости; КТ – контур тока; Д – двигатель; КА – космический аппарат; М – маховик; ДПР – датчик положения ротора; ПУ – преобразователь угла; ВС – вычислитель скорости; $N_{УМ}$ – код задаваемого управляющего момента; $N_\omega^{зад}$ – код задаваемой угловой скорости вращения ДМ; N_ω – код рассчитанного значения угловой скорости вращения ДМ; ΔN_ω – сигнал рассогласования контура угловой скорости вращения ДМ; N_I – код тока, подаваемого на обмотки двигателя; I – ток, подаваемый на обмотки двигателя; $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент двигателя; M_T – момент трения; M_y – управляющий момент; $\alpha_{ДМ}$ – угловое положение ротора ДМ; $U_{ДПР}$ – выходные напряжения ДПР двигателя; N_α – код углового положения ротора ДМ.

Для формирования сигнала обратной связи по скорости используется информация об угловом положении ротора ДМ, снимаемая с ДПР. Функционирование электропривода УДМ происходит следующим образом: код заданного управляющего момента ($N_{УМ}$) поступает на вход цифрового интегратора (И), который осуществляет его преобразование в код задаваемой угловой скорости вращения ($N_\omega^{зад}$). Основной контур – контур регулирования угловой скорости вращения – содержит пропорционально-интегральный регулятор [3] контура скорости (РС), на вход которого поступает сигнал рассогласования ΔN_ω, являющийся разностью между $N_\omega^{зад}$ и кодом рассчитанного значения угловой скорости вращения (N_ω), определяемым вычислителем скорости (ВС). Блок компенсации трения (БКТ) предназначен для преодоления момента трогания и представляет собой функциональную зависимость между величиной $N_{УМ}$ и выходным значением, определяемую экспериментально. Сумма выходных сигналов РС и БКТ является сигналом задания для контура регулирования тока (электромагнитного момента) двигателя.

Угловая скорость вращения ротора ДМ является одним из основных телеметрических параметров УДМ. Наиболее распространенный на данный момент способ измерения угловой скорости вращения ротора ДМ – фиксация моментов перехода через нулевые значения выходных напряжений ДПР за определенное время. Очевидно, что такой способ не позволяет производить качественную оценку малых скоростей вращения ротора ДМ с необходимым быстродействием. Это, в свою очередь, не позволяет использовать данный сигнал в системе управле-

ния электропривода УДМ в качестве сигнала обратной связи для охвата всех его элементов (как показано на рис. 1).

В настоящее время на рынке ЭРИ появился ряд преобразователей «угол-код»: RD-19230, AD2S1210, ACT5028 (все – производство США), 1310НМ025 (ПКК «Миландр», Россия), алгоритм работы которых позволяет преобразовывать выходные сигналы датчиков угла типа синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) и трехфазный сельсин [4, 5, 6] в двоичный код. Разрядность выходного кода углового положения зависит от настраиваемых параметров микросхемы и качества выходного сигнала датчика угла и позволяет достигать 8–16 бит на один электрический оборот. Подобная разрядность информации об угловом положении ротора ДМ позволяет получать информацию об угловой скорости вращения существенно более высокого качества по сравнению со способом, описанным ранее. Для оценки качества создаваемого управляющего момента необходимо исследование работы электропривода УДМ с трактом определения углового положения, построенным на основе преобразователя «угол-код».

Для проведения исследовательской работы электропривода УДМ была разработана его математическая модель. При этом исследование проводилось на модели электропривода УДМ со следующими параметрами:

– диапазон частоты вращения ротора: ± 6000 об./мин;

– диапазон изменения управляющего момента: ± 0,05 Нм;

– дискретность формирования управляющего момента: 0,0001 Нм;

– время создания управляющего момента, не более: 0,1 с.

В качестве бесконтактного двигателя принят двигатель с восьмью парами полюсов, что позволяет повысить чувствительность выходного кода углового положения (в расчете на 360° механических) на 3 бита.

Разработанная модель учитывает следующие особенности элементов, входящих в состав электропривода:

– дискретный характер функционирования электропривода, включая преобразования по уровню и времени угловой информации о положении ротора ДМ;

– быстродействие ВС;

– моменты сухого и вязкого трения по оси вращения ДМ.

При разработке математической модели было принято следующее упрощение: для математического описания бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов использованы уравнения двигателя постоянного тока без учета процессов коммутации обмоток двигателя и без учета режима рекуперации электрической энергии при торможении ДМ.

Далее приведено математическое описание основных элементов, входящих в состав электропривода УДМ (см. рис. 1).

Цифровой интегратор управляющего момента описывается следующим образом:

$$\mathrm{N}_{\omega}^{\text{зад}}(m) = \mathrm{N}_{\omega}^{\text{зад}}(m-1) + k_{И} \cdot T_s \cdot N_{УМ}(m-1),$$

где $k_{И}$ – масштабный коэффициент преобразования; $T_s = 0.00005$ – период дискретизации электропривода; m – текущий шаг работы электропривода; $N_{УМ}$ – код задаваемого управляющего момента.

Код углового положения ротора формируется в ПУ, выполненным на базе (или по принципу) микросхемы 1310НМ025 [4]. Датчик положения ротора (ДПР) и преобразователь угла (ПУ) описываются следующим образом:

$$N_{\alpha} = entier\left(\frac{2^{n_{ПУ}}}{2\pi} \cdot \alpha_{ДМ}\right),$$

где $n_{ПУ} = 15$ – разрядность ПУ на полном обороте ротора ДМ; $\alpha_{ДМ}$ – угловое положение ротора ДМ.

Динамические свойства ПУ определяются передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{1}{1 + T_{ПУ} s},$$

где $T_{ПУ}$ определяется динамическими свойствами ПУ.

Вычисление N_{ω} для реализации обратной связи по скорости осуществляется по формуле на каждом такте работы электропривода:

$$N_{\omega} = \frac{N_{\alpha}[m] - N_{\alpha}[m-100]}{100 \cdot T_s}.$$

Разработанная математическая модель была реализована в MatLab/Simulink. Результаты проверки диапазона изменения угловой скорости и, соответственно, изменения кинетического момента показаны на рис. 2. Время

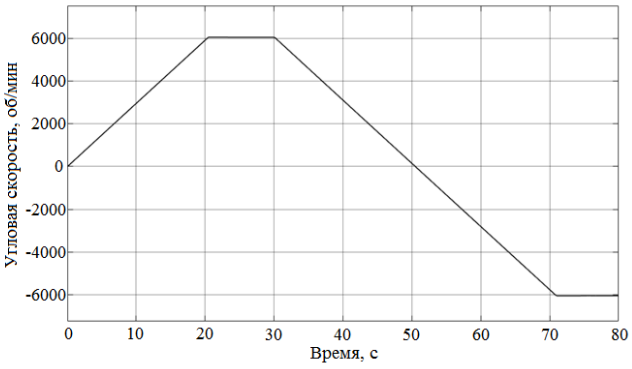


Рис. 2. Диапазон изменения угловой скорости вращения ротора ДМ при отработке УДМ максимального управляющего момента

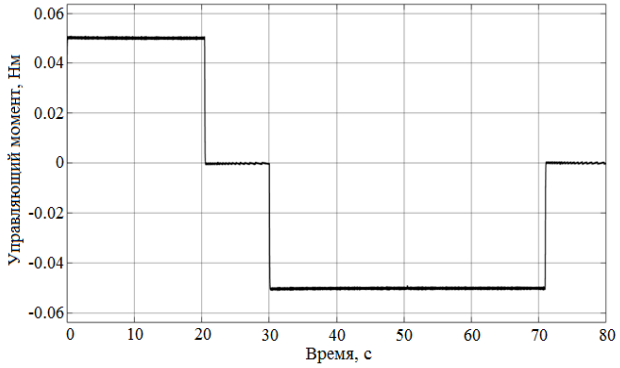


Рис. 3. Диапазон изменения управляющего момента

разгона ротора до угловой скорости достигает 6000 об./мин, при максимальном управляющем моменте 0,05 Нм, составляет ≈ 21 с.

Результаты проверки диапазона изменения управляющего момента показаны на рис. 3.

При реализации управляющего момента 0,05 Нм его максимальное отклонение составило 0,0002 Нм (0,4%). Такое значение достигается за счет обратной связи по скорости, то есть обеспечение астатизма управления по отношению к увеличивающемуся при разгоне ротора ДМ моменту сопротивления.

На рис. 4–6 представлены переходные процессы отработки приводом УДМ максимального управляющего момента при использовании в контуре регулирования угловой скорости вращения ротора ДМ 11, 13 и 15-разрядных ПУ соответственно. Видно, что максимальный управляющий момент 0,05 Нм создается за время ≈ 0,1 секунды с момента поступления управляющего сигнала. Параметры пульсаций управляющего момента при использовании 11, 13 и 15-разрядных ПУ приведены в табл. 1.

Результаты проверки дискретности (0,0001 Нм) формирования управляющих моментов показаны на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлена отработка управляющего момента 0,0001 Нм, на рис. 8 – реализация момента 0,0002 Нм. Величина управляющего момента на рис. 7 и 8 определялась следующим образом:

$$M_y = J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

где $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ – угловое ускорение ротора ДМ на интервале $\Delta t = 0{,}1$ с.

Начальный участок движения ротора ДМ при задании минимального момента 0,0001 Нм

Таблица 1

Разрядность ПУ	Параметры пульсаций	
	Амплитуда (Нм)	Частота (Гц)
11 разрядов	0,01	50
13 разрядов	0,002	200
15 разрядов	0,0005	800

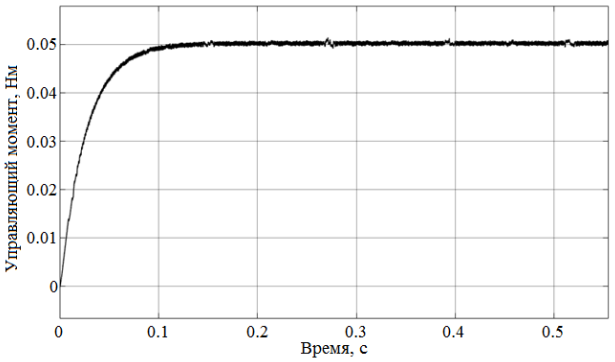


Рис. 4. Переходной процесс при отработке УДМ максимального управляющего момента и использовании 15-разрядного ПУ

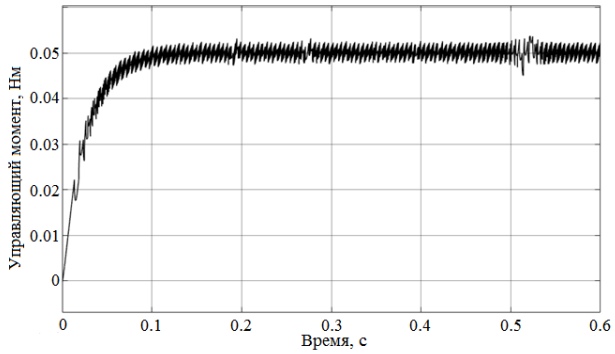


Рис. 5. Переходной процесс при отработке УДМ максимального управляющего момента и использовании 13-разрядного ПУ

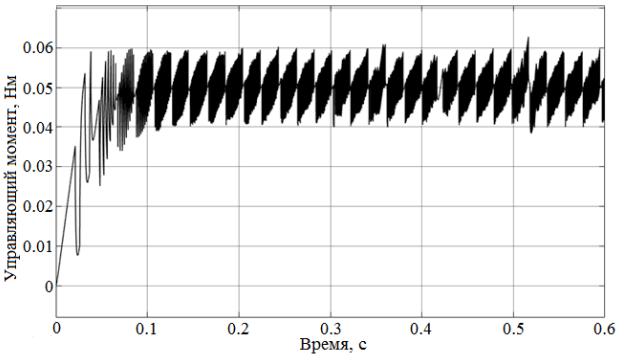


Рис. 6. Переходной процесс при отработке УДМ максимального управляющего момента и использовании 11-разрядного ПУ

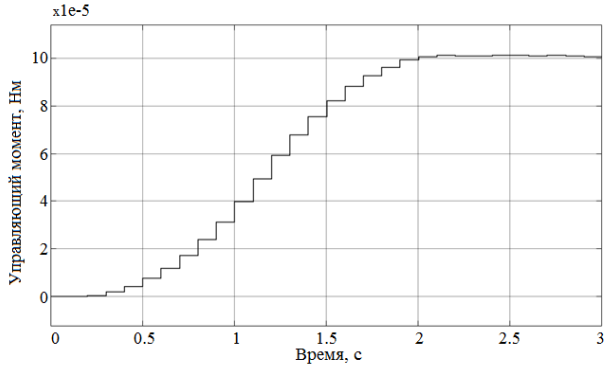


Рис. 7. Отработка УДМ управляющего момента +0,0001 Нм

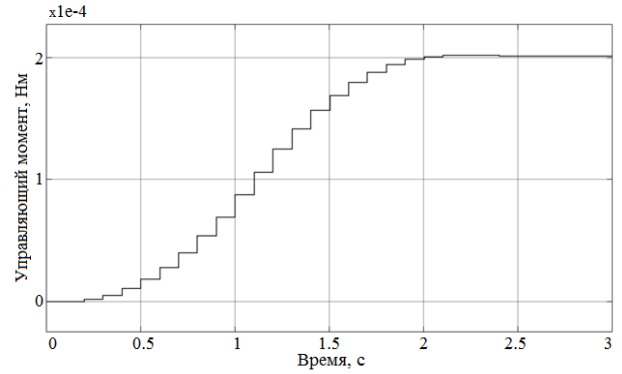


Рис. 8. Отработка УДМ управляющего момента +0,0002 Нм

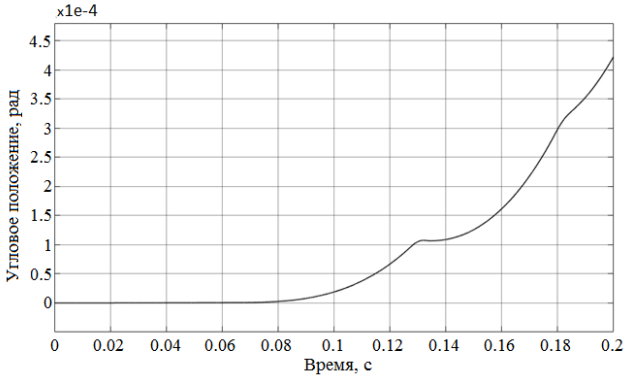


Рис. 9. Начальный участок движения ротора ДМ при отработке управляющего момента +0,0001 Нм

показан на рис. 9. Видно, что движение ротора начинается за время менее 0,1 с.

Управляющий момент, вычисленный по приращению угла ротора ДМ за время (0-0,1 с), равен:

$$M_{0-0.1} = \frac{d\omega}{dt} \cdot J = \frac{2(\phi - \phi_0)}{t^2} \cdot J =$$

$$= \frac{2(0.0000189 - 0)}{0.01} \cdot 0.001592 = 0.000006 \text{ Нм},$$

где $J = 0.001592$ *кг·м*^{2} – момент инерции ротора ДМ.

Управляющий момент, вычисленный по приращению угла ротора ДМ за время (0,1–0,2 с), равен:

$$M_{0.1-0.2} = \frac{d\omega}{dt} \cdot J = \frac{2(\phi - \phi_0)}{t^2} \cdot J =$$

$$= \frac{2(0.0004229 - 0.0000189)}{0.01} \cdot 0.001592 =$$

$$= 0.00013 \text{ Нм}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при реализации минимальных управляющих моментов на начальном этапе отработки погрешность может достигать значений ±0,0001 Нм (единица младшего разряда управляющего кода). Стоит отметить, что для контроля угловых положений, показанных на рис. 9, требуется 19-разрядный ПУ (16-разрядный выходной код микросхемы 1310НМ025 при использовании ДПР с восьмью парами полюсов).

В целом, по результатам моделирования можно сделать вывод о том, что проработанная система управления ДМ с внешним контуром регулирования скорости вращения ротора (обратная связь по скорости) и внутренним, подчиненным контуром регулирования тока управления двигателем (обратная связь по току) обеспечивает выполнение основных технических требований, предъявляемых к современным УДМ. Разрядность преобразователя 1310НМ025 является достаточной для проработанной системы регулирования. При этом проблемным вопросом является контроль управляющего момента на начальном участке движения (0÷2) с.

Также можно говорить о том, что выбор разрядности ПУ существенно влияет на амплитуду и частоту пульсаций управляющего момента, и этом случае среднее значение управляющего момента при использовании 8, 10 и 12-разрядных ПУ не меняется.

Таким образом, несмотря на то, что при разработке модели приняты упрощения, которые могут повлиять на погрешность создания управляющего момента, можно предположить, что величина погрешности реализации управляющего момента δ = ±(5% + 0,0001 Нм) является достижимой. Для дальнейшей оценки характеристик предлагаемого варианта построения электропривода УДМ необходимо провести натурное макетирование.

Библиографический список

1. *Якимовский Д. О., Бураков М. В., Коновалов А. С.* Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата: монография. СПб.: ГУАП, 2018. 152 с.

2. *Якимовский Д. О.* Повышение точности управления моментом двигателя-маховика // Гироскопия и навигация / ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2008. С. 46–52.

3. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М., 2001.

4. AD2S1210, Variable Resolution, 10-Bit to 16-Bit R/D Converter with Reference Oscillator, Analog Devices.

5. Precision Resolverto-Digital Converter Measures Angular Position and Velocity / J. Szymczak, S. O'Meara, J. Gealon, C. Nelson De La Rama // Analog Dialogue 48–03, March (2014).

6. Микросхема преобразователя сигналов датчиков перемещения 1310НМ025. Спецификация.

УДК 629.114.02

Е. Е. Прокопов*
кандидат технических наук, доцент
**Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева*

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВИБРОГАШЕНИЕ В СИСТЕМАХ С ПАРАМЕРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

В статье рассматриваются вопросы управляемой виброзащиты, особенности динамического гашения вибрации в системах с параметрическим управлением. Исследуемые виброзащитные системы представляют собой системы с непрямым управлением, которое воздействует на элементы подсистемы, то есть оказывает опосредствованное влияние на движение защищаемого объекта через параметры системы, в связи с чем при определенных режимах работы и настройки системы позволяет избежать больших и неоправданных энергетических затрат на управление. Отсутствие всесторонних данных об антирезонансных и противоударных свойствах низкочастотных комбинированных систем виброгасителей и виброизоляторов прерывистого действия предопределяет значимость выбранного направления исследования.

Ключевые слова: *виброзащитная система, управление, динамический гаситель, базовая модель, резонансные пики, амортизатор.*

E. E. Prokopov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor

**The Oryol State University of I. S. Turgenev*

DYNAMIC ABSORBING OF VIBRATION IN SYSTEMS WITH PARAMETRIC CONTROL

The article deals with the issues of controlled vibration protection, features of dynamic vibration damping in systems with parametric control. The investigated vibration protection systems are systems with indirect control, which affects the elements of the subsystem, i. e. has a mediated effect on the movement of the protected object through the system parameters. In this regard, under certain operating modes and settings of the system, it allows to avoid large and unjustified energy costs for management. The lack of comprehensive data about the anti-resonant and shock-proof properties, the low frequency of the combined system of vibration dampers and vibration isolators intermittent determines the significance of chosen direction of studies.

Keywords: *vibroprotection system, management, dynamic damper, the base model, the resonance peaks of the shock absorber.*

Эксплуатация транспортных средств и машин технологического назначения сопряжена с возникновением общей вибрации, которая, как правило, превышает допустимые значения, установленные действующими санитарными нормами.

Для снижения негативных проявлений вибрации используют два метода виброзащиты: динамическое гашение и виброизоляцию.

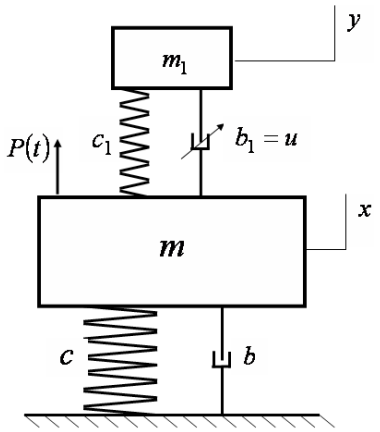
Недостатком первого является то, что используемый в конструкции виброгаситель действует только на определенной частоте, соответствующей его резонансному режиму колебаний. В случае использования виброизоляторов динамика любой виброзащитной системы существенно зависит от процесса демпфирования и формы обобщенных связей [1].

При «пассивном» варианте исполнения упругодемпфирующих звеньев систем виброзащиты улучшение их антирезонансных и противоударных свойств достигается только при использовании параметрического управления процессом демпфирования. Причем сам процесс управления в системах виброзащиты осуществляется за счет определенного изменения диссипативной или восстанавливающей силы.

Использование управляемых демпферов и переключателей жесткости упругих звеньев позволяет виброзащитной системе формировать восстанавливающие силы по принципу активного воздействия и осуществить «перевод» соответствующих систем из «пассивных» в разряд управляемых.

Основная часть

Вполне очевидно, что комплексное решение задачи виброзащиты от широкополосного

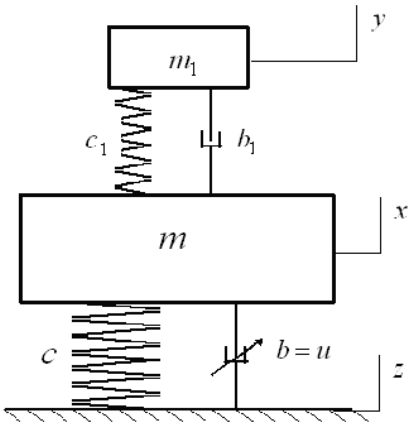


$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx + u(\dot{x} - \dot{y}) + c_1(x - y) = P(t)$$

$$m_1\ddot{y} + u(\dot{y} - \dot{x}) + c_1(y - x) = 0$$

$J = \int_0^T \dot{x}^2 dt \to \min$, где J – интегральный критерий качества виброзащиты

Рис. 1. Первая базовая модель

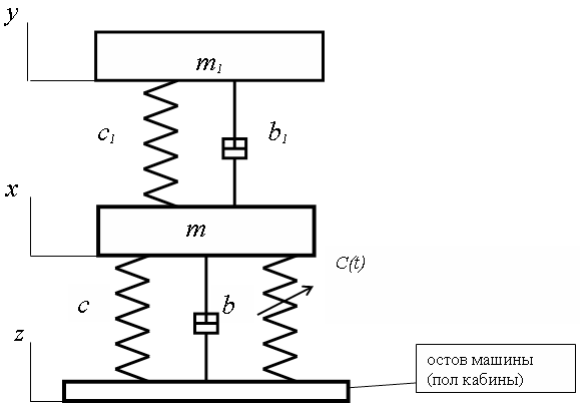


$$m\ddot{x} + u(\dot{x} - \dot{z}) + c(x - z) + + b_1(\dot{x} - \dot{y}) + c_1(x - y) = 0$$

$$m_1\ddot{y} + b_1(\dot{y} - \dot{x}) + c_1(y - x) = 0$$

$$J = \int_0^T \dot{x}^2 dt \to \min$$

Рис. 2. Вторая базовая модель



$$\begin{cases} m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{z}) + c_1(x - z) + b_1(\dot{x} - \dot{y}) + c_1(x - y) + Q(t) = 0; \\ m_1\ddot{y} + c_1(y - x) + b_1(\dot{y} - \dot{x}) = 0 \end{cases}$$

Рис. 3. Третья базовая модель

случайного воздействия возможно только при реализации существенно-нелинейных и управляемых виброзащитных систем. При этом исследование свойств комбинированных систем виброгасителей и виброизоляторов прерывистого действия открывает новые возможности для их дальнейшего эффективного применения в виброзащитной технике.

На рис. 1–3 представлены варианты расчетных схем и базовых моделей виброзащитных систем с динамическим гасителем и управляемым упругодемпфирующим звеном.

В приведенных схемах приняты следующие обозначения:

m_1 – присоединенная масса – масса динамического гасителя (кг);

m – масса защищаемого объекта (кг);

c_1 – жесткость присоединенного упругого элемента (Н/м);

c – жесткость несущего упругого элемента (Н/м);

$c(t)$ – переменная жесткость дополнительного упругого элемента;

b_1 – вязкое сопротивление присоединенного гидравлического демпфера (Нс/м);

b – вязкое сопротивление гидравлического демпфера (Нс/м);

x – координата защищаемого объекта (м);

$P(t)$ – внешнее возмущение (Н);

u – переменная вязкого сопротивления.

$$Q(t) = c(t)\left[\xi_0 \cdot sign(x - x_\tau - z + z_\tau) + (x - x_\tau - z + z_\tau)\right]$$

– компенсационное воздействие; ξ_0 – величина предварительной деформации упругого звена; x_τ, z_τ – текущие координаты в момент переключения жесткости.

Процесс управления осуществляется за счет определенного изменения параметров жесткости и вязкого сопротивления. При этом предельные варианты виброзащиты достигаются только при оптимальных параметрах прерывистой диссипативной или восстанавливающей силы, имитирующей компенсационное воздействие по типу активных систем.

Следует отметить, что алгоритм управления, который переводит диссипативную или восстанавливающую силу в разряд компенсационного воздействия, базируется на информации о компонентах состояния системы в амплитудно-фазовой области [2].

В случае прерывистого компенсационного воздействия смещение резонансных пиков в область более низких частот повышает эффективность виброзащиты – коэффициент динамичности становится меньше единицы при $\eta > 1$ (в отличие от $\eta > 1{,}41$ при постоянной жесткости и демпфировании). В результате на первой и второй резонансных частотах слева и справа от ча-

стоты синхронизации коэффициенты динамичности не превышают единицы [3].

Следует отметить, что с увеличением соотношения жесткостей значения коэффициентов динамичности в зарезонансной области частот практически не изменяется. В связи с этим можно говорить об оптимальной последовательности переключений жесткости, при которой передача динамических нагрузок через упругий элемент исключается [4].

Уровень колебаний защищаемого объекта при первом резонансе уменьшается за счет прерывистого компенсационного воздействия, корректирующего движение защищаемого объекта на интервалах длительностью порядка четверти периода. В пределах этих интервалов происходит смена знака перемещения защищаемого объекта. При втором резонансе уровень его колебаний уменьшается за счет противофазного движения присоединенной массы и защищаемого объекта. Развиваемая динамическим гасителем восстанавливающая сила направлена против движения защищаемого объекта.

Использование в виброзащитных системах динамического гасителя с управляемым упругодемпфирующим звеном позволяет значительно улучшить условия труда операторов транспортных средств и машин технологического назначения.

Библиографический список

1. *Ермошенко Ю. В., Фомина И. В., Трофимов А. Н.* Обобщенные динамические связи, их формы и особенности взаимодействия с объектами вибрационной защиты // Известия ЮЗГУ. 2011. № 1. С. 28–38.

2. *Фоминова О. В.* Прерывистое демпфирование в системах виброзащиты: основы теории, приложения. М.: Машиностроение-1, 2005. 255 с.

3. *Москвичев Ю. В., Чернышев В. И.* Управление демпфированием колебательной системы с динамическим гасителем. Материалы III междунар. науч. семинара «Ударо-вибрационные системы, машины и технологии». Орел: ОрелГТУ, 2006. С. 437–441.

4. *Прокопов Е. Е.* Анализ динамики переключений жесткости. Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. 2016. № 3 (20). С. 124–128.

УДК 623.746

Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНОСТЬЮ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА В СРЕДЕ LABVIEW

В статье рассматривается построение модели авиационного тренажера с тремя степенями свободы, имитирующего психофизические нагрузки на пилота. Приведено испытание модели путем преобразования информации, полученной с авиационного симулятора, в движение подвижной платформы.

Ключевые слова: *системы автоматического управления, авиационные тренажеры, моделирование полета.*

N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
E. Y. Vataeva*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT A MOBILITY CONTROL SYSTEM OF AIRCRAFT SIMULATOR ON LABVIEW ENVIRONMENT

The article considers the construction of a model of an aircraft simulator with three degrees of freedom (3DOF) that simulates the psychophysical stress on the pilot. The model is tested by converting the information obtained from an aircraft simulator into movement of the mobile platform.

Keywords: *automatic control system, aircraft simulator, flight simulation.*

Одной из основных причин авиакатастроф является человеческий фактор [1]. В то время как конструкции воздушных судов совершенствуются различными системами контроля полета, позволяющими повысить вероятность благоприятного исхода в случае критической ситуации, единственным возможным способом уменьшить влияние человеческого фактора является тренинг пилотов в режиме реального полета.

Для моделирования реальных нагрузок, воздействующих во время полета, воспользуемся особенностями восприятия вестибулярным аппаратом [2].

Чувствительность вестибулярной системы здорового человека очень высока: отолитовый аппарат позволяет воспринять ускорение прямолинейного движения, равное всего 2 см/с^2. Порог различения наклона головы в сторону – всего около 1 углового градуса, а вперед и назад – 1,5–2 угловых градуса. Рецепторная система полукружных каналов позволяет человеку замечать ускорения вращения в 2–3 угловых градуса в 1 с^2 [3]. Известный летчик-врач Вульфтен-Пальте проводил исследования пассивных наклонений тела, что также было проделано американскими исследователями. Из опытов вытекает, что порог восприятия пассивных наклонений при полете значительно выше, чем при тех же наклонениях на земле [4].

Рассмотрим некоторые характеристики перегрузок, возникающих в реальном полете. Перегрузка представляет собой вектор

$$n = \frac{R + P}{G},$$

где R – равнодействующая аэродинамических сил; P – равнодействующая сил тяги; G – масса.

Перегрузку как вектор раскладывают в скоростной системе координат на составляющие: продольную n_x, нормальную n_y и боковую n_z. Воздействие перегрузки на летчика зависит от ее величины, длительности действия, направления и скорости изменения [5].

Продольные перегрузки возникают во время взлета, посадки, разгона и торможения само-

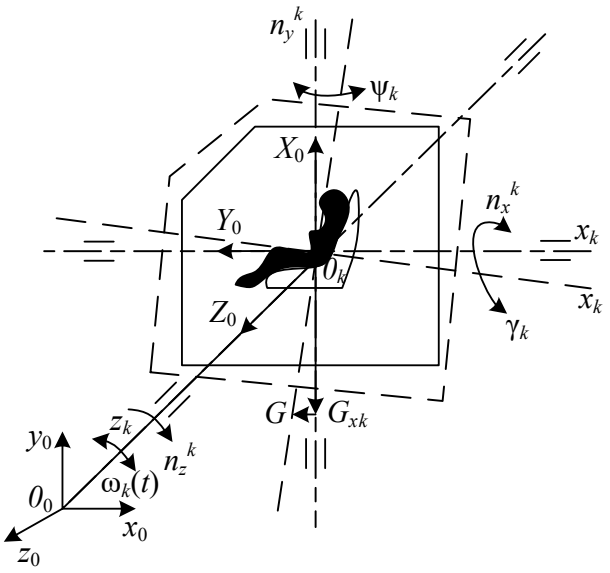


Рис. 1. Схема действий перегрузок на летчика



Рис. 2. 3DOF платформа

лета. Обычно величина этих перегрузок сравнительно велика (n_x<1). Боковые перегрузки, возникающие за счет крена или скольжения самолета, обычно невелики и не превышают 1–2. В полетах без выполнения сложных маневров на летчика воздействуют также угловые ускорения $\ddot{u}_x, \ddot{u}_y, \ddot{u}_z$ длительностью от 0,1 до 3 с. На работоспособность летчика сильное влияние оказывают ускорения, возникающие при «болтанке» самолета, качке, рысканье.

Установлено, что чем больше перегрузка, тем больше усилий человек затрачивает на выполнение одной и той же работы. Однако в результате обучения и тренировки на тренажерах с подвижными кабинами (рис. 1) летчик приобретает навыки управления в условиях перегрузок.

Исходя из особенностей возникновения акселерационных ощущений у человека сформулированы следующие положения, которые лежат в основе построения современных систем моделирования перегрузок в тренажерах с подвижными кабинами:

– для воспроизведения акселерационных ощущений необходимо, чтобы угловые и линейные перемещения кабины тренажера относительно всех ее осей осуществлялись с угловыми и линейными ускорениями, пропорциональными вычисленным значениям в системе моделирования динамики полета;

– для процесса воспроизведения акселерационной информации вычисленные параметры движения самолета должны быть преобразованы в параметры движения кабины с учетом порогового восприятия летчиком акселерационных воздействий;

– моделировать лишь начальные участки ускорений с последующим торможением и возвращением кабины в нейтральное положение, при этом для уменьшения хода кабины можно заменять малые градиенты перегрузок большими значениями при меньшей продолжительности действия;

– ускорения необходимо моделировать с таким расчетом, чтобы не вызывать ощущений действия боковых перегрузок. Для этого при имитации установившегося угла крена и тангажа кабина должна занимать горизонтальное положение.

Анализируя изложенную информацию, можно сделать вывод о том, что для полной имитации полета пилоту необходима подвижность. Без подвижной платформы нереализуемы имитируемые нагрузки, необходимые летному составу для должной подготовки. При отсутствии комплексных психофизиологических нагрузок пилот может привить себе ложные навыки реакций на летную ситуацию.

Существующие тренажеры с тремя степенями свободы (3DOF) (пример исполнения такой платформы приведен на рис. 2) сравнительно более недорогие, нежели шестистепенные, и конструктивно проще исполнены, хотя и имеют ограничения в движениях (невозможность перемещения платформы в горизонтальной плоскости). Факт более простого конструктивного исполнения позволяет расширить диапазон применения пилотажных тренажеров в сфере подготовки летного состава.

На основании проанализированной полетной информации были сформированы некоторые типовые воздействия, чтобы ознакомиться с реакцией вестибулярного аппарата и в дальнейшем использовать ее для настройки формирующих фильтров (ФФ).

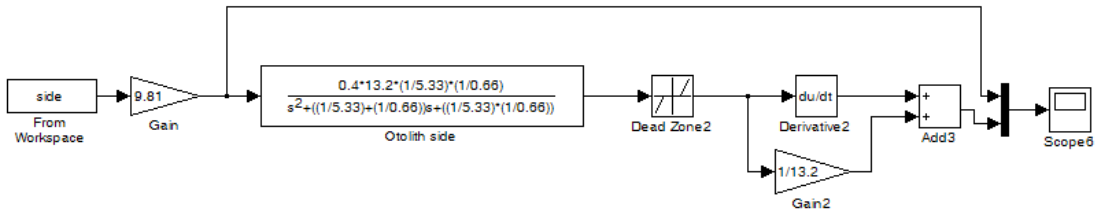


Рис. 3. Схема моделирования реакции вестибулярного аппарата на боковую силу в MatLab Simulink

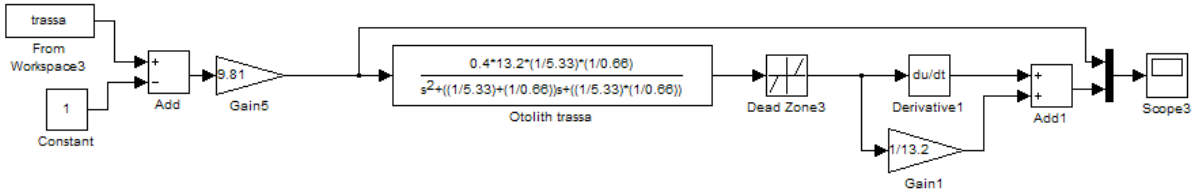


Рис. 4. Схема моделирования реакции вестибулярного аппарата на нормальную силу при полете по трассе

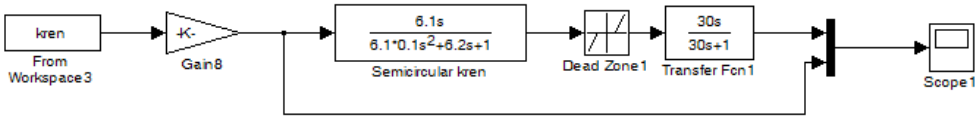


Рис. 5. Схема моделирования реакции вестибулярного аппарата на входное воздействие скорости по крену

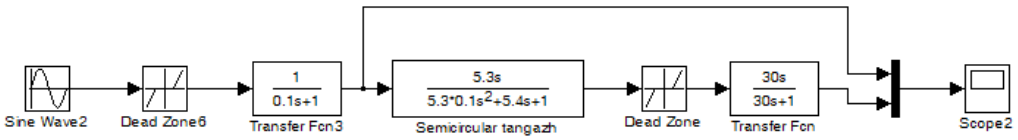


Рис. 6. Схема моделирования реакции вестибулярного аппарата на скорость по тангажу

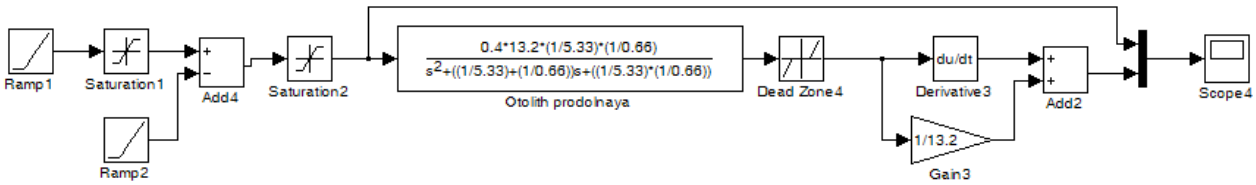


Рис. 7. Схема моделирования реакции вестибулярного аппарата на продольную силу

Для моделирования реакции ВА используются передаточные функции, вид и параметры которых рассмотрены в работе [6]. Схемы моделирования реакций приведены на рис. 3–7.

При анализе реакций системы, моделирующей вестибулярный аппарат, были сделаны выводы о том, что основная реакция ВА приходится на фронт воздействия и его пиковое значение. Длительное неизменное состояние воздействия не влияет на восприятие вследствие «эффекта памяти». Такой характер реакции ВА позволяет моделировать воздействия на человека на ограниченном диапазоне перемещений и скоростей, которые могут быть реализованы на подвижной платформе.

Алгоритм управления подвижной платформой основывается на алгоритме формирующих фильтров (с англ. – washout algorithm), который связан с человеческими особенностями восприятия.

Данный алгоритм представлен на рис. 8, где М – блоки масштабирования и преобразования координат; ФВЧ – фильтры высоких частот; ФНЧ – фильтр низких частот; О – ограничитель; ∫ – блоки интегрирования.

Фильтр содержит два прямых канала, содержащих фильтры высоких частот для имитации изменяющихся акселерационных воздействий и вращений ЛА, и один перекрестный низкочастотный канал для имитации статических нагрузок наклоном платформы. Ограничитель служит для исключения влияния статического сигнала на рецепторы, отвечающие за восприятие вращения.

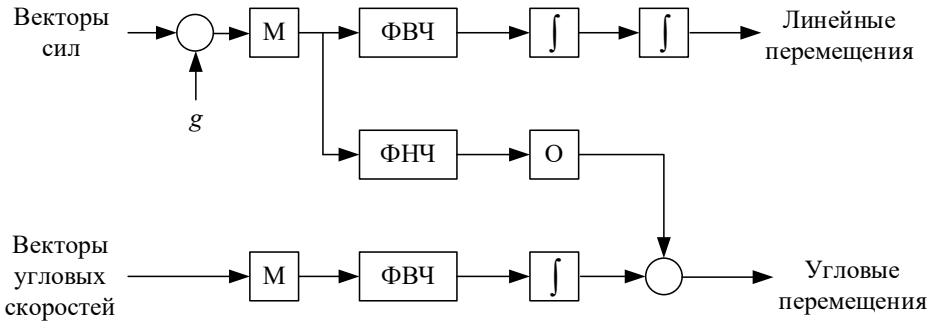


Рис. 8. Классический формирующий фильтр

В качестве ФНЧ и ФВЧ, как правило, используются звенья 2 порядка с передаточными функциями

$$W_{\text{ВЧ}} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_{\text{В}}\omega_{\text{В}}s + \omega_{\text{В}}^2},$$

$$W_{\text{НЧ}} = \frac{\omega_{\text{Н}}^2}{s^2 + 2\zeta_{\text{Н}}\omega_{\text{Н}}s + \omega_{\text{Н}}^2},$$

где $\omega_{\text{В}}$ и $\omega_{\text{Н}}$ – частоты среза фильтров; $\zeta_{\text{В}}$ и $\zeta_{\text{Н}}$ – коэффициенты демпфирования [7].

Трехстепенная платформа, в отличие от шестистепенной, способна совершает лишь часть движений, в числе которых – перемещение по вертикальной оси и наклон по крену и тангажу. В силу ограничения количества степеней свободы платформа не может совершать поворот по рысканью и никакие перемещения, помимо вертикального.

На рис. 9 представлена схема получения перемещения и углов платформы из получаемых сил и скоростей, где ВЧК и НЧК – высокочастотные и низкочастотные фильтры соответственно.

На рис. 10 представлена последовательность взаимодействия авиационного симулятора X-Plane со средой программирования LabView, которая, в свою очередь, подает управляющие

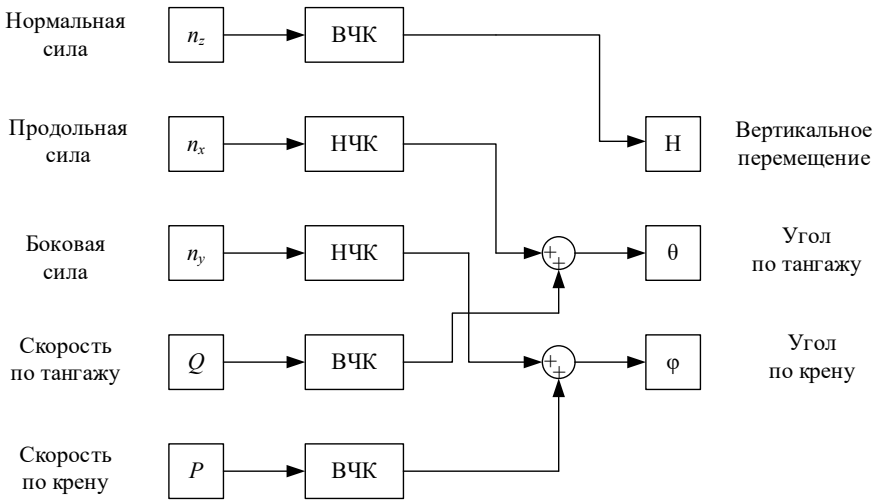


Рис. 9. Схема применения ФФ для получения углов и перемещений платформы

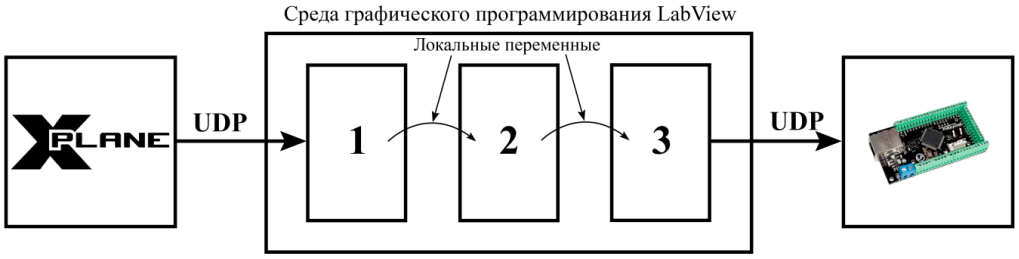


Рис. 10. Схема, описывающая аппаратно-программное взаимодействие

воздействия непосредственно на плату управления макетом подвижной платформы.

На рис. 10 блок 1 принимает поток информации из симулятора по протоколу UDP и преобразует информацию для дальнейшей реализации в LabView. Блок 2 представляет собой реализацию washout-алгоритма в среде программирования и передает на блок 3 информацию, которую блок 3 преобразует в управляющие воздействия и передает по протоколу UDP на управляющую плату,

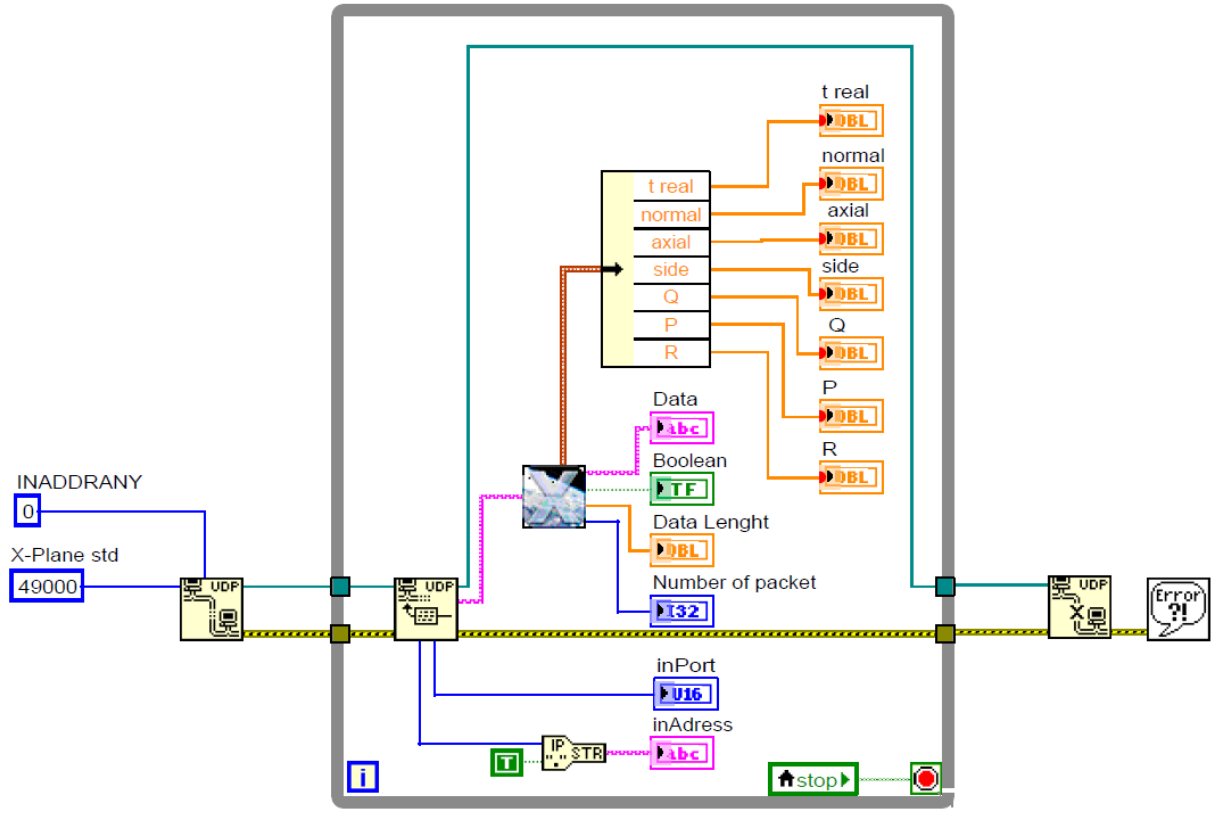


Рис. 11. Реализация блока 1 в LabView

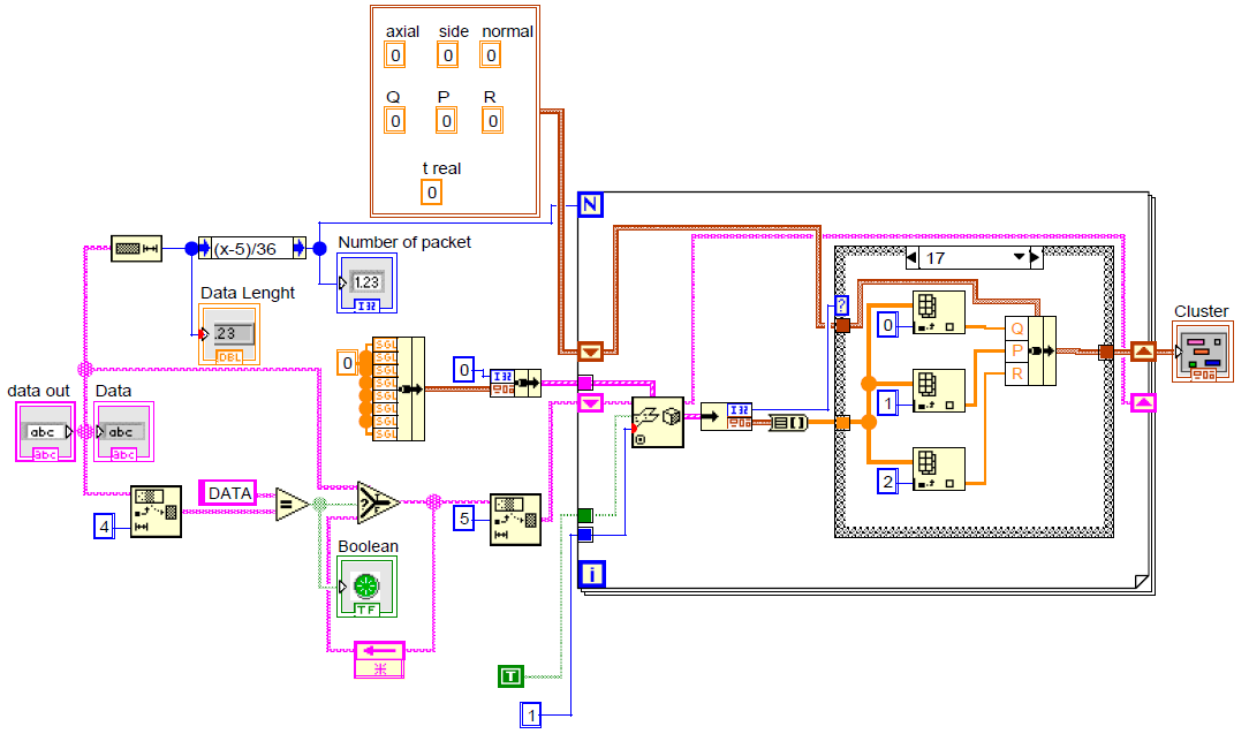


Рис. 12. Подприбор из блока 1

к которой подключен макет. Обмен данным между блоками 1, 2 и 3 происходит через заданные в программе локальные переменные (ускорения, силы и перемещения ног платформы).

Реализация блока 1 в среде LabView приведена на рис. 11–12.

На рис. 13 показана реализация washout-алгоритма в среде программирования.

На входе блока при помощи локальных переменных принимается информация о скоростях по крену и тангажу и нормальной, продольной и поперечной силах. Блок реализует фильтрацию данных, суммирование каналов и необходимое масштабирование, чтобы на выходе блока получить вертикальное перемещение, углы по тангажу и крену, которые также при помощи локальных переменных передаются на блок 3.

В качестве управляющей конструкции используется цикл с жестким заданием времени, что позволяет осуществлять работу в реальном времени и задает такт работы всей системы.

Программные средства среды графического программирования LabView позволяют моделировать и точно воспроизводить математическую модель фильтров и, таким образом, переносить заданную структуру в практическую плоскость применения.

На рис. 14 приведена схема автоматического получения информации с подключаемого устройства.

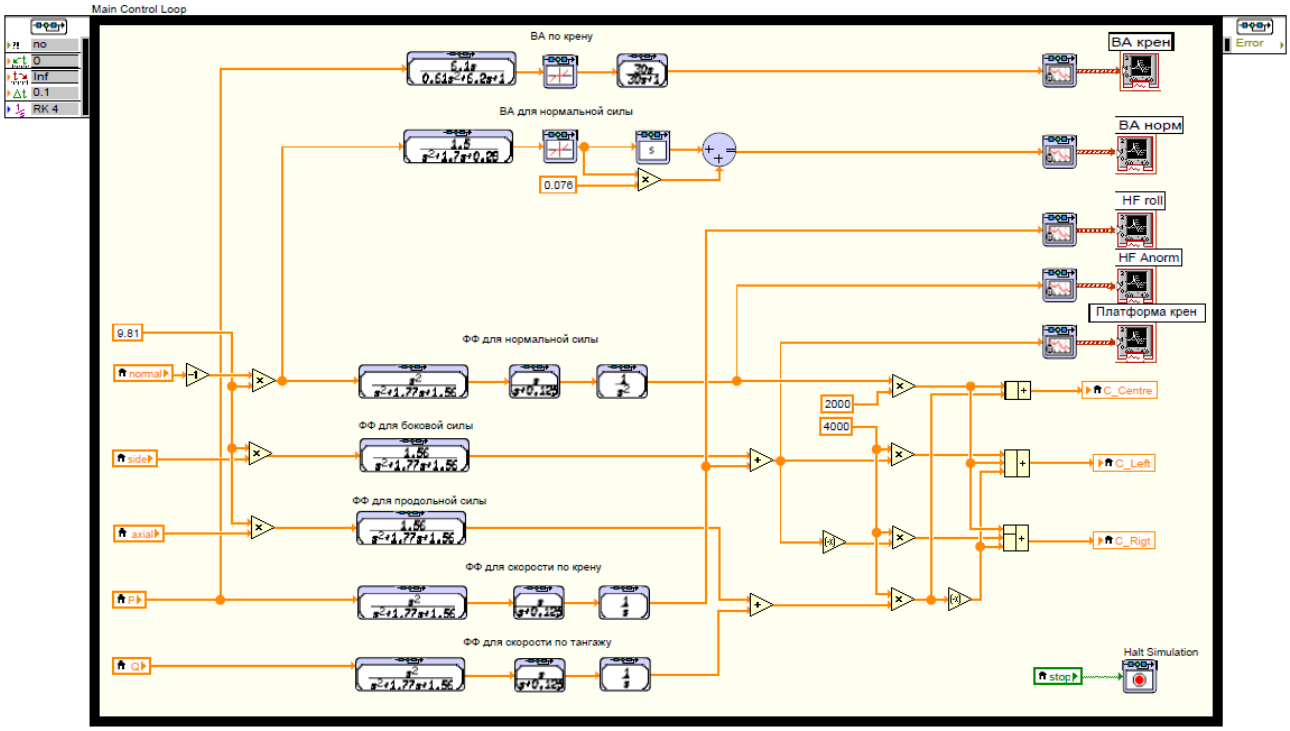


Рис. 13. Реализация блока 2 в LabView

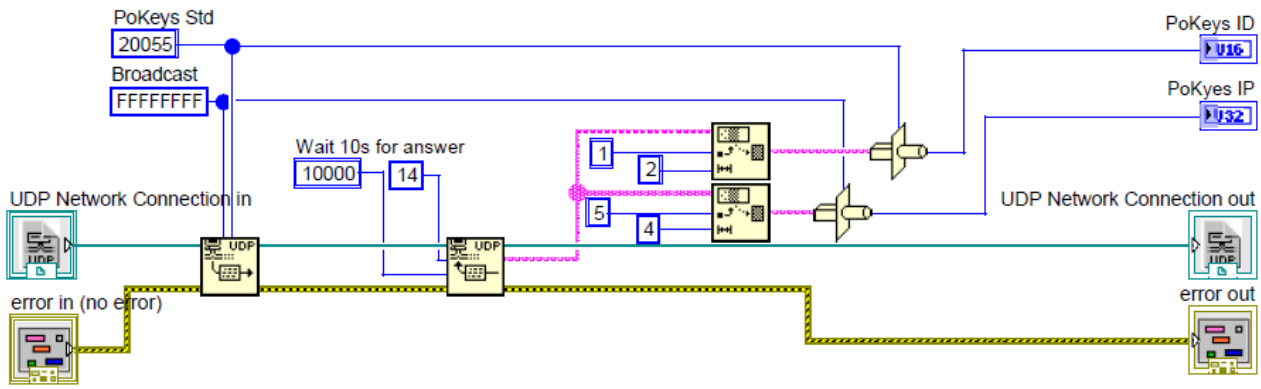


Рис. 14. Схема получения информации с устройства

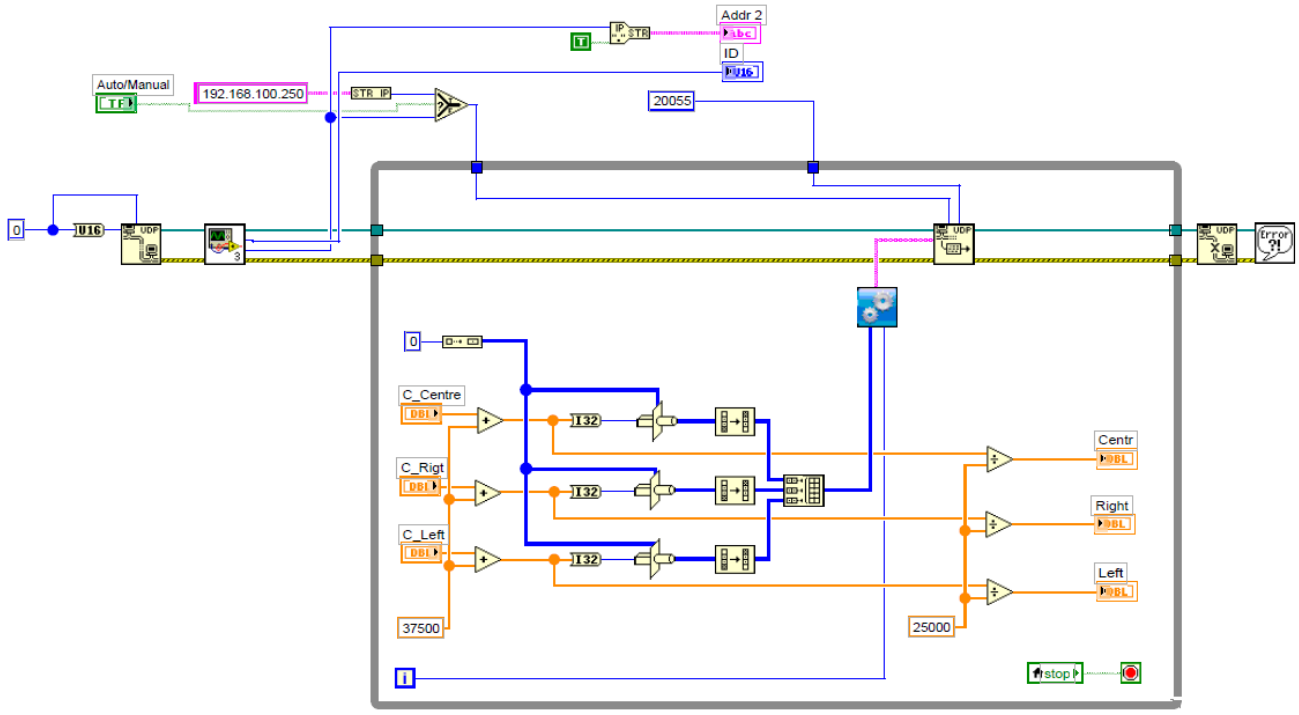


Рис. 15. Реализация блока 3 в LabView

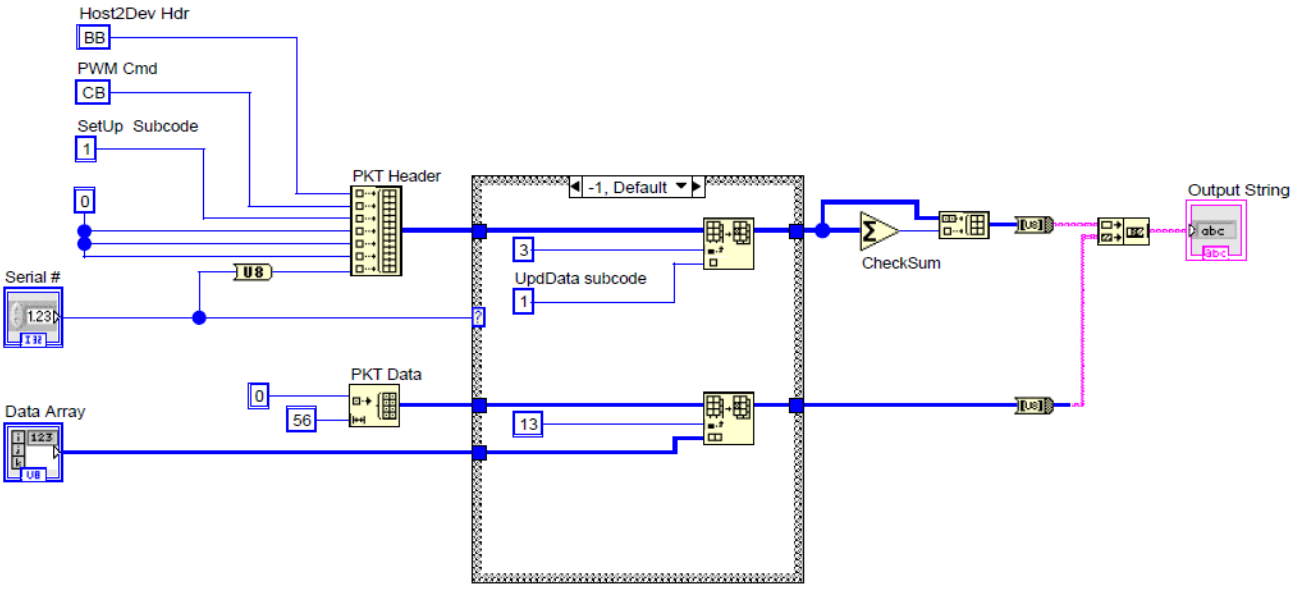


Рис. 16. Положение «default» цикла из подприбора

На рис. 15–17 представлена программная реализация блока 3 по преобразованию поступающих на блок перемещений в управляющие импульсы платы управления.

После принятия перемещений на входе блока 3 приводим значение к нулевому положению ног платформы. При помощи приведения типа данных и реверсирования порядка байт внутреннее представление числа в среде LabView преобразуется в представление числа в плате управления. Производится настройка ШИМ. Строки данных объединяются с заголовком и отправляются по указанному адресу на указанный порт (при отсутствии данных об адресе программа автоматически получает данные о нем).

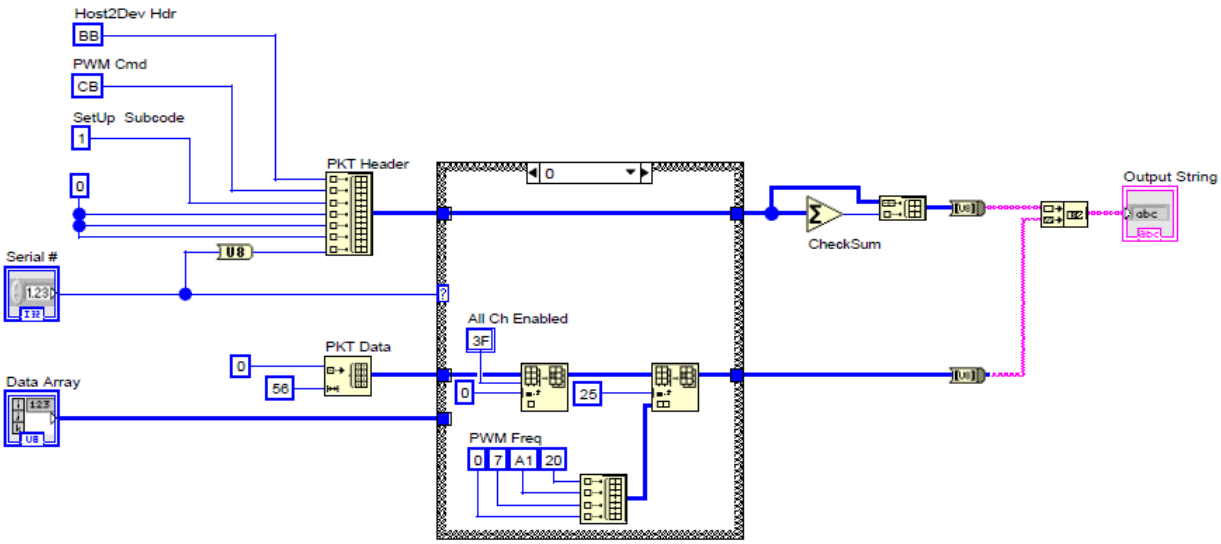


Рис. 17. Положение «0» цикла из подприбора

Разработанная система показала свою работоспособность при испытаниях с макетом подвижной платформы.

Библиографический список

1. *Griffin G.* Human error is biggest obstacle to 100 percent flight safety // The Denver Post. URL: http://www.denverpost.com/ci_14398562 (дата обращения: 20.12.2018).

2. *Денисов В. Г., Онищенко В. Ф., Скрипец А. В.* Авиационная инженерная психология. М.: Машиностроение, 1983. 232 с.

3. Психофизиология / Под ред. Ю. И. Александрова. 3-е изд. СПб.: Питер, 2007. 464 с.

4. *Шуберт Г.* Физиология человека в полете. М.; Л., 1937. 204 с.

5. *Боднер В. А., Закиров Р. А., Смирнова И. И.* Авиационные тренажеры. М.: Машиностроение, 1978. 192 с.

6. *Peters R. A.* Dynamics of the vestibular system and their relation to motion perception, spatial disorientation and illusions. Technical report NASA-CR-1309, NASA Ames Research Center, 1969.

7. *Schmidt S., Conrad B.* Motion Drive Signals for Piloted Flight Simulators. Technical report NASA-CR-1601, May 1970.

УДК 621.8

И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Косухина*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВОГО FEM АНАЛИЗА

В работе рассмотрены факторы, влияющие на результаты FEM анализа тепловых режимов работы электромеханических преобразователей.

Ключевые слова: *моделирование, электромеханический преобразователь, метод конечных элементов, тепловой анализ.*

I. A. Salova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. A. Kosuchina*
Student
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE RESULTS OF HEAT FEM ANALYSIS

The paper considers the factors influencing the results of FEM analysis of thermal modes of operation of electromechanical converters.

Keywords: *simulation, electromechanical converter, finite element method, thermal analysis.*

При разработке электрических машин еще на ранней стадии проектирования возникает необходимость в расчете и моделировании электромагнитных, тепловых и механических задач. Температурный анализ играет заметную роль. Как правило, интерес представляют распределение температуры, температурного градиента и теплового потока. Надежность проводов электрической машины в значительной степени определяет ее общую надежность. Доля отказов из-за повреждения обмоток для асинхронных двигателей мощностью более 5 кВт составляет 85–95%, при этом около 50% отказов вызывается эксплуатационными причинами, которые в большинстве случаев приводят к перегреву обмоток. Убытки от выхода из строя обмоток могут составлять до 80% от стоимости годового выпуска электрических машин. Эти обстоятельства приводят к выводу о необходимости достаточно подробного рассмотрения выбора проводов обмоток [1].

Прогнозирование теплового состояния электрической машины на этапе ее проектирования осуществляется посредством метода конечных элементов (FEM). Этот метод является основой системы инженерного анализа (CAE) и доступен не только специалистам-профессионалам, но входит в разряд обычных инструментов инженеров-проектировщиков и исследователей [2].

FEM – один из наиболее гибких и универсальных методов решения широкого круга задач механики сплошной среды, тепло-, электро- и магнитостатики и многих других задач науки и техники. CAE – система ELCUT позволяет решать двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции (потенциала), а также задачи расчета напряженно-деформированного состояния твердого тела [3].

При моделировании тепловых задач возникает вопрос оценки факторов, влияющих на достоверность распределения температуры в исследуемом объекте. В данной работе проводится анализ этих факторов на примере поперечного сечения электрической машины, показанной на рис. 1. На рисунке для упрощения не показаны магниты на роторе. В идеальном случае в каждом пазу необходимо поместить сечения всех витков с изоляцией. Однако тогда сетка конечных элементов оказывается слишком плотной, что приводит к невозможности расчета из-за большого числа узлов. Поэтому все витки в реальном объ-

екте заменяются n эквивалентными проводниками [4]. Суммарная площадь, занимаемая неизолированным проводом в каждом полупазе, может быть вычислена по формуле (1):

$$S_э = S \cdot k_{зп},\ мм^2, \quad (1)$$

где $S_э$ – площадь полупаза; $k_{зп}$ – коэффициент заполнения медью ($k_{зп} \approx 0.3–0.4$).

В свою очередь эквивалентные проводники могут быть круглыми или вытянутыми, образованными прямоугольной областью с двумя полуокружностями на концах. В этом случае суммарная площадь $S_э$ примет вид:

$$S_э = n\left(\frac{\pi d_э^2}{4} + k_в \cdot d_э^2\right),\ мм^2, \quad (2)$$

где n – число эквивалентных проводников; $d_э$ – диаметр эквивалентного проводника; $k_в$ – коэффициент вытянутости проводника (изменяется в диапазоне от 0 до 4 в зависимости от формы проводника). Тогда диаметр эквивалентного проводника находится из (3).

$$d_э = \sqrt{\frac{S_э}{\frac{\pi \cdot n}{4} + n \cdot k_в}}. \quad (3)$$

Далее в каждом полупазе геометрической модели равномерно размещаются эквивалентные проводники с диаметром $d_э$. Примеры их размещения показаны на рис. 1 и 2. Для каждого элемента модели задаются коэффициенты теплопроводности λ (Вт/(К·м).

Теплопередача осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловой радиацией. Моделирование теплопередачи в ELCUT учитывает только теплопроводность. Другие механизмы – конвекция и радиация – могут быть учтены в виде граничных условий, описывающих взаимодействие конечно-элементной модели с внешней средой и объектами. В рассматриваемой модели задавались два граничных условия 3-го рода на наружном и внутреннем ребрах:

– условие плотности конвективного потока $F_n = \alpha(T - T_0)$,

где α – коэффициент конвекции (Вт/(м^2·К)); $T_0 = 293K(20\ °C)$ – температура окружающей среды;

– условие радиации $F_n = \beta \cdot k_{SB}(T^4 - T_0^4)$, где β – коэффициент поглощения поверхности (β = 0,85); k_{SB} – константа Стефана-Больцмана; $T_0 = 293$ К – температура окружающей среды.

Постоянное значение тепловой нагрузки в эквивалентных проводниках за счет протекания тока задавалось в виде объемных плотностей тепловыделений (Вт/м^3).

Целью вычислительных экспериментов является исследование следующих факторов, влияющих на среднюю температуру в пазу:

– число эквивалентных проводников;

– значения коэффициентов теплопроводности изоляции и магнитопроводов;

– значения коэффициентов конвекции.

Если для проводников из меди коэффициент теплопроводности имеет вполне определенное значение, то для изоляции, заполняющей паз в модели, этот коэффициент может иметь значение в некотором диапазоне. Это объясняется тем, что под понятием «изоляция» в данном случае подразумевается совокупность изоляции собственно проводников (витков), пазовой изоляции и компаунда. В общем случае каждый из указанных видов изоляции имеет свой коэффициент теплопроводности. Для задания коэффициента теплопроводности изоляции берется некоторый усредненный коэффициент. Если в действительности такой усредненный коэффициент будет больше, чем задан в модели, то температура в эквивалентных проводниках (именно там она максимальна) снизится. Однако, если на самом деле коэффициент теплопроводности ниже, то увеличение температуры паза неизбежно, что может привести к перегреву электромеханической машины и потере ее работоспособности. Использование встроенного в ELCUT средства LabelMover позволяет задать коэффициент теплопроводности для изоляции в широких пределах и оценить изменение температуры (рис. 3) [3]. Кривые получены при фиксированных значениях коэффициента конвекции α =4 Вт/(м^2·К) и коэффициента теплопроводности магнитопроводов λ = 83 Вт/(К·м). Из графиков следует, что действительно с уменьшением коэффициента

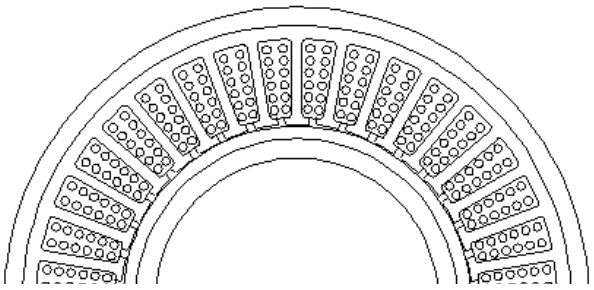


Рис. 1. Объект моделирования при заданном числе эквивалентных проводников n = 6 и $k_в = 0$

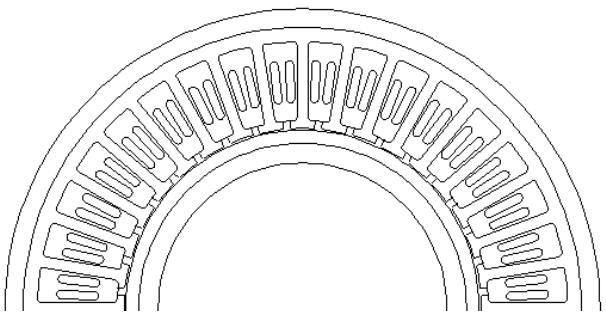


Рис. 2. Объект моделирования при заданном числе эквивалентных проводников n = 1 и $k_в \neq 0$

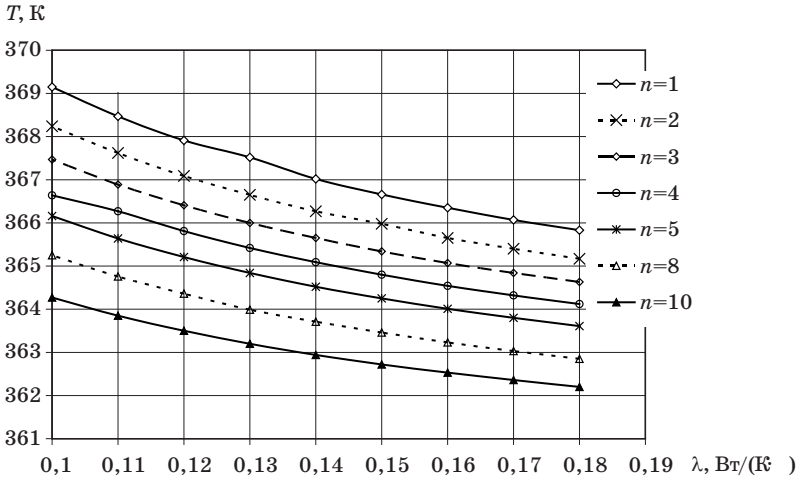


Рис. 3. Графики зависимости средней температуры в витках от коэффициента теплопроводности изоляции при разном количестве эквивалентных проводников n

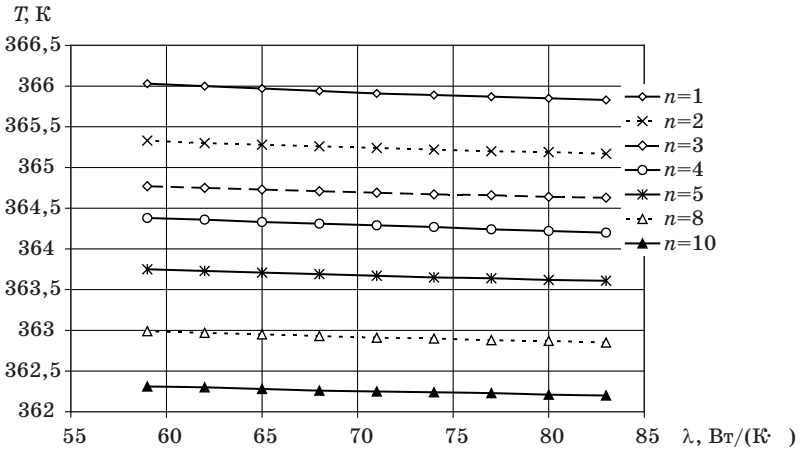


Рис. 4. Графики зависимости средней температуры в витках от коэффициента теплопроводности материала магнитопроводов статора и ротора при разном количестве эквивалентных проводников n

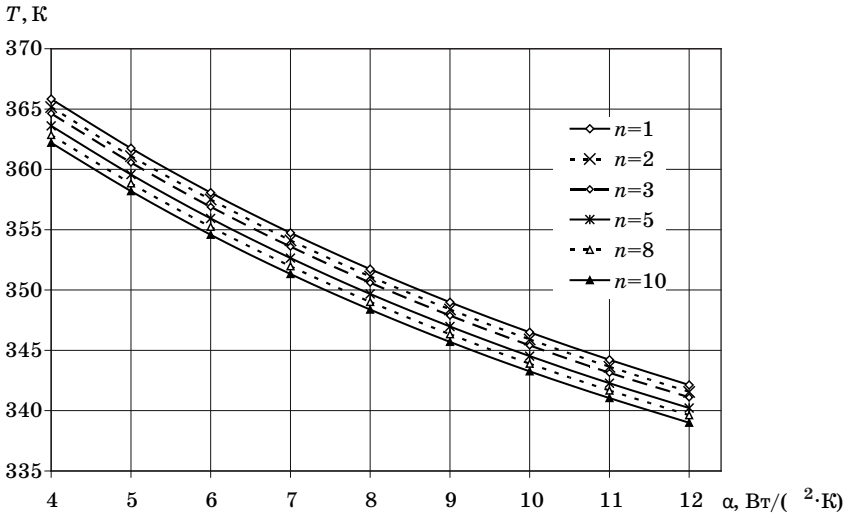


Рис. 5. Графики зависимости средней температуры по объему в витках от коэффициента конвекции при разном количестве эквивалентных проводников n

теплопроводности растет температура в проводниках, и чем меньше количество эквивалентных проводников, тем выше температура в них. Таким образом, при замене суммарной площади меди одним эквивалентным проводником в модели наблюдается максимальное значение температуры.

Влияние коэффициента теплопроводности магнитопровода статора и ротора показано на рис. 4. Кривые получены при фиксированных значениях коэффициента конвекции $\alpha = 4$ Вт/(м^2·К) и коэффициента теплопроводности изоляции $\lambda = 18$ Вт/(К·м).

Из графиков (рис. 4) следует, что с уменьшением коэффициента теплопроводности материала магнитопроводов статора и ротора температура в проводниках растет, но незначительно, в пределах 0,5 градуса. Использование LabelMover в ELCUT также позволяет оценить изменение максимальной температуры при различных значениях граничных условий (рис. 5). Кривые получены при фиксированных значениях коэффициентов теплопроводности изоляции $\lambda = 18$ Вт/(Км) и магнитопроводов $\lambda = 83$ Вт/(Км). Из графиков (рис. 5) следует, что с увеличением коэффициента конвекции уменьшается температура в проводниках, причем величина этих изменений значительна в пределах 20 °С. Таким образом, наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает неверное задание коэффициента конвекции.

Заключение

Таким образом, результаты моделирования тепловых режимов методом конечных элементов на стадии проектирования показали, что следует учитывать факторы, наиболее влияющие на точность результатов, а именно:

– число эквивалентных проводников;

– значение коэффициента теплопроводности изоляции;

– значение коэффициента конвекции.

При задании одного эквивалентного проводника результат моделирования дает максимально возможное значение температуры. На это значение, очевидно, и следует ориентироваться при выборе марки провода.

Влияние изменения коэффициента теплопроводности материала магнитопроводов (электротехническая сталь) на температуру в пазах незначительно.

Наибольшее влияние на максимальную температуру оказывает изменение коэффициента конвекции, поэтому при проектировании следует ориентироваться на его наименьшее значение.

Библиографический список

1. *Метельков В. П.* Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13. № 2.

2. *Мишичев А. И., Мартьянова А. Е.* Решение задач теплопроводности методом конечных элементов в CAE-системе ELCUT. Астрахань, 2001.

3. ELCUT v. 6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2017.

4. *Салова И. А.* Моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT. Методические указания к выполнению лабораторных работ. СПб.: ГУАП, 2015. 91 с.

УДК 621.337.41

Е. С. Смирнов*
магистрант
**Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАРКИРОВЩИКА М3 СТАНА 5000 ЛПЦ № 9

В статье рассчитана и приведена модель скалярного управления двигателем перемещения маркировочной головки.

Ключевые слова: *электропривод, маркировщик, двигатель, структурная схема, энкодер, преобразователь частоты, пропорционально интегральный регулятор.*

E. S. Smirnov*
Postgraduate Student
Magnitogorsk State Technical University G. I. Nosov

DEVELOPMENT OF A SCALAR FREQUENCY SYSTEM CONTROLS FOR THE M3 MARKER OF MILL 5000 HPZ NO. 9

The article calculates and presents the model of scalar motor control of marking head movement.

Keywords: *electric drive, marker, motor, structural scheme, encoder, frequency converter, proportionally integrated regulator.*

Данная машина расположена в цеху стана 5000 на участке линии резки, в котором осуществляется предварительная обрезь концов и кромок листов металла перед маркировкой. По окончании маркировки листы идут на линию отделки, склад [1].

Машина состоит из: главной балки (1), размещенной на двух колоннах (2); тележки (3), перемещающейся вдоль главной балки; шинопровода, через который осуществляется питание электродвигателя, энкодера (4), концевых и других электроаппаратов; редуктора (5), соединенного с валами двигателя, энкодера и ведущей шестерни; устройства подъема и опускания (6), приводимое в действие пневмоцилиндрами для перемещения головки маркировки краской (7); панели обслуживания (8), расположенной на одной из колонн (рис. 1).

Функции машины могут осуществляться автоматически и вручную, перемещение осуществляется в положение маркировки, готовности и обслуживания [2].

В результате проведенного исследования на опытном образце была представлена реальная диаграмма перемещения маркировочной головки.

Из диаграммы следует, что в разомкнутой системе присутствует ступенчатое задание на перемещение, в результате которого будет снижен срок службы агрегата. Это будет обусловлено более быстрой выработкой ресурса всех подвижных частей маркировщика, участвующих в позицио-

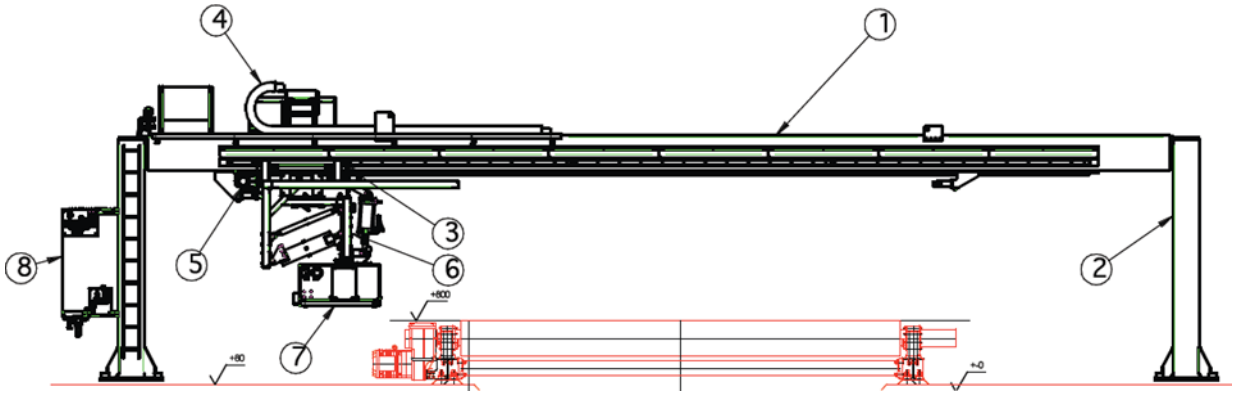


Рис. 1. Машина для маркировки краской

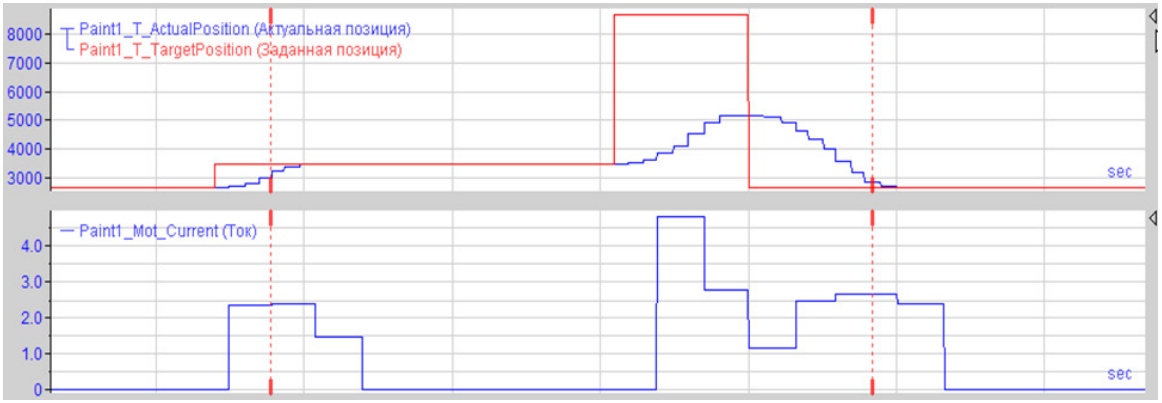


Рис. 2. Диаграмма перемещения красящей головки маркировщика

нировании, из-за отсутствия плавности хода и наличия вибраций в периоды пуска и торможения.

Исходя из анализа технологического процесса маркировочной машины был выбран двигатель 4А80В4У3, питание которого осуществлялось от преобразователя частоты типа SINAMICS G120C 6SL3210-1KE18-8UP1. По требованиям, предъявляемым к данному электроприводу перемещения тележки, было принято решение заменить разомкнутую систему скалярного регулирования скорости на замкнутую с пропорционально интегральным регулятором скорости. Для разработанной системы проведен расчет переходных процессов с использованием стандартного пакета Matlab.

Для улучшения качеств работы данного агрегата было разработано скалярное управление электроприводом с обратными связями по перемещению.

На рис. 3 приведена структурная схема системы скалярного регулирования для ПЧ-АД, построенная на основе компьютерной модели ADKnew [3]. В нее входят следующие блоки:

– задатчика интенсивности UF ZI, формирующий вместе с блоком Clock сигнал задания угловой частоты fz (для прямого пуска используются постоянный сигнал 50 Гц), изменяющийся линейно во времени;

Таблица 1

Параметры модели

Название	Значение	Комментарий
Cf_n	0,9	
l_{1n}	3,556	Номинальный ток двигателя
l_{mn}	1	W_0
J_d	0,0330	Момент инерции двигателя
L_2	0,0207	
L_m	0,3743	
M_n	10,0379	Номинальный момент двигателя
R_1	7,131	Сопротивление статора
R_2	3,4249	Сопротивление ротора
W_0	0	
W_1	1	
W_n	157,08	Номинальная частота двигателя
ans	9	
cosFn	0,83	
sn	5,8	Номинальное скольжение
km	1	Коэффициент модели
mc	0,9	Момент сопротивления при XX и при нагрузке

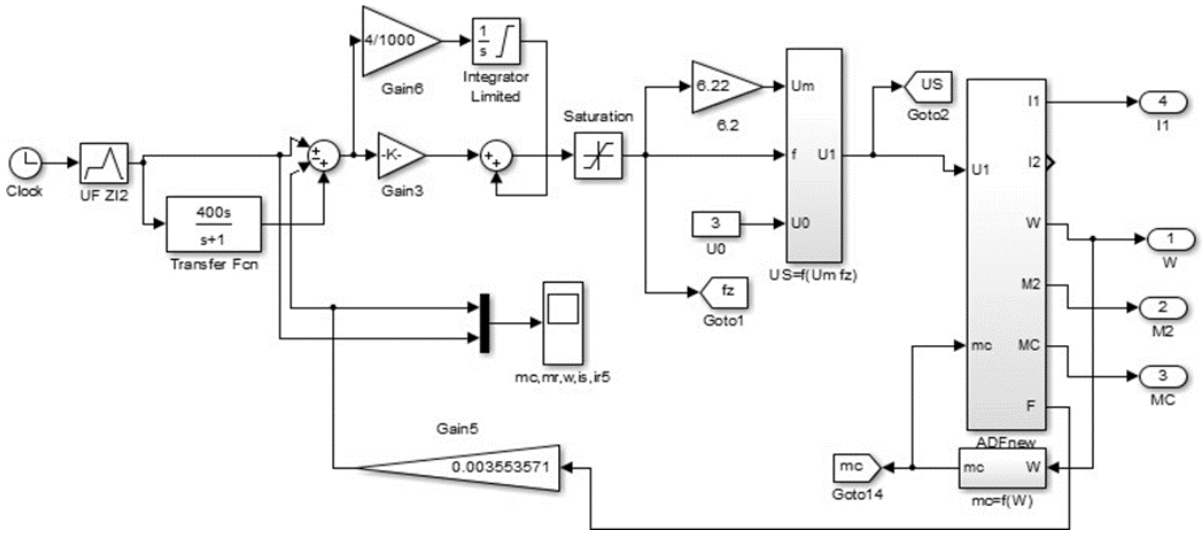


Рис. 3. Блочная схема модели системы скалярного регулирования ПЧ-АД [4]

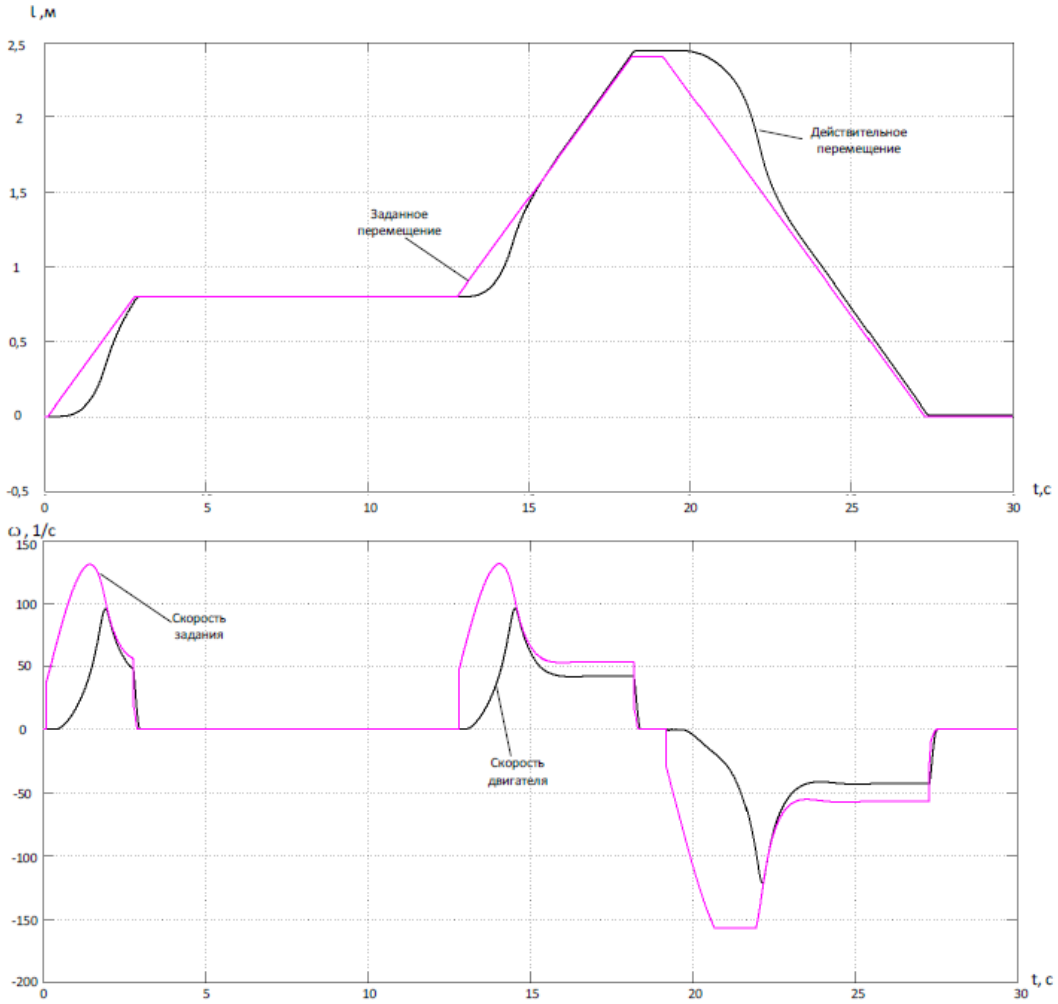


Рис. 4. Диаграммы перемещения/скорости задания и перемещения/скорости действительной двигателя

– измерения энергетических переменных АД PQS3z;

– формирования момента сопротивления в функции угловой скорости и времени;

– компьютерной модели ADKnew.

Расчет производился для асинхронного двигателя 4А80В4У3 по его паспортным данным.

Для получения переходных процессов необходимо настроить параметры структурной схемы модели, представленной на рис. 3 в программе Matlab. Настроенные параметры представлены в табл. 1.

Результатами проведенной работы являются:

1. Двигатель типа 4А80В4У3 имеет требуемый запас по моменту и обеспечивает перемещение головки маркировщика с заданной скоростью и ускорением.

2. Частотный преобразователь типа SINAMICS G120C 6SL3210-1KE18-8UP1 обеспечивает работу двигателя в статических и динамических режимах.

3. Система автоматического регулирования скорости обеспечивает требуемую точность и обладает плавным характером переходных процессов.

Библиографический список

1. SMS Demag, ОАО ММК Толстолистовой стан 5000. Приложение 2 «Описание оборудования и основные технические характеристики». 2006. 63 с.

2. *Никонов В. А.* Эксплуатационная карта № 45. Поиск неисправностей в системе управления позиционированием и подачей краски маркировочной машины № 3 (2492) участка листоотделки ЛПЦ 9. 3 с.

3. *Омельченко Е. Я., Моисеев В. О., Енин С. С.* Преобразователи частоты SINAMICS: учеб. пособие. Магнитогорск, 2015. 195 с.

4. *Омельченко Е. Я., Бондаренко В. А.* Разработка электроприводов по системе ПЧ-АД для станов тонкого волочения стальной проволоки. Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2012. Вып. 20. С. 92–100.

УДК 621.8

Д. В. Шишлаков*
кандидат технических наук, доцент
В. И. Гончарова*
студентка
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье представлены этапы разработки контроллера управления коллекторными двигателями для управления малогабаритными техническими комплексами. Также показаны результаты проводимых испытаний, что подтверждает работоспособность.

Ключевые слова: *коллекторный двигатель, контроллер, робототехника.*

D. V. Shishlakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. I. Goncharova*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE DEVELOPMENT OF THE CONTROLLER MOTORS CONTROL-TECHNICAL SYSTEMS

The article presents the stages of development of the control controller for collector engines to control small technical complexes. Also shows the results of the tests, which confirms the performance.

Keywords: *manifold engine, controller, robotics.*

В настоящее время мобильная робототехника проникает все в большее количество сфер нашей жизни. Роботы, разработанные такими компаниями, как Boston Dynamics, iRobot, KUKA Roboter, используются на промышленных предприятиях и для автоматизации рутинных домашних дел.

Одними из наиболее востребованных на рынке являются системы военного назначения, а также системы, способные работать в условиях чрезвычайных ситуаций [1]. Автономность, а также надежность и оптимальность алгоритмов управления – это основные требования, которые предъявляются ко всем роботам вне зависимости от сложности и функционального назначения [2]. Автономные системы способны быстрее, чем управляемые вручную, реагировать на изменения окружающей среды. При этом им не требуется дополнительные человеческие ресурсы для одновременного управления многими объектами, поэтому они в дальнейшем могут являться частями мультиагентных робототехнических систем. Известны многие способы навигации мобильных роботов на плоскости. Результаты исследования данного вопроса отражены во множестве научных работ. При этом в реальной жизни, особенно в системах военного назначения и условиях чрезвычайных ситуаций, более распространенной является задача навигации в условиях пересеченной местности. В таких случаях сама среда, по которой движется робот, иногда может восприниматься в качестве препятствия, которое необходимо обойти или каким-либо образом преодолеть.

В связи с этим целью работы является разработка контроллера управления коллекторными двигателями для малогабаритных технических комплексов; объектом исследования – колесный мобильный робот, двигающийся по пересеченной местности; предметом исследования – составные компоненты малогабаритных технических комплексов, а именно контроллер управления двумя коллекторными двигателями.

Контроллер управления был разработан с целью управления двумя коллекторными двигателями на малогабаритных технических комплексах. В ходе разработки контроллера была создана схема электрическая принципиальная в комплексной системе автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств Altium Designer (далее САПР), которая представлена на рис. 1.

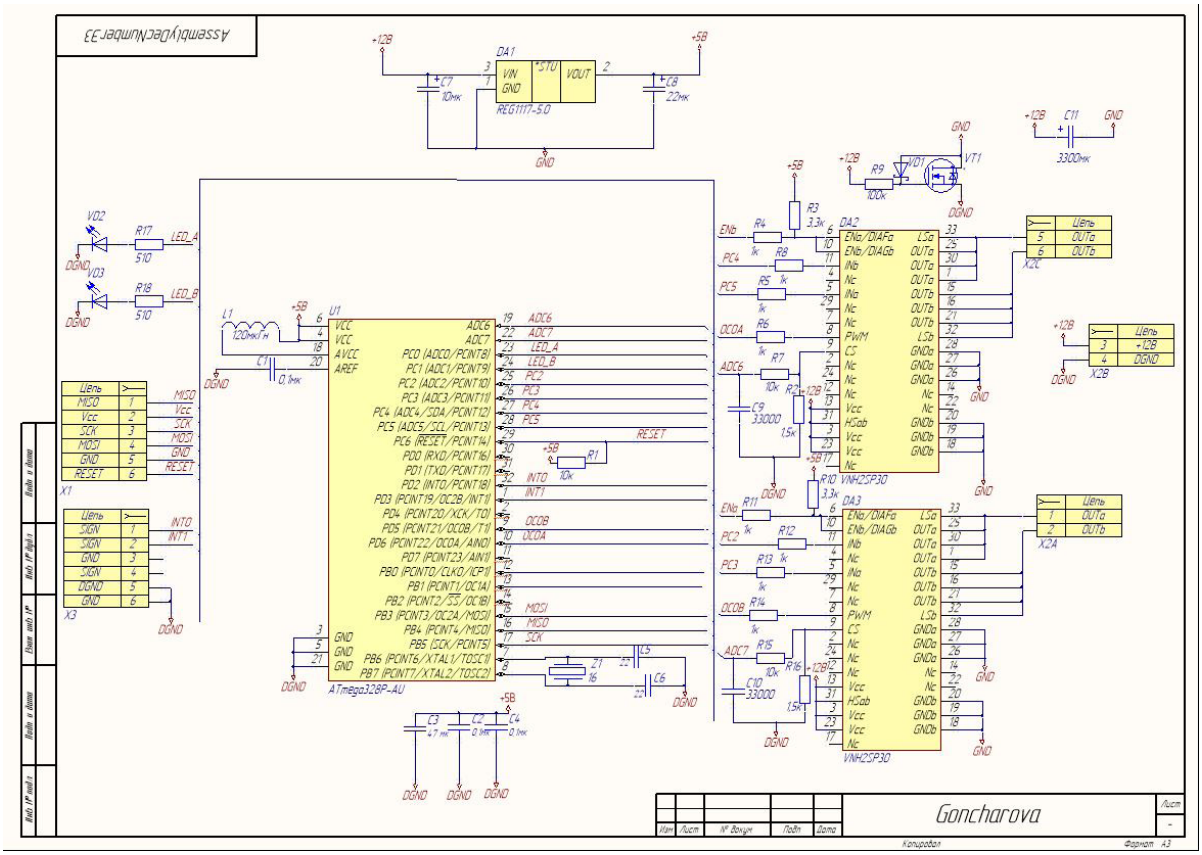


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема

В ходе разработки был использован микроконтроллер ATmega328, именуемый на схеме U1, который имеет ряд особенностей, удовлетворяющих оптимальным условиям работы разрабатываемого контроллера управления:

– высокая производительность, низкое энергопотребление;

– улучшенная RISC-архитектура;

– энергонезависимая память данных и программ;

– рабочее напряжение: от 1,8 до 5,5 В;

– температурный диапазон: от -40 до 85 °С.

Также два мощных драйвера электродвигателей VNH2SP30 [3], именуемых на принципиальной схеме DA2 и DA3, имеющих ряд ключевых особенностей, по которым и были выбраны именно эти драйверы:

– максимальное напряжение: 16V;

– максимальный ток: 30 А;

– рабочий непрерывный ток: 14А;

– максимальная частота ШИМ: 20 кГц;

– защита от перегрева;

– контроль понижения напряжения питания.

Подключение платы происходит по средствам одноплатного компьютера Raspberry Pi, который представляет собой маленькое устройства в виде одной платы без корпуса. Одним из плюсов выбранного устройства является программирование под Embedded Linux. Данная операционная система и стала решающим фактором в выборе именно этого продукта, так как имеет огромное количество примеров и готовых проектов, которые можно найти в свободном доступе в различных сообществах пользователей Raspberry Pi. На рис. 2 представлена схема

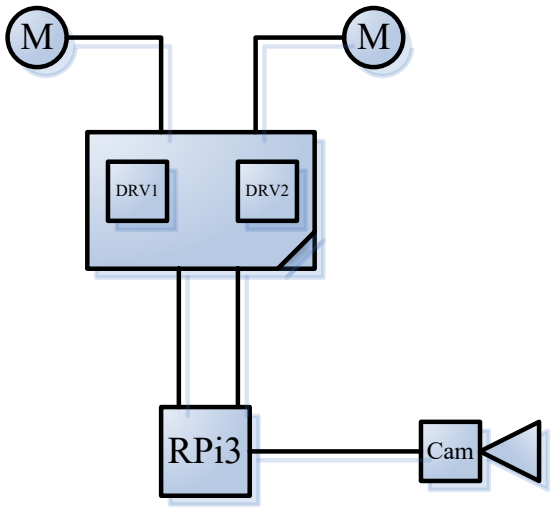


Рис. 2. Схема управления малогабаритным техническим комплексом: М – коллекторный двигатель; DRV1, DRV2 – драйвера двигателя, находящиеся непосредственно на разработанном контроллере; RPi3 – одноплатный компьютер Raspberry Pi 3.0; Cam – камера наблюдения посредством робота

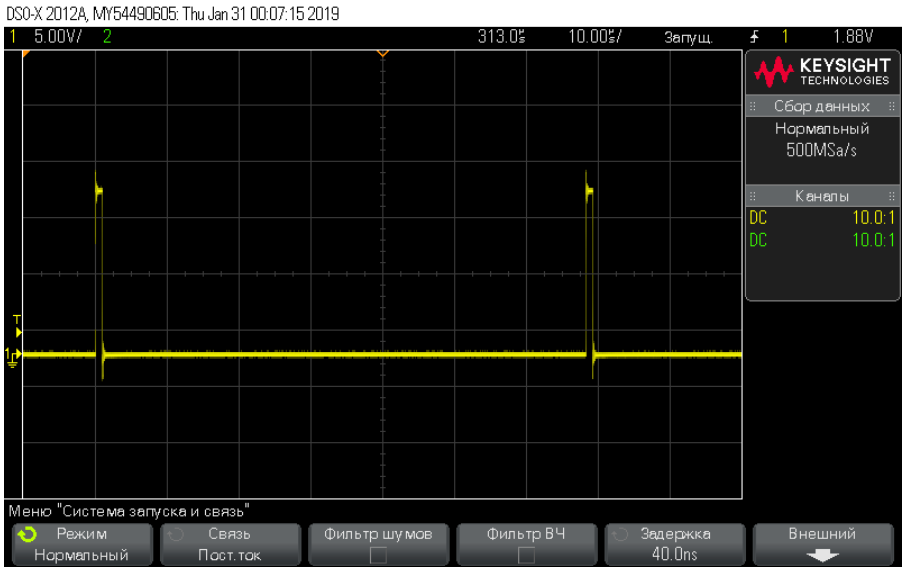


Рис. 3. ШИМ сигнал при S = 1000

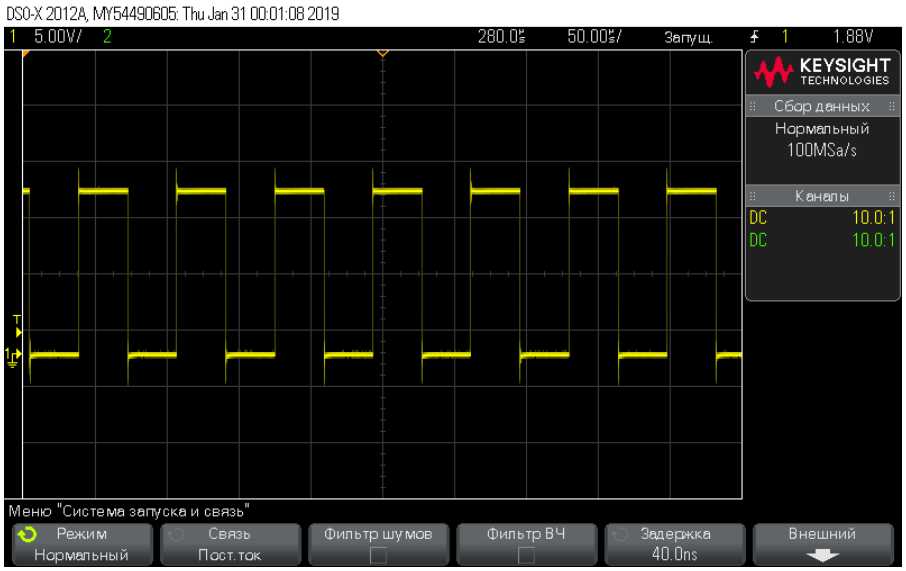


Рис. 4. ШИМ сигнал при S = 2000

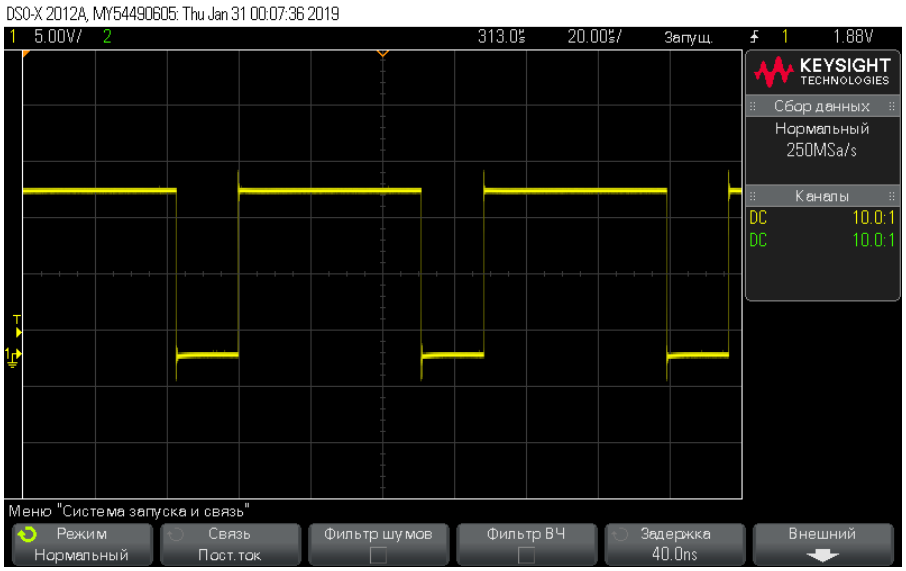


Рис. 5. ШИМ сигнал при S = 4000

управления малогабаритным техническим комплексом.

Была проведена широтно-импульсная модуляция (далее ШИМ), при которой подвергался изменениям коэффициент заполнения $k_з$. Так как при проведении ШИМ частота и амплитуда сигнала являются величинами неизменными, то $k_з$ – самый важный параметр. Осциллограммы испытаний продемонстрированы на рис. 3–5 и представлены с разными величинами $k_з$. Также введем величину, обратную $k_з$, и обозначим ее S – скважность.

Из результатов проведенных лабораторных исследований видно, что увеличение величины коэффициента заполнения $k_з$ влияет на увеличение скорости вращения моторов и уменьшает скважность.

Библиографический список

1. *Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D.* Introduction to autonomous mobile robots // Cambridge, Mass.: MIT Press, 2011. P. 435.

2. Организация программного движения мобильного робота при обходе препятствий / Ю. В. Литвинов, С. Н. Фролов, А. Б. Бушуев, В. В. Мазулина // ТРОО «Бизнес-Наука-Общество». 2013. Т. 7. С. 25–26.

3. Datasheet VNH2SP30-E, MultiPowerSO-30.

УДК 004.896:621.865

С. Ф. Яцун*
доктор технических наук, профессор
А. В. Мальчиков*
кандидат технических наук
А. С. Яцун*
кандидат технических наук
Е. Н. Политов*
кандидат технических наук
**Юго-Западный государственный университет*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА

В работе рассмотрена одна из возможных реализаций системы управления приводами промышленного экзоскелета. Записаны уравнения, реализующие копирующий, а также ассистирующий режимы работы бедренного шарнира экзоскелета в процессе ходьбы по ровной горизонтальной поверхности. В статье содержатся результаты численного моделирования системы управления, и выполнен сравнительный анализ режимов работы.

Ключевые слова: *промышленный экзоскелет, математическое моделирование, копирующая система управления.*

S. F. Jatsun*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. V. Malchikov*
PhD Sc. Tech.
A. S. Yatsun*
PhD Sc. Tech.
E. N. Politov*
PhD Sc. Tech.
**South-West State University*

MATHEMATICAL MODELING OF THE CONTROL SYSTEM OF INDUSTRIAL EXOSKELETON

This paper considers one of the possible implementations of the drive control system of an industrial exoskeleton. The equations realizing the copying and assisting modes of the femoral hinge of the exoskeleton in the process of walking are written. The article contains the results of numerical simulation of the control system and a comparative analysis of operating modes.

Keywords: *industrial exoskeleton, mathematical modeling, copying control system.*

При реализации системы управления экзоскелетов используют различные подходы [1–5]. Одним из путей решения задачи синхронного движения звеньев экзоскелета и оператора является использование копирующей системы управления, задающим воздействием в которой является усилие, возникающее между телом человека и конструкцией робота [6–7]. Задача копирующей системы управления заключается в минимизации усилия между силовым каркасом, на котором закреплено переносимое оборудование, и человеком. Еще одной разновидностью управления экзоскелетом является ассистирующая система. В данном случае экзоскелет оказывает воздействие на оператора, компенсирующее нагрузку или расширяющее функциональные возможности. Копирующая система управления может найти применение для полноразмерных экзоскелетов, конструкция которых позволяет полностью перенести нагрузку непосредственно на опорную поверхность. Такие устройства могут найти применение для погрузочно-разгрузочных работ, при переносе и удержании груза. Полноразмерные экзоскелеты дорогостоящи, сложны и не универсальны, поэтому все чаще на рынке промыш-

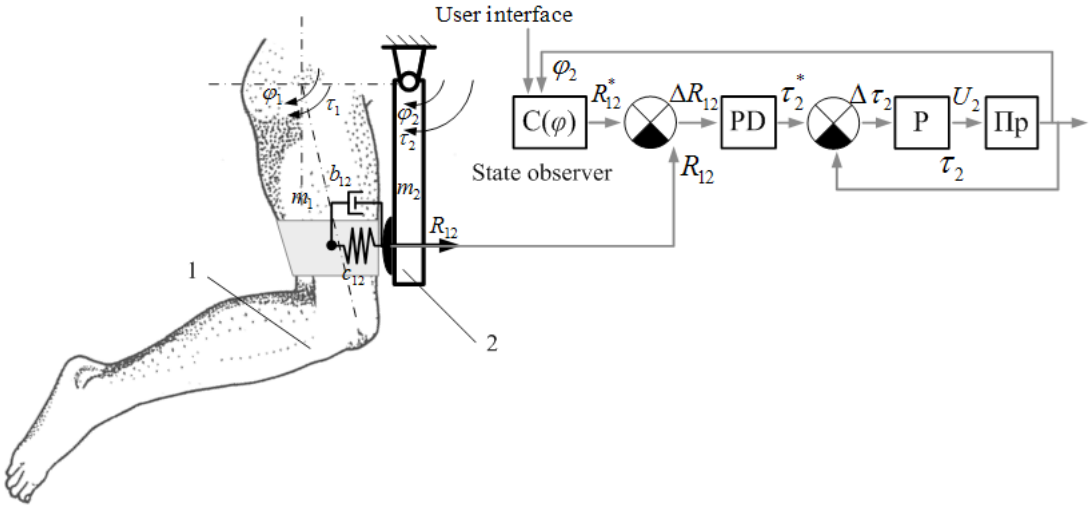


Рис. 2. Схема системы управления бедренного привода промышленного экзоскелета

ленных экзоскелетов появляются их версии с активацией одной или нескольких пар суставов. Наиболее распространенной конструктивной схемой промышленного экзоскелета является модель, оснащенная только бедренными электроприводами (рис. 1).

В таких экзоскелетах копирующая система управления не даст требуемого эффекта разгрузки оператора, и необходима реализация ассистирующего воздействия, направленного на компенсацию влияния нагрузки.

В настоящей работе предложена схема системы управления, способная реализовать как копирующий, так и ассистирующий режимы требуемой интенсивности.

Рассмотрим схему устройства и системы управления, показанную на рис. 2.

Предлагаемая схема позволяет реализовать различные стратегии управления ассистирующим экзоскелетом. Выбор и настройка режима осуществляется посредством пользовательского интерфейса.

В общем случае напряжение на двигателе определяется уравнением:

$$U_2 = e_R \cdot kp + \dot{e}_R \cdot kd - \tau_2 \cdot kp_\tau + \left(\frac{d\left(\left(e_R \cdot kp + \dot{e}_R \cdot kd \right) - \tau_2 \right)}{dt} \right) \cdot kd_\tau , \qquad (1)$$

где kp, kd – коэффициенты ПД-регулятора в контуре управления усилием на манжете; kp_τ, kd_τ – коэффициенты ПД-регулятора в контуре управления момента на приводе устройства. Текущее значение момента τ_2, определяемого с помощью силомоментного датчика (либо через датчик тока обмотки двигателя); e – ошибка ($\dot{e}_i$ производная ошибки) реакции (усилия) между экзоскелетом и оператором.

В копирующем режиме, когда движения звена 2 повторяют движения конечности оператора 1, минимизируя усилие между человеком и аппаратом ($R_{12}^* = 0$):

а) 

б) 

Рис. 1 Промышленные экзоскелеты, оснащенные бедренными приводами: а – ActiveLink; б – ATOUN MODEL Y

$$e_i = 0 - R_{12}. \quad (2)$$

Для реализации же ассистирующего режима в простейшем случае можно представить $R_{12}^* = f(\phi)$ как функцию угла перемещения. Таким образом, возможно осуществить гравитационную компенсацию массы экзоскелета. В более сложных режимах значение реакции может быть функцией нескольких переменных $R_{12}^* = f(\phi, \tau_2 \ldots)$. При этом блок принятия решения $C(..)$ может включать математическую модель объекта управления, что может быть использовано для компенсации моментов инерции конечности экзоскелета. Ошибка при этом:

$$e_i = R_{12}^* - R_{12}. \quad (3)$$

В ходе математического моделирования используем следующий алгоритм для формирования заданного значения усилия $R_{12}^* = f(\phi, \dot{\phi})$:

$$R_{12}^* = \begin{cases} 0 \; if \; \phi_2 < \phi_{\min} \\ (\phi_2 - \phi_{\min}) ka \cdot \text{sign}(\dot{\phi}_2) \; if \; \phi_{\min} < \phi_2 < \phi_{\text{mid}} \\ (2\phi_{\text{mid}} - \phi_2) ka \cdot \text{sign}(\dot{\phi}_2) \; if \; \phi_{\text{mid}} < \phi_2 < \phi_{\max} \\ 0 \; if \; \phi_2 < \phi_{\max} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\phi_{\min}, \phi_{\text{mid}}, \phi_{\max}$ – значения углов, определяющих диапазон действия ассистирующего режима, могут быть настроены индивидуально под конкретную задачу.

Таблица 1

Основные параметры моделируемой системы

Масса звена	1200 г
Длина звена	0,4 м
Мощность привода	205 Вт
Упругость подвеса манжеты	3000 Н/м
Вязкость подвеса	200

Для удобства записи примем исходный набор параметров регулятора в виде вектора:

$$\text{B} = \bar{b}(kp, kd, kp_\tau, kd_\tau ka, \phi_{\min}, \phi_{\text{mid}}, \phi_{\max}). \quad (5)$$

При моделировании для описания движения механической системы используем уравнения:

$$J_2 \ddot{\phi}_2 = R_{12} l_2 - \tau_2, \quad (6)$$

где l_2 – длина звена экзоскелета; R_{12} – усилие между экзоскелетом и оператором, определяемое упруго-вязкими свойствами манжеты и конечности оператора:

$$R_{12} = c'(\phi_2 - \phi_1) + b' \frac{d(\phi_2 - \phi_1)}{dt}, \quad (7)$$

где c', b' – приведенные коэффициенты жесткости и вязкости системы человек – экзоскелет,

Покажем результаты моделирования работы системы управления в различных режимах при следующих параметрах модели (табл. 1).

При моделировании использовался периодический закон изменения крутящего момента в бедренном суставе человека при ходьбе порядка 4 км/ч [8]. Данную скорость примем оптимальной при перемещении работника в пределах производственной площадки, переносе грузов, в процессе такелажных работ.

На рис. 3 показаны результаты моделирования копирующей системы управления со следующими параметрами:

$$\text{B} = \bar{b}(5, 2.5, 1, 0.3, 0, -5, 5, 15).$$

Как показали результаты моделирования при текущих параметрах системы управления

$$\text{B} = \bar{b}(5, 2.5, 1, 0.3, 0, -5, 5, 15),$$

максимальное усилие, которое необходимо приложить оператору для реализации ходьбы, составляет 4 км/ч, 7,5 Н. При этом интегральное значение за период не превышает 2,5 Н.

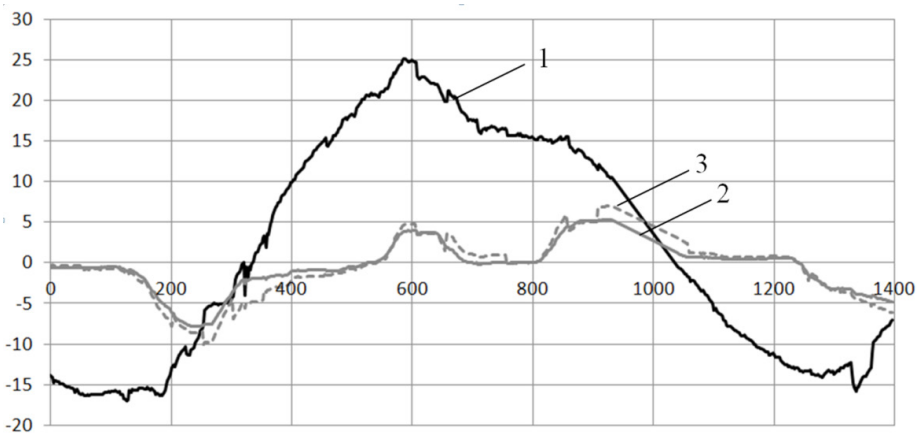


Рис. 3. Результаты моделирования копирующего режима: 1 – перемещение звена ϕ_2; 2 – усилие на манжете R_{12}, Н; 3 – напряжение для двигателя U_2, В

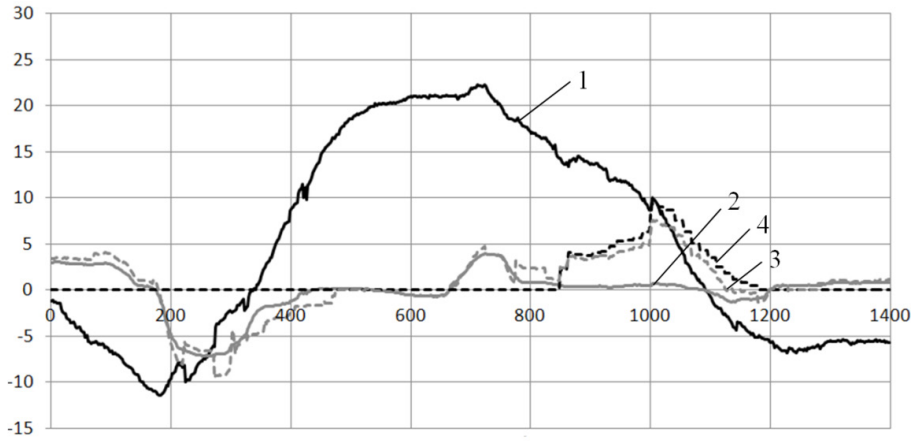


Рис. 4. Результаты моделирования ассистирующего режима:
1 – перемещение звена ϕ_2; 2 – усилие на манжете R_{12}, Н; 3 – напряжение для двигателя U_2, В;
4 – ассистирующее усилие R_{12}^*, Н

Покажем результаты моделирования ассистирующего режима со следующими параметрами системы управления

$$B = \bar{b}(5, 2.5, 1, 0.3, 0.2, -5, 5, 15).$$

Как видно из результатов моделирования, введение ассистирующего импульса в возвратной фазе ходьбы позволило минимизировать задающее воздействие. Так, усилие, которое прикладывает оператор в возвратной фазе ходьбы, не превышает 1 (Н), что в 5 раз меньше, чем в копирующем режиме. Это позволило снизить интегральное значение до 1,85 (Н).

Посмотрим результаты моделирования при увеличенном коэффициенте ассистирующего импульса $B = \bar{b}(5, 2.5, 1, 0.3, 0.65, -5, 5, 15)$:

Как видно на графике, введение ассистирующего импульса позволило создать усилие, действующее на оператора посредством манжеты в направлении движения, то есть осуществить подталкивание ноги человека.

Согласно результатам моделирования ассистирующее усилие достигает значения 13 (Н) в возвратной фазе ходьбы. Однако за счет того, что и манжета экзоскелета, и нога человека обладают упругостью, значительный импульс привел к колебательному характеру движения звена экзоскелета.

Проведенные численные эксперименты доказали возможность применения разработанной системы управления для копирующего и ассистирующего режимов работы промышленного экзоскелета в процессе ходьбы со скоростью 4 (км/ч). Малые коэффициенты ассистирования позволяют снизить нагрузки на оператора в процессе работы с экзоскелетом, однако не позволяют осуществить разгрузку. Увеличение коэффициентов ассистирования позволяет создать

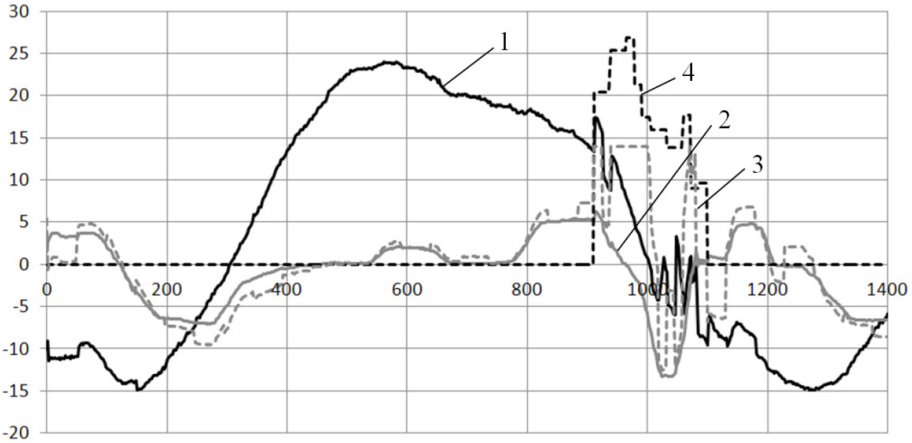


Рис. 5. Результаты моделирования ассистирующего режима:
1 – перемещение звена ϕ_2; 2 – усилие на манжете R_{12}, Н; 3 – напряжение для двигателя U_2, В;
4 – ассистирующее усилие R_{12}^*, Н

импульс, «подталкивающий» конечность оператора в процессе ходьбы, что позволяет снизить нагрузку на скелетно-мышечный каркас. В то же время появление «помогающего» импульса приводит к появлению паразитных колебаний звеньев экзоскелета, что может негативно сказываться на комфорте использования промышленного экзоскелета. Авторы работы считают, что тонкая индивидуальная настройка параметров ассистирующего режима под конкретную задачу использования может обеспечить положительный эффект. Для этого описанная система управления должна оснащаться пультом (см. рис. 1), позволяющим настроить работу промышленного экзоскелета.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00540).

Библиографический список

1. *Anam K., Al-Jumaily A.* Active exoskeleton control systems: State of the art // Procedia Engineering. 2012. Т. 41. С. 988–994.

2. *Jatsun S.* Study of controlled motion of exoskeleton moving from sitting to standing position // Advances in Robot Design and Intelligent Control. Springer, Cham. 2016. С. 165–172.

3. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences // Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham. 2016. С. 361–368.

4. *Jatsun S.* Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion // 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA). IEEE. 2015. С. 1–6.

5. *Jatsun S.* Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements // Advances in Cooperative Robotics. 2017. С. 797–805.

6. *Aguirre-Ollinger G.* Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton // 2007 IEEE 10th international conference on rehabilitation robotics. IEEE. 2007. С. 188–195.

7. *Fineberg D.* Vertical ground reaction force-based analysis of powered exoskeleton-assisted walking in persons with motor-complete paraplegia // The journal of spinal cord medicine. 2013. Т. 36. № . 4. С. 313–321.

8. *Enoka R.* Neuromechanics of human movement. Human kinetics, 2008.

УДК 004.91

М. В. Белоусова*
аспирант
В. В. Булатов**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕКЛАМАЦИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье предложен подход к автоматизации сбора и обработки претензионных актов, поступающих на предприятие-изготовитель как в процессе входного контроля, так и в гарантийный период эксплуатации. Разработана форма журнала рекламаций при многоуровневой структуре каталога выпускаемой продукции.

Ключевые слова: *рекламация, продукция, обработка данных, автоматизированная форма.*

M. V. Belousova*
PhD Student
V. V. Bulatov**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATION OF THE PROCESSING OF CLAIMS DATA IN ENGINEERING PLANTS

The article suggests an approach to automate the collection and processing of claim acts submitted to the manufacturer during the incoming inspection and warranty period of operation. The form of a complaint journal has been developed for a multilevel structure of the product catalog.

Keywords: *complaint, products, data processing, automated form.*

Проблема гарантии высокого качества выпускаемой продукции, а также удовлетворенности запросов заказчика в настоящее время является актуальной в деятельности любого промышленного предприятия.

С увеличением каталога или серии выпускаемой продукции происходит возрастание количества обращений заказчика/потребителя о несоответствии заявленным техническим характеристикам в гарантийный период. Предприятие должно оптимизировать трудовые ресурсы для обеспечения обработки, оценки и анализа заявленных претензий. Все рекламации должны быть задокументированы и оценены. Это необходимо для того, чтобы понять потенциальную угрозу неисправности, а также для того, чтобы при последующем повторном появлении дефекта максимально сократить время реакции и устранить претензию в кратчайшие сроки. В связи с этим возникает необходимость автоматизации процесса обработки и хранения данных обращений.

Дадим понятие рекламации/рекламационного акта. В соответствии с [1] рекламация – письменное заявление потребителя установленной формы изготовителю (поставщику) на обнаруженные в период действия гарантийных обязательств дефекты и (или) несоответствие комплектности поставленных изделий требованиям ТУ, а также требование о восстановлении комплектности или замене дефектных изделий. Подчеркнем, что это – письменное заявление. Таким же образом понятие рекламации описывается в [2].

С претензиями, которые поступают изготовителю, должна производиться работа. Под рекламационной работой понимают комплекс мероприятий по подготовке, направлению и рассмотрению рекламаций в целях установления причин и характера выявленных дефектов и их устранения [3].

В общем случае алгоритм проведения рекламационной работы на предприятии можно описать следующим образом:

1. Поступление претензии от потребителя (рекламационный акт, уведомление, письмо, телефонограмма и т. д.).

2. Регистрация претензии в Журнале регистрации рекламаций.

3. Рассылка претензии техническим службам предприятия, представителям производства для возможности принятия основного решения по проблеме.

4. Далее после анализа претензия либо отклонение, либо устранение неисправности службами предприятия-изготовителя.

5. Первичный анализ неисправности (вина изготовителя, эксплуатирующей организации и т. д.).

Следует отметить, что данные рекламации являются первоисточником при оценке показателей надежности в эксплуатации.

К основным показателям надежности, которые необходимо контролировать в процессе эксплуатации, относится: средняя наработка на отказ и время восстановления.

Некоторые изделия обладают возможность представлять данные о наработке. Например, одометры поездов отображают наработку в километрах. Кроме того, в рекламации должно быть указано время фактического ремонта, необходимого для оценки времени восстановления. Эта информация должна обязательно отражаться в рекламационных актах.

Помимо данной информации при статистической оценке необходимы максимально полные данные о техническом объекте:

– данные эксплуатирующей организации (например, завод, предприятие, депо и т. д.), контактные данные;

– дата поступления рекламации;

– дата изготовления;

– серийный номер изделия;

– первоначальная классификация отказа (с кодом);

– модель вагона;

– меры по устранению неисправности.

Для сохранения и обработки данных специалист по работе с рекламациями должен внести данные письма в общую базу предприятия.

Для автоматизации процесса учета данных претензий необходимо организовать комплекс мероприятий, который направлен на установление причин и характера несоответствий.

Актуальной является организация работ по управлению рекламациями. На сегодняшний день существует ряд программ, позволяющих автоматизировать процесс обработки претензий от заказчиков и эксплуатирующих организаций.

Примером российского продукта является «1С:Предприятие 8. ТОИР. Управление ремонтами и обслуживанием оборудования» [4]. Данный программный пакет обладает следующими функциональными возможностями:

1. Иерархическое ведение списка оборудования.

2. Справочные системы (виды дефектов, графики работ, технологические карты ремонтов, паспорта оборудования и др.).

3. Учет выполненных работ путем формирования актов выполненных работ.

4. Автоматизация процесса составления заявок на ремонт.

5. Интеграция с другими продуктами 1С.

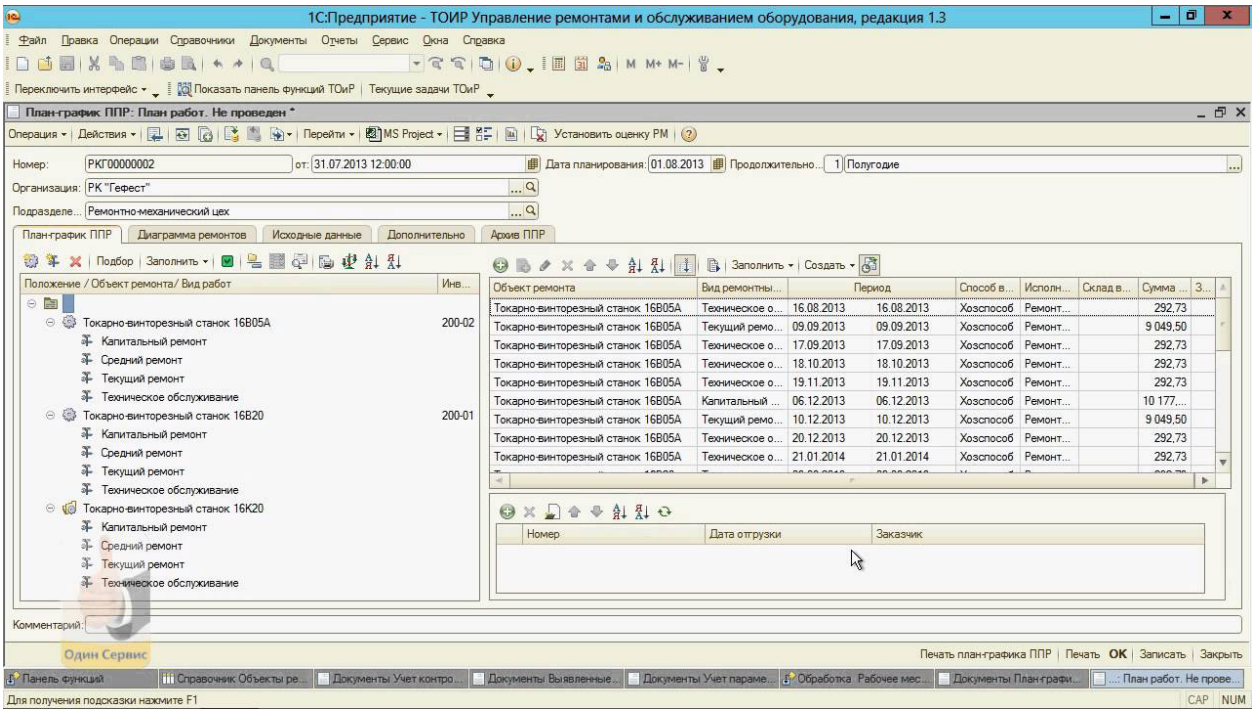


Рис. 1. Интерфейс программы 1С ТОиР

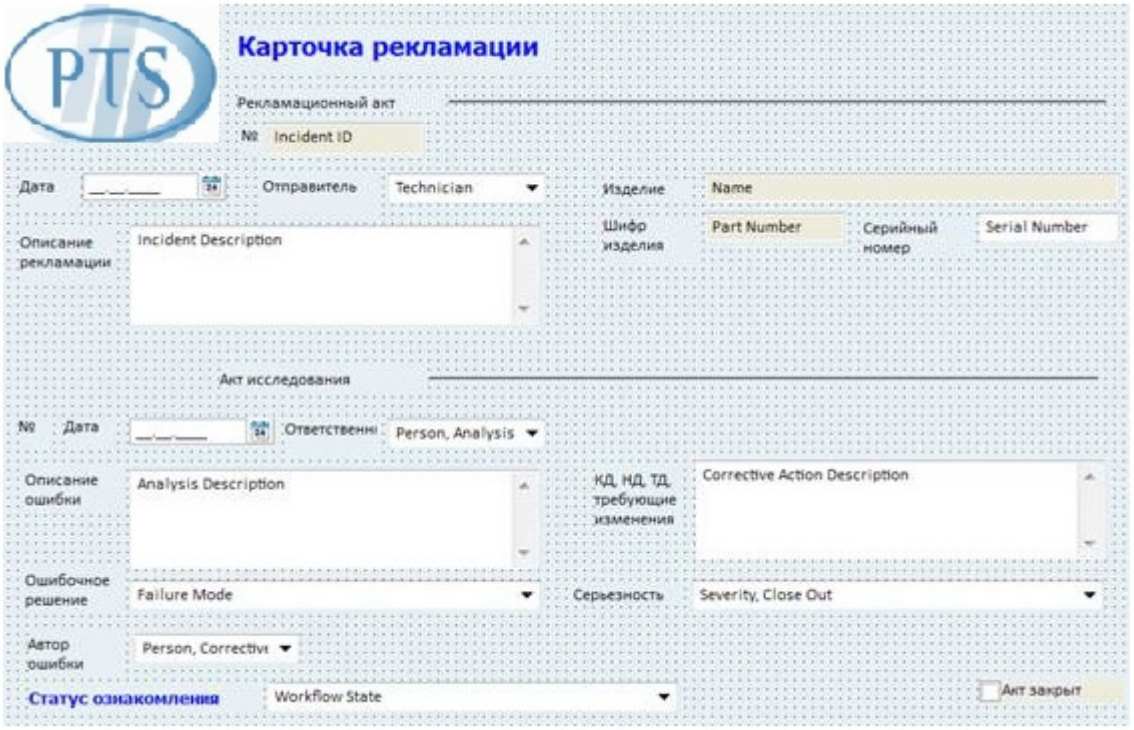


Рис. 2. Карточка рекламации в Windchill Quality Solutions

Интерфейс системы управления ремонтами и обслуживанием оборудования 1С ТОиР представлен на рис. 1.

Другим примером является ПО Windchill Quality Solutions, которое предназначено для управления качеством изделия на всем протяжении его жизненного цикла. Данный программный пакет имеет модульную структуру и позволяет решать различные задачи в едином интерфейсе и общей базой данных [5].

К основным функциональным возможностям Windchill Quality Solutions относится:

1. Расчет надежности (марковские цепи, дерево неисправностей, анализ видов, последствий и критичности отказов, минимизация их последствий).

2. Применение справочников радиоэлектронных и механических компонентов для расчета надежности.

3. Расчет стоимости жизненного цикла (LCC).

4. Хранение и классификация информации об отказах (FRACAS).

В Windchill Quality Solutions разработана карточка рекламаций, которая позволяет автоматизировать обработку и управление большим объемом данных (рис. 2).

К основным недостаткам перечисленных программ относится стоимость программного продукта, которая может достигать 1 млн рублей, и необходимость доработки под требования определенных предприятий, на что также уходят дополнительные финансовые ресурсы.

Поэтому предлагается использовать такой подход, который помог бы реализовать сбор и обработку данных рекламаций с минимальными материальными затратами.

Структура и алгоритм использования формы Журнал рекламаций в MS Excel

Для оперативного реагирования на претензии и иную информацию по качеству поставляемой продукции, своевременного доведения ее до различных подразделений с наименьшими для предприятия затратами была разработана специальная форма в MS Excel. Она учитывает алгоритм претензионной работы с потребителем и специфику продукции, выпускаемой на предприятии (рис. 3, 4).

Постановка задачи

Имеется перечень предприятий-потребителей, для каждого из которых существует свой список поставляемых изделий. У изделия есть каталог узлов, имеющих свои ответвления (в зависимости от изделия и предмета рекламации). Пользователь должен иметь возможность, выбрав заказчика, в соседней ячейке выбрать из выпадающего списка нужное ему изделие, на предмет которого пришла претензия. В следующей соседней ячейке пользователь должен иметь возможность выбрать нужный ему узел, входящий в рассматриваемое изделие, и т. д. (рис. 3, 4).

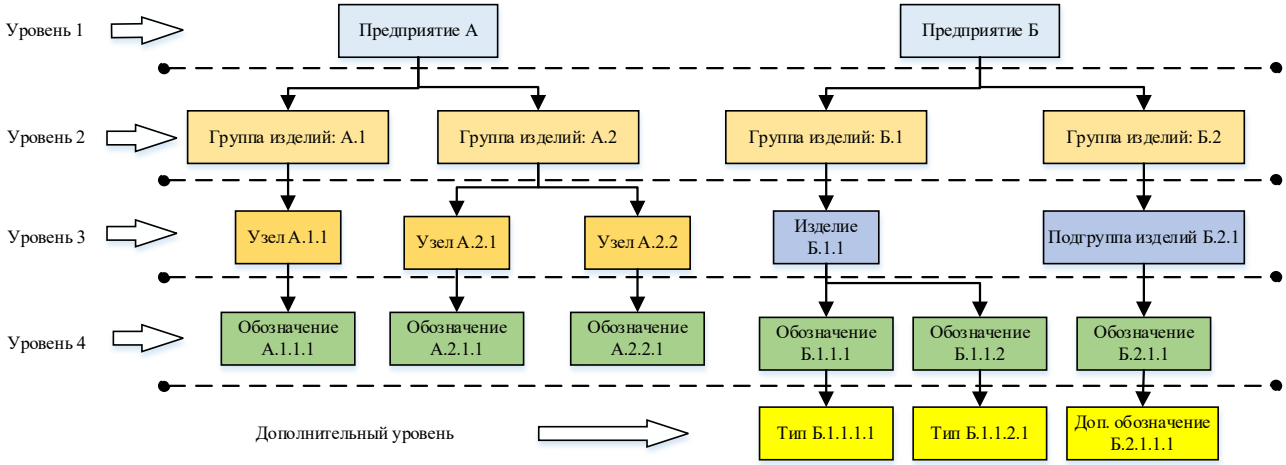


Рис. 3. Четырехуровневая модель обработки данных рекламаций

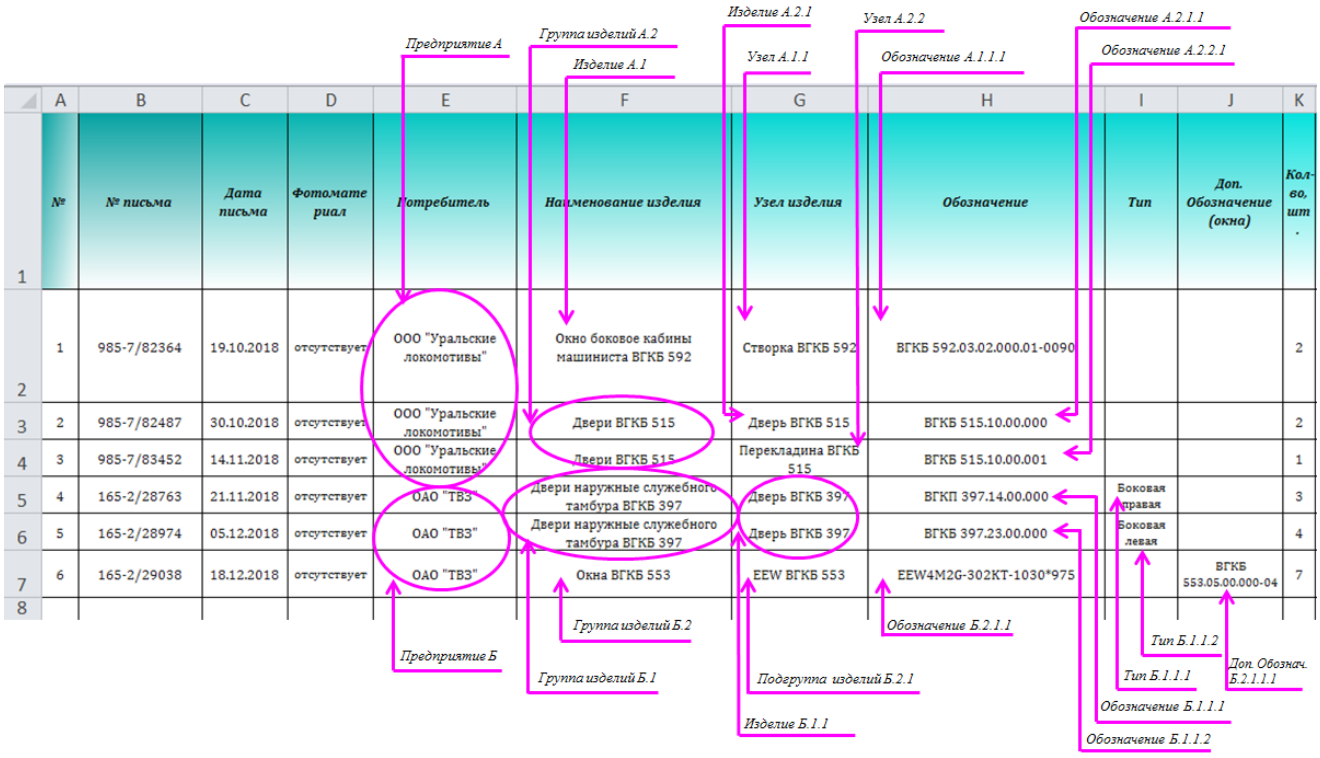


Рис. 4. Четырехуровневая модель в реализации

Четырехуровневая модель обработки данных рекламаций

Иерархия изделия подразумевает 4 основных уровня: Потребитель → Группа изделий → Изделие/Узел (рис. 3).

Надо понимать, что 2-й уровень может варьироваться в зависимости от конечного звена. Иными словами, если нас интересует претензия по существу элемента цельного изделия (например, узел А.1.1 изделия А.1), то на уровне № 2 будет наименование продукции (изделия). Если же нас интересует изделие целиком (рекламация пришла на всю дверь, например А.2.1), тогда на уровне № 2 будет стоять вся группа изделий. Следовательно, и 3-й уровень тоже может изменяться в зависимости от корня проблемы претензионной заявки. Для конкретики и удобства дальнейшего анализа введен дополнительный 5-й уровень для тех элементов, для которых это возможно. Например, у изделий Б.1.1 возможен выбор типа Б.1.1.1 и Б.1.1.2. Также в данной форме можно учитывать особые случаи поступления рекламаций: при возникновении претензии на группу изделий Б.2 в качестве идентификации изделия в тексте рекламационного письма от потребителя используется тип обозначения Б.2.1.1 по техническим условиям. Однако унифицировано сбор статистики от заказчика осуществляется по обозначению ЕСКД, поэтому на дополнительный уровень целесообразно вывести второй

	Идентификатор	Уровень i	Уровень i+1
5	0		ООО "Уральские локомотивы"
6	0		ОАО "ТВЗ"
7			
8			
9			
10			
11			
12		ОАО "ТВЗ"	Окна ВГКБ 553
13		ОАО "ТВЗ"	Двери наружные служебного тамбура ВГКБ 397
14		ООО "Уральские локомотивы"	Двери ВГКБ 515
15		ООО "Уральские локомотивы"	Двери наружные служебного тамбура ВГКБ 397
16		ООО "Уральские локомотивы"	Окно боковое кабины машиниста ВГКБ 592
17		ООО "Уральские локомотивы"	Окна ВГКБ 593
18		ООО "Уральские локомотивы"	Сегменты
19		ООО "Уральские локомотивы"	Другое УЛ
34		Двери ВГКБ 515	**Перекладина ВГКБ 515**
35		Двери ВГКБ 515	**Порог ВГКБ 515**
36		Двери ВГКБ 515	**Дверь ВГКБ 515**
37		Двери ВГКБ 515	Створка ВГКБ 515
38		**Дверь ВГКБ 515**	***ВГКБ 515.10.00.000***
43		**Перекладина ВГКБ 515**	***ВГКБ 515.10.00.001***
44		**Порог ВГКБ 515**	***ВГКБ 515.10.00.200***

Название уровня	Номер уровня
Потребитель	0
Изделие	1
Узел	2
Обозначение	3

Рис. 5. Лист «Узлы»

(дополнительный) тип, не используемый повсеместно во входящих письмах, но необходимый для внутреннего анализа. Также стоит отметить, что одно и то же дополнительное обозначение по ЕСКД может входить в несколько обозначений по техническим условиям (рис. 6).

Взаимосвязь в основных четырех уровнях осуществляется с помощью выпадающих списков. Они формируются через *«Диспетчер имен»*, где в качестве именованной формулы записывается:

=ЕСЛИ(ЖР!E$1=Узлы!$F$5;СМЕЩ(Узлы !$D$4;1;0;СЧЁТЕСЛИ(Узлы!$B$5:$B$104 8576;0));СМЕЩ(Узлы!$D$4;ПОИСКПОЗ(ЖР!D2;Узлы!$C$5:$C$1048576;0);0;СЧЁТЕ СЛИ(Узлы!$C$5:$C$1048576;ЖР!D2)))

Нужно учитывать, что формула использует относительную адресацию, поэтому для ее первичного введения необходимо выделить ячейку E2 Листа *«ЖР»*. Для применения этой формулы для остальных трех столбцов нужно будет аналогичным образом поочередно вставать на ячейки *F2, G2, H2*. Соответственно, и формулы преобразуются в зависимости от ключевой ячейки, то есть для *F2* получим:

=ЕСЛИ(ЖР!F$1=Узлы!$F$5;СМЕЩ(Узлы !$D$4;1;0;СЧЁТЕСЛИ(Узлы!$B$5:$B$104 8576;0));СМЕЩ(Узлы!$D$4;ПОИСКПОЗ(ЖР!E2;Узлы!$C$5:$C$1048576;0);0;СЧЁТЕ СЛИ(Узлы!$C$5:$C$1048576;ЖР!E2)))

Сама иерархия реализуется с помощью таблиц на листе *«Узлы»*. Первый уровень образуется с помощью заполнения столбца *B* идентификаторами существующих потребителей: то есть при введении нового заказчика проставляется *«0»* в столбец *«Уровень»* и вводится название предприятия. После этого в раскрывающемся списке в столбце *«Потребитель»* листа *«ЖР»* будет возможность выбора заказчика, от которого поступила претензия.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Window	PWW2G-302KT-1030*975	PWW2Pw-302KT-1030*975	PTWW2G-2P2KT-1030*975	PTWW2Pw-2P2KT-1030*975	PNW2G-302KT-630*975	PNW2Pw-302KT-630*975	EEW4M2G-302KT-1030*975
2	PWW2G-302KT-1030*975	ВГКБ 553.01.00.000-04	ВГКБ 553.01.00.000-04	ВГКБ 553.01.00.000-05	ВГКБ 553.01.00.000-05	ВГКБ 553.02.00.000-04	ВГКБ 553.02.00.000-04	ВГКБ 553.05.00.000-04
3	PWW2Pw-302KT-1030*975	ВГКБ 553.11.00.000-01	ВГКБ 553.01.00.000-08			ВГКБ 553.08.00.000-01	ВГКБ 553.02.00.000-08	ВГКБ 553.05.00.000-05
4	PTWW2G-2P2KT-1030*975	ВГКБ 553.01.00.000-08	ВГКБ 553.11.00.000-01			ВГКБ 553.08.00.000-02	ВГКБ 553.08.00.000-01	ВГКБ 553.05.00.000-09
5	PTWW2Pw-2P2KT-1030*975	ВГКБ 555.04.00.000-02	ВГКБ 555.04.00.000-02			ВГКБ 553.18.00.000-01	ВГКБ 553.08.00.000-02	ВГКБ 555.03.00.000-04
6	PNW2G-302KT-630*975	ВГКБ 555.07.00.000-01	ВГКБ 555.07.00.000-01			ВГКБ 553.02.00.000-08	ВГКБ 553.18.00.000-01	
7	PNW2Pw-302KT-630*975	ВГКБ 615.01.00.000				ВГКБ 555.01.00.000-02	ВГКБ 555.01.00.000-02	
8	EEW4M2G-302KT-1030*975					ВГКБ 555.01.00.000-10	ВГКБ 555.06.00.000-01	

Рис. 6. Таблица соответствия обозначений по ТУ и ЕСКД

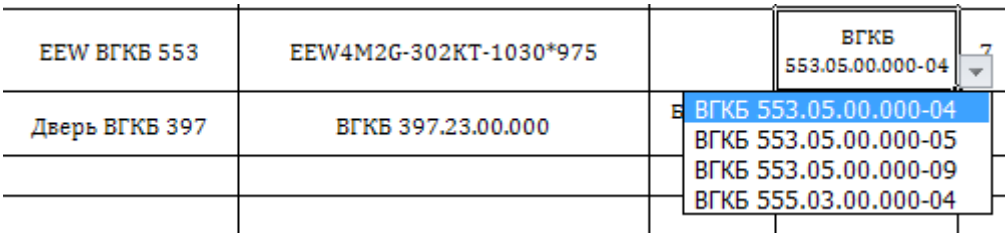


Рис. 7. Возможность пользователя выбрать обозначение по ТУ в зависимости от наименования по ЕСКД

Далее в зависимости от заказчика на 2-й уровень ставится поставляемая ему продукция, на предмет которой он выставляет претензии (рис. 5). Столбец *«Уровень i»* содержит названия (сначала предприятия-заказчика, а потом уже и изделий, узлов) из столбца *«Уровень i+1»* более верхнего уровня. Для связки соседних уровней используется столбец *«Уровень i+1»*. На рис. 5 видно, как название изделия из столбца *«Уровень i+1»* попадает в *«Уровень i»* для дальнейшего ветвления на узлы. Узлы аналогично переходят из *«Уровень i+1»* в *«Уровень i»* для разбивки на вариации обозначений.

В целях корректной работы формул стоит помнить, что если начать заполнение всех изделий, поставляемых, например, на ОАО «ТВЗ», то нужно полностью закончить этот список, прежде чем переходить к следующему заказчику. То же самое правило касается и следующих уровней.

Теперь рассмотрим реализацию заполнения Журнала рекламаций для особого случая – группы изделий Б.2, где наименование изделия в претензионном письме от заказчика одно, а используется в дальнейшем для всех видов отчетности – другое. Для этого составляется таблица *«Окна»* соответствия обозначений изделий (в данном случае это окна) по ТУ и ЕСКД (рис. 6). Цель данной таблицы – связать эти наименования.

Задача: существует перечень обозначений окон по ЕСКД. Для каждого такого обозначения имеется свой диапазон обозначений по ТУ. Пользователь Журнала рекламаций должен иметь возможность, выбрав одно обозначение по ЕСКД (в листе *«ЖР»* столбец *«Обозначение»*), выбрать из выпадающего списка нужное ему дополнительное обозначение по ТУ (рис. 4, ячейки G7 и H7).

В столбце *«Window»* вводятся названия окон по ЕСКД (то, как они приходят от потребителя). Эти названия (диапазон A2:A45) в точности должны совпадать с заголовками столбцов, содержащих соответствующие наименования по ТУ. Для этого в строку заголовков (B1:AS1) вводится формула

=ДВССЫЛ(АДРЕС(СТРОКА($A$1)-СТОЛБЕЦ($A$1)+СТОЛБЕЦ();1))

После заполнения таблицы по соотношению разных наименований окон нужно перейти снова в лист *«ЖР»* и в столбце *«Доп. Обозначение (окна)»* для первой ячейки прописать именованную формулу:

=СМЕЩ(Окна!$A$2;;Позиция;СЧЁТЗ(Выбранное_предприятие)),

где

«Позиция» и *«Выбранное_предприятие»* – именованные диапазоны. Они формируются следующими формулами:

1) Позиция:

=ПОИСКПОЗ(ЖР!H2;Предприятие;0)

0.1) Предприятие:

=Окна!$A$2:ИНДЕКС(Окна!$A:$A;СЧЁТЗ(Окна!$A:$A))

2) Выбранное_предприятие:

=СМЕЩ(Окна!$A$2;;Позиция;50)

Таким образом, пользователю предоставлена возможность выбирать дополнительное обозначение в соответствии с наименованием изделия согласно входящим письмам (рис. 7).

Выводы

Разработана многоуровневая модель обработки данных рекламаций, поступающих на предприятие-изготовитель. Осуществлена реализация модели в MS Excel. Предложенная автоматизированная форма регистрации рекламаций позволяет осуществлять анализ данных претензий без потери информации при минимальных материальных затратах.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55754-2013. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники. Система взаимоотношений изготовителей и потребителей. Введена 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

2. ГОСТ Р 58044-2017. Авиационная техника. Верификация закупленной продукции. Введена 2017-29-12. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.

3. СТО Газпром 161-2017. Рекламационная работа в ПАО «Газпром». Основные положения. Введена 2017-16-01. М.: Газпром, 2017. 36 с.

4. URL: https://solutions.1c.ru/catalog/eam/features (дата обращения: 16.03.2019).

5. URL:http://pts-russia.com/products/windchill-quality-solutions/chto-takoe-windchill-quality.html (дата обращения: 16.03.2019).

УДК 621.314

М. А. Волохов*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
В. П. Платонов*
кандидат технических наук, доцент
С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВОЛНОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ АВТОНОМНОГО МОРСКОГО ОБЪЕКТА

В докладе представлено совершенствование методики расчета волногенератора поплавкового типа. Исследование проводилось на основе аналитических методов исследования устройств и систем электромеханики. Разработана инженерная методика расчета потерь мощности волногенератора от сил гидродинамического торможения и магнитных потерь в магнитопроводе волногенератора. Результаты выполненной работы позволяет повысить точность инженерного расчета волногенератора поплавкового типа.

Ключевые слова: *волногенератор, поплавок, индуктор, якорь, шток, пружина, колебания, частота, индукция, мощность, магнитные потери, потери от сил гидродинамического торможения.*

M. A. Volohov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. A. Martynov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. P. Platonov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. S. Timoffev*
Senior Lecturer
O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

WAVEGENERATOR FOR POWER SUPPLY OF AUTONOMOUS SEA OBJECT

The report presents the improvement of the method of calculation of the float-type wave generator. The study was conducted on the base of analytical methods for the study of devices and systems of electromechanics. An engineering method for calculating the power losses of the wave generator from the forces of hydrodynamic braking and magnetic losses in the magnetic circuit of the wave generator is developed. The results of the work performed can improve the accuracy of the engineering calculation of the float-type wave generator.

Keywords: *wavegenerator, float, inductor, armature, a rod, a spring, fluctuations, frequency, induction, power, magnetic losses, losses from forces of hydrodynamic braking.*

Волногенераторы преобразуют энергию морских волн в электрическую энергию [1–7]. Энергия морских волн практически беспредельна. В настоящее время в ряде стран, таких как Китай, Турция, США и других, ведутся успешные разработки волногенераторов большой и малой мощности. Подобные генераторы находят широкое применение в системах питания метеобуев, буев связи, маяков и т.п. Их основное назначение – подзарядка аккумуляторов или дозарядка накопительных конденсаторов источников питания, которые установлены на перечисленных выше автономных объектах. Мощность таких генераторов составляет десятки и сотни Ватт.

Конструктивные схемы водногенераторов и принцип работы

Волногенератор поплавкового типа выполняется в форме металлической трубы с наружным диаметром $D_к \leq 100$ мм и выступающим из нее штоком, на конце которого закреплен поплавок, находящийся в зоне морской волны [7]. Конструктивная схема генератора поплавкового типа приведена на рис. 1. Внутри металлической трубы *3* длиной $L_к$ размещен магнитоэлектрический индуктор *4* с многополюсной магнитной системой. Сердечник магнитопровода статора с обмоткой *5*, якорь генератора закреплены внутри трубы *3*. Индуктор генератора *4* связан с поплавком *1* штоком *2*. Реализовать поплавковый генератор возвратно-поступательного движения с привязкой поплавка к поверхности морской воды, как это показано на рис. 1, практически невозможно, поскольку частота перемещения поплавка и индуктора генератора $f_и$ составляет доли Герц:

$$f_и = 1/T_в, \qquad (1)$$

где $T_в$ – период колебания морской волны.

Обозначим A – амплитуду волны; в – высоту поплавка; а – расстояние верхней поверхности поплавка от осевой линии волны.

Уравнение морской волны $x_в = A\sin(2\varpi/T_в)t$.

Поскольку $T_в$ может иметь длительность от 4 до 10 с, частота перемещения индуктора может быть всего 0,1–0,25 Гц. Для увеличения частоты $f_и$ до приемлемого уровня 10 Гц и выше необходимо выполнить волногенератор с электромагнитной редукцией $k_р$=40–100. Для удовлетворения этого условия необходимо произвести удлинение активной зоны генератора $l_а$ до величины, определяемой формулой (2):

$$l_а = \tau k_р + 4A, \qquad (2)$$

где τ – длина полюсного деления генератора; A – амплитуда волны.

Частота генерируемой ЭДС до требуемого значения может быть увеличена без удлинения активной зоны генератора за счет обеспечения условий для колебательного процесса подвижной части волногенератора, в состав которой входят жестко соединенные между собой поплавок, шток и индуктор.

Для этой цели на штоке волногенератора сверху и снизу подвижной части волногенератора должны быть размещены две пружины (см. рис. 1). Колебательные движения подвижной части генератора возможны только на тех интервалах времени, когда поплавок полностью освобождается от соприкосновения с водой, то есть когда имеет место впадина волны (рис. 2).

При прохождении морской волны над поплавком с амплитудой $A \leq b$, поплавок на нее не реагирует и генератор не работает. Для морской волны с амплитудой $A >> b$ возможно два случая:

– над поплавком проходит гребень волны, в этом случае подвижная часть генератора сохраняет свое равновесное положение;

– над поплавком проходит «впадина» волны, в этом случае при

$$t \geq \frac{T}{2\pi}\arcsin\frac{a+b}{A}$$

поплавок оказывается в воздухе и $F_{попл} = 0$.

В погруженном состоянии поплавка на индуктор генератора действуют три силы:

– сила тяжести $G = mg$;

– подъемная сила поплавка $F_{попл} = nmg$ (n>1);

– сила растяжения пружины $F_{пр} = kx$;

В положении равновесия:

$$F_{попл} = G + F_{пр}$$

$$F_{попл} = V_{поп}\,g = nmg = mg + kx_0, \qquad (3)$$

где mg – сила тяжести подвижной части волногенератора; m – масса подвижной части волногенератора; kx_0 – сила растяжения пружины в равновесном положении; x_0 – растяжение пружины в равновесном положении подвижной части генератора; k – коэффициент жесткости пружины; n – кратность увеличения выталкивающей силы поплавка по отношению к силе тяжести подвижной части индуктора; $V_{поп}$ – объем поплавка; g – ускорение свободного падения.

При нахождении поплавка в воздухе выталкивающая сила поплавка $F_{попл} = nmg = 0$. В механической подсистеме на поплавок действуют две силы: сила тяжести и сила растяжения пружины: $mg + kx_0 = 0$.

Подвижная часть приобретает потенциальную энергию по отношению к точке равновесия 0_1 (см. рис. 1), пружина при этом не растянута.

Эта энергия равна

$$W_п = mgx_0 + \frac{kx_0^2}{2} = \frac{1}{2}mgx_0(n+1). \qquad (4)$$

Под влиянием этой энергии подвижная часть генератора совершает колебательное движение на пружине.

Форма колебательного процесса механической подсистемы волногенератора, возникающего на этом интервале периода волны, показана на рис. 3.

В [7] приведены основные расчетные соотношения параметров колебательного процесса механической подсистемы.

Приведем здесь выражение для скорости движения подвижной части генератора:

$$\dot{x} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{ng}{\omega^2}e^{-\beta t}\left(1 + \frac{\beta^2}{\omega_1^2}\right)\omega_1 \sin\omega_1 t$$

или

$$\dot{x} = \frac{ng}{\omega_1}e^{-\beta t}\sin\omega_1 t. \qquad (5)$$

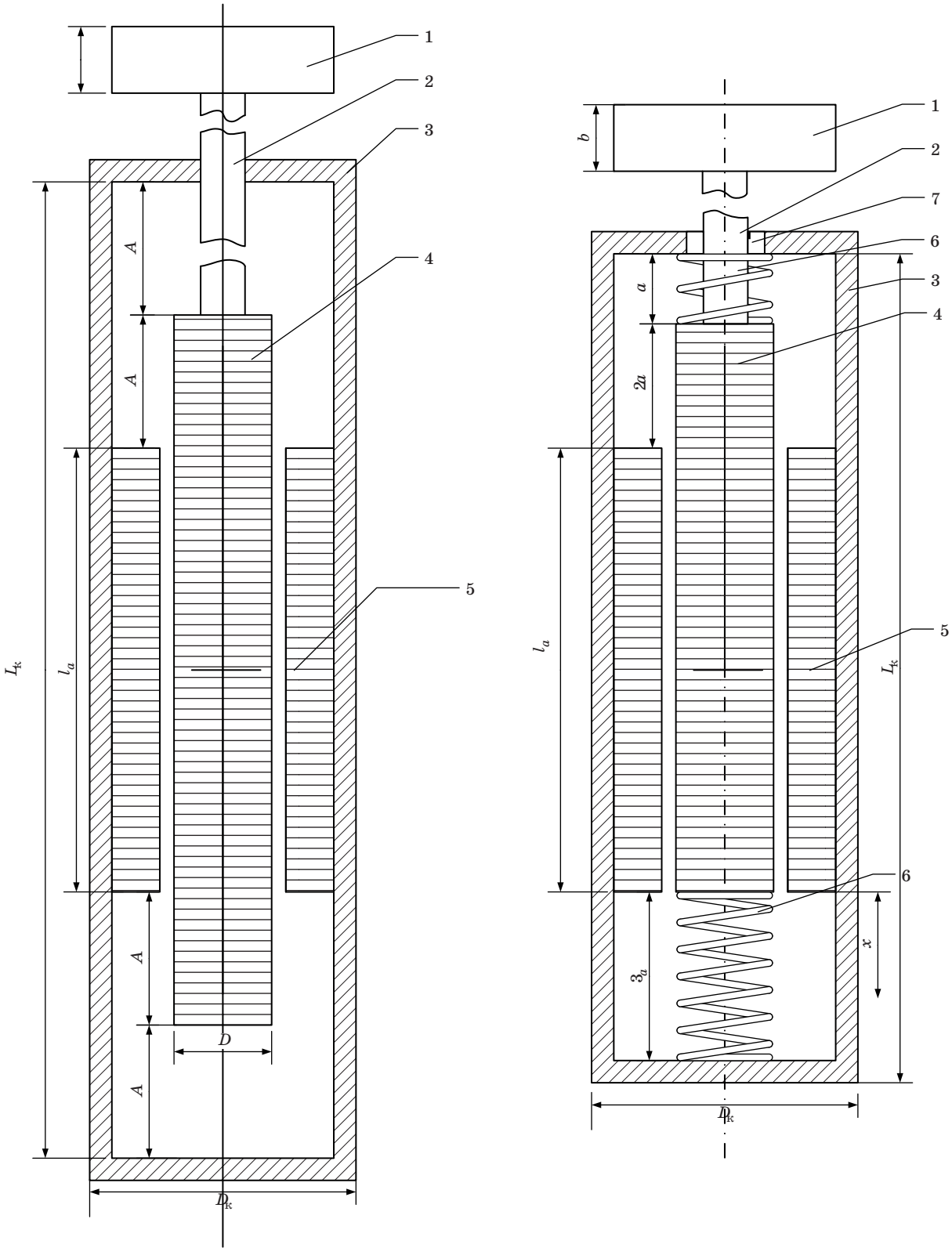


Рис. 1. Конструктивная схема волногенератора поплавкового типа с механическим резонансом

Методика расчета поплавкового генератора, приведенная в [7], выполнена в первом приближении – без учета потерь мощности, обусловленных наличием сил гидродинамического торможения и магнитных потерь в сердечнике магнитопровода статора генератора.

Расчет потерь холостого хода волногенератора поплавкового типа

В режиме холостого хода ($I_{нг} = 0$) в волногенераторе существуют два вида потерь:

– обусловленные силами гидродинамического торможения;

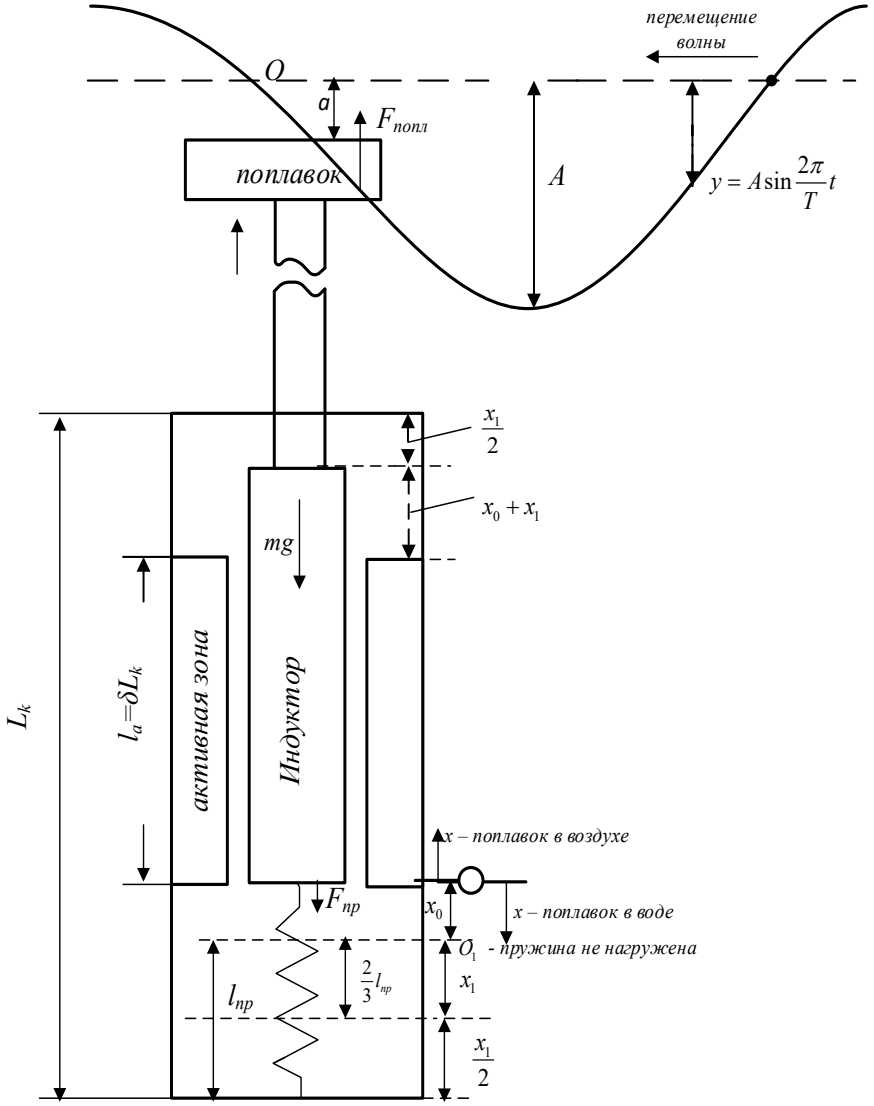


Рис. 2. Кинематическая схема волногенератора при колебательном режиме работы

– магнитные в магнитопроводе статора, обусловленные изменением магнитного потока при движении индуктора генератора. Это потери от вихревых токов.

Потери сил гидродинамического торможения возможны от:

– вязкого трения F_M;

– затрат на силы выталкивания $P_{выт}$.

Потери мощности от сил гидродинамического торможения

Сила вязкого трения может быть рассчитана по формуле:

$$F_M = \mu\pi D l_a \frac{\dot{x}_{ср}}{\delta}, \qquad (6)$$

где $\mu \approx 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ Нс/м^2 – коэффициент вязкости морской воды при температуре воды 5–10 °С; D – наружный диаметр индуктора волногенератора; l_a – длина активной зоны волногенератора; δ – длина зазора между наружной поверхностью индуктора генератора и внутренней поверхностью активной зоны генератора; $\dot{x}_{ср}$ – среднее значение линейной скорости перемещения подвижной части волногенератора.

Если умножить силу $F_м$ на среднее значение скорости $\dot{x}_{ср}$, то получим мощность потерь, затрачиваемую на преодоление сил вязкого трения $P_{в.т}$:

$$F_м \dot{x}_{ср} = P_{в.т} = \mu\varpi D l_a \dot{x}^2_{ср}. \qquad (7)$$

Таким образом, мощность потерь на преодоление сил вязкого трения зависит от квадрата скорости перемещения подвижной части волногенератора.

Значение $\dot{x}^2_{ср}$ определим, воспользовавшись выражением (5):

$$\dot{x}^2_{ср} = \frac{1}{t_1}\int_0^{t_1} \dot{x}^2 \mathrm{d}t = \frac{n^2 g^2}{2\omega^2}. \qquad (8)$$

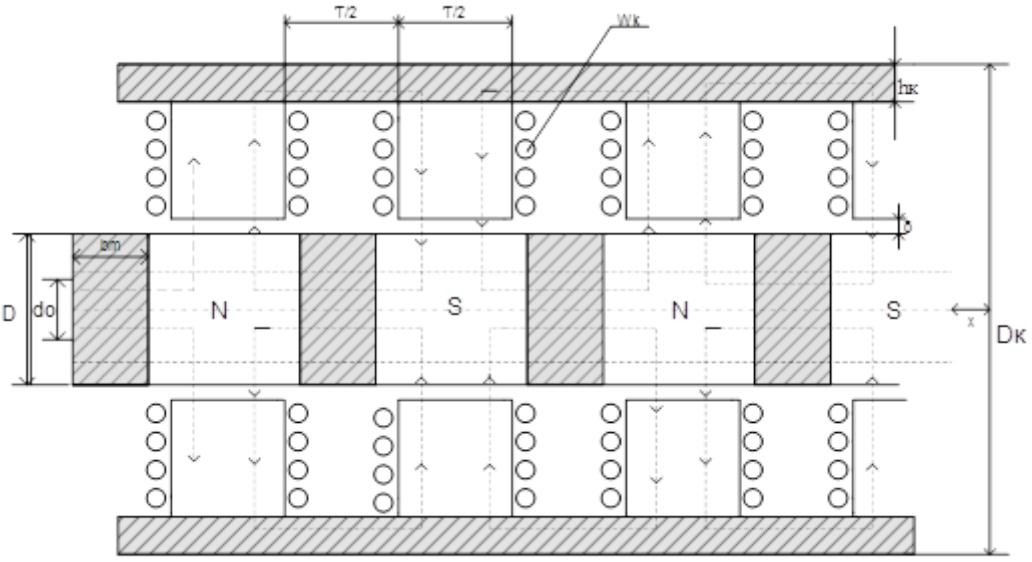


Рис. 4. Структура магнитной цепи активной зоны волногенератора

Потери мощности от сил выталкивания

$$P_{\text{выт}} = (P_1 - P_2)\frac{\Delta V}{\Delta t}, \qquad (9)$$

где $(P_1 - P_2)$ – разность давлений в нижней и верхней частях волногенератора.

$$P_1 - P_2 \approx L_к/9{,}8 \text{ кг/см}^2 = L_к \text{ Н/см}^2 = L_к \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2; \qquad (10)$$

объем выталкиваемой жидкости за 1 с:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - d_0^2\right)\dot{x}_{\text{ср}},$$

где D – наружный диаметр индуктора; d_0 – диаметр штока, на котором размещен индуктор (см. рис. 2, 4).

Потери мощности на вихревые токи от изменения магнитного потока в сплошном сердечнике статора

На рис. 4 приведена структура магнитной цепи активной зоны волногенератора, на которой показаны пути замыкания магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами индуктора, для момента времени, при котором поток имеет максимальное значение $\Phi = \Phi_m$. Этот магнитный поток индуктирует вихревые токи в кольцевых сердечниках магнитопровода статора и корпусе генератора, выполняющего функцию магнитопровода.

Магнитные потери в кольцевых сердечниках

Выделим в кольцевом сердечнике контур толщиной dx, магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром, равен

$$\Phi_x = \Phi_m \frac{4x}{\tau}$$

и соответственно ЭДС, индуктируемая в этом контуре:

$$E_x = 4k_ф f\Phi_x = 16{,}6k_ф fx\Phi_m/\tau,$$

где $k_ф = 1{,}1$ – коэффициент формы кривой ЭДС; Φ_m –амплитудное значение магнитного потока.

Потери на вихревые токи в контуре dx равны

$$\mathrm{d}P_x = E_x^2 \Delta\gamma_x,$$

где $\Delta\gamma_x$ – проводимость контура dx.

$$\Delta\gamma_x = \int_{D'/2}^{D_1/2} \gamma \frac{\mathrm{d}x}{2\pi z}\mathrm{d}z = \frac{\gamma \mathrm{d}x}{2\pi}\ln\frac{D_1}{D'},$$

где dz – толщина элементарного кольца сердечника магнитопровода; z – расстояние элементарного кольца толщиной dz от внутренней поверхности кольцевого сердечника; $\gamma \approx 2 \cdot 10^6$ (Ом м)$^{-1}$ – электропроводность железа.

Тогда:

$$\Delta P_x = \frac{128}{\pi\tau^2} k_ф^2 f^2 \Phi_m^2 \gamma \ln\frac{D_1}{D'} x^2 dx. \qquad (11)$$

Проинтегрировав выражение (11), получим выражение для расчета суммарных потерь во всех кольцевых магнитопроводах генератора:

$$P_к = 2n\int_0^{\tau/4} dP_x = \frac{4n}{3\pi} k_ф^2 f^2 \Phi_m^2 \gamma\tau \ln\frac{D_1}{D'}, \qquad (12)$$

где n – число кольцевых магнитопроводов.

Магнитные потери в корпусе генератора

В корпусе генератора выделим элементарный контур толщиной dx и длиной τ. Магнитный поток, проходящий внутри контура, равен:

$$\Phi_x = \Phi_m \frac{x}{h_к}$$

и соответственно ЭДС, индуктируемая в этом контуре:

$$E_x = 4k_ф f\Phi_x = 4k_ф fx\Phi_m/h_к,$$

где $h_к$ – толщина корпуса генератора.

Потери на вихревые токи в контуре

$$\Delta P_f = \frac{E_x^2}{r_x},$$

где $r_x = \frac{2\pi(D_1 + 2x)}{\gamma\tau dx}$.

Тогда

$$\Delta P_f = \frac{16}{\pi} k_f^2 f^2 \Phi_m^2 \gamma \frac{\tau}{h_к^2} \frac{x^2}{(D_1 + 2x)} dx = c \frac{x^2}{(D_1 + 2x)} dx, \quad (13)$$

где $c = \frac{16}{\pi} k_f^2 f^2 \Phi_m^2 \gamma \frac{\tau}{h_к^2}$.

Проинтегрировав выражение (13), получим выражение для расчета потерь в корпусе генератора

$$P_{fj} = \frac{n}{2} c \int_0^{\Delta_к} \frac{x^2}{D_1 + 2x} dx = \frac{2n}{\pi} k_ф^2 f^2 \Phi_m^2 \gamma\tau. \quad (14)$$

Для расчета магнитных потерь в кольцевых сердечниках и корпусе радиатора необходимо знать максимальное значение потока Φ_m. Для определения потока Φ_m необходимо построить схему замещения магнитной цепи активной зоны волногенератора, приведенной на рис. 4 [8]. Схем замещения магнитной цепи приведена на рис. 5.

Параметры схемы замещения магнитной цепи:

– $R_\delta = \frac{\delta \cdot 2}{\mu_0 \pi D \tau}$ – магнитное сопротивление воздушного зазора под одним полюсом;

– R_j – магнитное сопротивление ярма.

Поскольку $R_j << R_\delta$, можно принять $R_j \approx 0$.

$R_m^/ = \frac{h_m H_c}{S_m B_r k_\sigma}$ – приведенное значение магнитного сопротивления магнита;

$F_m^/ = \frac{h_m H_c}{k_\sigma}$ – приведенное значение магнитодвижущей силы магнита;

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4\varpi 10^{-7}$ Гн/м;

δ –длина воздушного зазора;

D – диаметр индуктора;

h_m – толщина магнитного кольца;

H_c –напряженность;

S_m –площадь сечения магнита;

B_r – остаточное значение индукции магнита;

k_δ – коэффициент рассеяния магнита, учитывающий наличие потоков рассеяния

$$k_\delta = 1 + \frac{\lambda_{\sigma m}}{\lambda_m};$$

$\lambda_{\sigma m}$ – коэффициент проводимости путей рассеяния магнита; λ_m – коэффициент проводимости участка пути рассеяния магнитного потока внутри сердечника магнита

$$\lambda_{\delta m} = \lambda_{\delta 1} + \lambda_{\delta 2};$$

$\lambda_{\sigma 1}$ и $\lambda_{\sigma 2}$ – коэффициенты проводимостей путей рассеяния снаружи и внутри кольца магнита соответственно;

$$\lambda_{\sigma 1} = \mu_0 \pi D \int_0^{h_m/2} \frac{dx}{h_m + 2x} = \frac{\mu_0 \pi D}{2} \ln 2;$$

$$\lambda_{\sigma 2} = \mu_0 \frac{\pi D}{3} \int_0^{h_m} \frac{dx}{h_m + 2x} = \frac{\mu_0 \pi D}{6} \ln 3;$$

$$\lambda_m = \mu_0 \mu_m \frac{s_m}{h_m}.$$

Уравнение МДС контура схемы, приведенной на рис. 4:

$$F_m^/ = (4R_\delta + R_m^/)\Phi_m, \quad (15)$$

где Φ_m – магнитный поток.

Из (15) определим требуемое значение магнитного потока Φ_m

$$\Phi_m = \frac{F_m^/}{R_m^/ + 4R_\delta}. \quad (16)$$

Заключение

Разработанная методика расчета потерь мощности волногенератора от сил гидродинамического торможения и магнитных потерь волногенератора позволяет повысить точность расчета энергетических показателей волногенератора поплавкового типа и с учетом результатов, приведенных в [7], создать более совершенную инженерную методику расчета волногенератора поплавкового типа.

Библиографический список

1.URL: http://atecom.ru/wave-energy (дата обращения: 25.05.2018).

2. Перспективные варианты волновых электростанций / А. П. Сеньков, А. Н. Калмыков, А. А. Сеньков, П. В. Макин. Электротехника. 2017. № 12. С.13–18.

3. *Ivanova I., Agren O., Bernhoff H., Leijon M.* Simulation of wave energy converter with octagonal linear generator. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2005. Vol. 30. P. 619–629.

4. *Темеев А. А.* Кл. F03B13/16. Патент РФ № 93043446. Поплавковая волновая электростанция, 1996.

5. *Сеньков А. А., Сеньков А. П.* Кл. F03B13/18. Патент РФ № 2567916. Поплавковая волновая электростанция (варианты), 2015.

6. *Алексеев А. В.* Патент РФ № 2006121511; Патент России № 0233452006. Волновая энергетическая установка, 2006.

7. *Мартынов А.А., Чернышева О. Б.* К расчету параметров волногенератора поплавкового типа // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 138–144.

8. *Вольдек А. И.* Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

9. *Елисеев А. В., Велькин В. И., Шеклеин С. Е.* Разработка исследовательского волнового буя для мониторинга акватории мира // Сб. трудов Всероссийской НПК «Развитие Арктики и приполярных регионов». Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 214–216.

10. *Мартынов А. А., Самсыгин В. К.* Волногенератор поплавкового типа // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2014. № 81 (365). С. 132–142.

11. Патент РФ № 2037642. Поплавковая волновая электростанция. Кл. E02B9/00 / В. В. Елистратов, В. Э. Егурнов, Е. Н. Быков и др., 2011; Патент РФ № 2410489. Волновой энергетический комплекс. Кл. E02B9/00 / В. В. Елистратов, В. Э. Егурнов, Е. Н. Быков и др., 2011.

12. Патент РФ № 2513070. Поплавковая волновая электростанция. Кл. F03B13/18 / В. И. Саввин, С. Н. Лавренев, С. Н. Турксов, А. П. Сеньков, 2014.

13. URL: http://www.ips-ab.com (дата обращения: 24.05.2018).

14. *Б. М. Яворский, А. А. Детлаф.* Справочник по физике для инженеров и студентов. М.: Наука, 1968.

УДК 681.11.031.1, 621.311

Р. Б. Гончаренко*
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
А. А. Киселев*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе
С. С. Тимофеев**
старший преподаватель
**ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики РАН»*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Дан анализ эффективности и безопасности мощных линий электропередачи и связанных с ней экономических рисков. Основное внимание обращено на такой метод повышения эффективности и безопасности, как использование в энергосистемах инерционных накопителей энергии.

Ключевые слова: *накопители энергии, распределенные энергосистемы, инерционные накопители.*

R. B. Goncharenko*
Dr. Sc. Tech., Professor, Chief Researcher
A. A. Kiselev*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher, Deputy Director for Scientific Work
S. S. Timofeev**
Senior Lecturer
**Institute of Electrophysics and Electric Power of RAS*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF INERTIAL ENERGY STORAGE IN DISTRIBUTED AND CENTRALIZED POWER SYSTEMS

The analysis of efficiency and safety of powerful power lines and the economic risks connected with it is given. The main attention is paid to such a method of increasing efficiency and safety as the use of inertial energy storage in power systems.

Keywords: *energy storage, distributed power systems, inertial storage.*

Первые электростанции появились в конце XIX в. и имели мощность в несколько десятков киловатт. На протяжении XX в. наблюдался рост единичной мощности генераторов и электростанций. Так, на заводе «Электросила» первый турбогенератор мощностью 500 кВт был создан в 1924 г., в дальнейшем к 1930 г. была создана серия турбогенераторов мощностью от 500 до 24000 кВт. В 1946 г. там же был выпущен турбогенератор мощностью 100 МВт и в 1965 г. – турбогенератор мощностью 500 МВт [1]. Аналогичным образом росла и мощность гидрогенераторов. В настоящее время в России в эксплуатации имеются турбогенераторы мощностью 1200 МВт и гидрогенераторы мощностью 600 МВт [2]. На начало XXI в. общая мощность тепловых электростанций составляла 148,7 ГВт, из них турбогенераторы мощностью 300 МВт и более имели суммарную мощность 39 ГВт [3].

Рост единичной мощности генераторов определяется законом изменения массы оборудования от мощности. Для электрических машин закон изменения массы был установлен еще в начале XX в. в трудах М. Видмара [4]. Им было показано, что масса генератора при прочих равных условиях пропорциональна его номинальной мощности в степени три четверти. Действительно, мощность электрической машины P равна произведению угловой скорости вращения ее ротора ω на электромагнитный момент M. Электромагнитный момент пропорционален произведению тока якоря на магнитный поток.

В свою очередь, ток якоря пропорционален суммарной площади поперечного сечения пазовой зоны обмотки или квадрату диаметра расточки статора, а магнитный поток пропорционален площади полюсного деления или произведению диаметра расточки D на длину активной части машины L.

$$P = \omega M \equiv \omega I \Phi \equiv \omega D^2 LD \equiv \omega L^4 \equiv L^4. \quad (1)$$

Принимая $(L/D) = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$, получим:

$$P \equiv L^4. \quad (2)$$

Поскольку масса генератора пропорциональна его линейным размерам в третьей степени, с учетом (2) имеем:

$$G \equiv L^3 \equiv P^{3/4}. \quad (3)$$

Из закона «трех четвертей» М. Видмара следует, что удельная, отнесенная к номинальной мощности, масса электрической машины обратно пропорциональна корню четвертой степени из ее номинальной мощности. Поскольку затраты на оборудование в первом приближении пропорциональны его массе, указанная закономерность явилась базовой при обосновании необходимости в разработке и изготовлении мощных турбо- и гидрогенераторов.

Опыт последних лет показывает, что с учетом затрат на строительство зданий, вспомогательных сооружений и линий электропередач, а также эксплуатационных затрат, стоимости кредитов и других факторов, электростанция на основе сверхмощных генераторов не всегда оказывается наиболее экономичной. Дополнительно экономичность сверхмощных электростанций снижается вследствие того, что удельная, отнесенная к номинальной мощности, масса турбины не зависит от ее мощности. Действительно, для паровой или газовой турбины мощность пропорциональна расходу рабочего газа через турбину и при прочих равных условиях пропорциональна D^2. Поскольку для газовых турбин $L/D = const$, получим:

$$G \equiv L^3 \equiv P, \; G/P = \text{const}. \quad (4)$$

Развитие современных технологий производства и широкое распространение на производстве и в быту вычислительных машин, систем кондиционирования воздуха и лифтового оборудования выдвигает требование повышения качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения. Положение усложняется наличием в составе нагрузок энергосистем значительного количества маломощных электродвигателей: приводов кондиционеров, вентиляторов и различного бытового электрооборудования. Доля этих нагрузок в энергосистеме значительна, а их механическая постоянная времени существенно меньше механической постоянной времени мощных электрических генераторов.

Действительно, механическая постоянная времени электрической машины T равна отношению механической энергии вращения ротора к номинальной мощности электрической машины. Механическая энергия пропорциональна моменту инерции ротора:

$$J \equiv L D^4 \equiv L^5. \quad (5)$$

С учетом (2) получим:

$$T \equiv J/P \equiv L^5/L^4 \equiv L \equiv P^{1/4}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при уменьшении номинальной мощности электрической машины ее механическая постоянная времени падает пропорционально корню 4-й степени от мощности. Так, по (5) механическая постоянная времени электрической машины мощностью 1 кВт будет в $10 \cdot 10^{1/4} = 17{,}8$ раза меньше, чем у электрической машины мощностью 100 МВт. Выражение (5) не учитывает снижение при уменьшении габаритов электрической машины допустимых индукций магнитного поля и плотностей тока, но это обстоятельство существенно не меняет основной результат: при уменьшении номинальной мощности электрической машины ее механическая постоянная времени падает. При параллельном включении n одинаковых электрических машин их эквивалентный момент инерции равен nJ, а их эквивалентная мощность равна nP. Тогда эквивалентная механическая постоянная времени группы из n одинаковых электрических машин равна механической постоянной времени одной электрической машины.

Аналогично для турбины момент инерции будет определяться по (5), а постоянная времени составляет:

$$T \equiv J/P \equiv L^5/L^3 \equiv L^2 \equiv P^{2/3}. \quad (5)$$

Из (6) следует, что при увеличении номинальной мощности турбины ее механическая постоянная времени растет пропорционально корню 3-й степени от квадрата мощности.

В последнее время в сетях происходят крупные системные аварии, возникновение которых связано с резким повышением температуры воздуха и одновременным включением большого числа кондиционеров, двигатели которых имеют незначительные механические постоянные времени [5].

Как известно, в энергосистемах стабилизация напряжения обеспечивается за счет регулирования величины реактивной мощности генераторов, электромашинных и статических компенсаторов реактивной мощности и путем подключения и отключения реактивных нагрузок (реакторов). Стабилизация частоты энерго-

системы обеспечивается за счет регулирования активной мощности электростанций. В настоящее время регулирование величины реактивной мощности в энергосистемах осуществляется со скоростью до 20–50% от номинальной ее величины в секунду и даже быстрее (последнее – для статических компенсаторов). Такая скорость регулирования напряжения является в большинстве случаев достаточной для обеспечения качественной стабилизации напряжения в энергосистемах.

Регулирование активной мощности электростанций в энергосистемах возможно только с существенно меньшей скоростью. Так, регулирование активной мощности тепловых электростанций обычно производится со скоростью не более 15% от величины номинальной мощности электростанции в минуту. На АЭС имеется возможность регулировать активную мощность только приблизительно на 5% от ее номинальной величины в минуту. Для гидроэлектростанций допустимо изменение активной мощности до 5–10% от номинальной ее величины в секунду. Примерно такими же являются допустимые скорости изменения активной мощности для дизельных и газотурбинных электростанций [6]. В настоящее время более быстрые колебания активной мощности в энергосистемах могут быть покрыты только за счет энергии маховых масс вращающихся агрегатов энергосистемы, при этом допустимый уровень отбора этой энергии ограничен возможным снижением качества электроэнергии в системе. Для энергосистемы по ГОСТ 13109-87 нормально допустимым является снижение частоты от 50 до 49,8 Гц и максимально допустимым – снижение частоты от 49,6 Гц в течение не более 90 часов в год.

Даже при максимально допустимом снижении частоты на 0,4 Гц энергосистемы могут кратковременно за счет энергии маховых масс агрегатов генерировать сравнительно небольшое количество энергии. Так, от ОЭС Центр при снижении частоты на 0,4 Гц можно дополнительно получить 2610 МДж, а от Средне-Волжской энергосистемы можно получить 1370 МДж. При этом дополнительная мощность, которую возможно получить от энергосистемы Центра в течение 20 с, будет составлять только 130,5 МВт [7, 8].

Быстрые колебания активной мощности в энергосистемах происходят прежде всего при аварийных отключениях линий электропередач и генерирующих агрегатов. Возможность быстрого колебания активной мощности в энергосистеме заставляет иметь в ней определенный резерв по активной мощности, что приводит к недогрузке генераторов и снижению к.п.д. электростанций. При недогрузке генерирующего агрегата электростанции на 50% увеличение удельного расхода топлива составляет примерно 10% [8]. Необходимость обеспечивать динамическую устойчивость энергосистемы при быстрых колебаниях нагрузки наибольшим образом сказывается на работе относительно небольших удаленных энергосистем нефтеперерабатывающих областей, где имеются мощные турбодвигатели газоперекачивающих компрессоров с единичной мощностью, приближающейся к мощности генераторов энергосистемы.

В настоящее время для обеспечения устойчивости энергосистемы при появлении дефицита реактивной и активной мощности представляется перспективным использование управляемых (гибких) системы электропередачи переменного тока – *Flexible Alternative Current Transmission System* (FACTS). FACTS является электросетевой технологией, суть которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей. FACTS позволяет одновременно с развитием переходного процесса в энергосистеме управлять на основе применения современной вычислительной техники пропускной способностью линий электропередачи и перераспределять между параллельными линиями электропередачи потоки активной мощности, оптимизируя их в установившихся режимах, и перенаправлять их по сохранившимся после аварий линиям электропередачи. К устройствам FACTS относят устройства, обеспечивающие регулирование напряжения и обеспечивающие требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях: статические компенсаторы реактивной мощности (СТК), реакторы с тиристорным управлением, последовательные конденсаторы с тиристорным управлением, фазосдвигающие трансформаторы и др. К новейшим FACTS второго поколения относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров, выполненные на основе полностью управляемых приборов силовой электроники (IGBT транзисторы, IGCT тиристоры). Эти FACTS обладают новым качеством регулирования – векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети. В составе FACTS предполагается также использование маховичного асинхронизированного синхронного компенсатора [9].

В то же время основным методом обеспечения устойчивости энергосистем при значительном снижении частоты остается использование автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ) [10]. Для выполнения этих функций АОСЧ осуществляет автоматический частотный ввод резерва при снижении частоты ниже минимально допустимых значений и автоматиче-

скую частотную разгрузку (АЧР) при снижении частоты ниже 49,0 Гц. АЧР осуществляется путем отключения потребителей и является крайне нежелательной.

Оптимальным способом поддержания устойчивости является введение в энергосистему накопителей энергии различного типа. В качестве таких накопителей достаточно давно применяются гидроаккумулирующие электростанции. Предлагаются и другие типы накопителей [11–17].

Способы решения проблем повышения надежности и качества энергоснабжения неизменно вызывают интерес специалистов. Современные энергосистемы объединяют источники, использующие различные технологии получения электроэнергии. Наряду с мощными электростанциями, использующими в качестве топлива уголь, газ, атомную энергию, большая ее доля вырабатывается гидрогенераторами, малыми тепловыми (дизельными, газотурбинными) установками, а в последнее время – электроагрегатами с нетрадиционными возобновляемыми источниками (ветер, морские волны, приливы). Они отличаются высокой нестабильностью во времени, причем в некоторых странах (на севере Дании, в Германии и др.) уже сегодня с помощью ветрогенераторов вырабатывается до 30% и более электроэнергии. Вместе с тем увеличивается неравномерность потребления энергии во времени, наблюдается рост «пиковых» нагрузок. Например, ряд разрабатываемых и действующих электрофизических установок потребляют мощность до 1000 МВт импульсами длительностью от нескольких микросекунд до нескольких секунд.

Проблемы нестабильности энергоресурсов и их потребления решаются созданием более совершенных технических средств управления энергосистемами, а также развитием способов аккумулирования электроэнергии. При наличии избытка осуществляется накопление энергии, ее сохранение в различной форме и выдача в течение требуемого времени.

Маховичный электрический генератор синхронного типа мощностью порядка сотен МВт в течение длительного времени использовался в сочетании с полупроводниковыми преобразователями для формирования импульса мощности в системах электропитания крупных физических установок. Такой генератор, будучи подключенным через преобразователь частоты к энергосистеме, может за время порядка 0,2–0,5 с развить свою номинальную активную мощность и обеспечить стабилизацию частоты в энергосистеме на время, необходимое для ввода основных генерирующих мощностей энергосистемы, или на время действия автоматической частотной разгрузки. Кроме того, преобразователь частоты в цепи статора синхронного генератора может работать в качестве статического компенсатора реактивной мощности в режиме как генерации, так и потребления реактивной мощности и обеспечивать стабилизацию напряжения в энергосистеме. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН) имеет большой опыт по разработке и наладке совместно с ПЭО «Электросила» маховичных накопителей энергии для применения на установках токомак [12].

В нашем городе работы в области маховичных электромашинных накопителей энергии проводились с 1974 г. За время работы в области маховичных электромашинных накопителей энергии в ИЭЭ РАН были созданы методики проектирования этих накопителей энергии и методики расчета процессов в электрических системах с накопителями энергии, выработаны рекомендации по конструктивному исполнению электромашинных накопителей энергии, спроектирован и изготовлен на заводе «Большевик» крупнейший в мире маховик из титана с частотой вращения 6000 об./мин. Работа этого маховика была исследована на стенде в ИЭЭ РАН. Результаты исследований были рекомендованы для использования на перспективных кораблях Военно-морского флота [15]. В 1980 г. под руководством ИЭЭ РАН на заводе «Электросила» был спроектирован маховичный агрегат типа ТКД-200 на мощность 242 МВА при энергоемкости 1000 МДж. Агрегат использовался для питания экспериментальных физических установок и состоял из турбогенератора, маховика в кожухе и разгонного асинхронного двигателя с фазным ротором [12].

В последние десятилетия участились крупные системные аварии, такие как аварии в энергосистеме Нью-Йорка (1965, 1997, 2003 гг.), в энергосистеме Италии (2003 г.), в энергосистеме Москвы (2005 г.) и многие другие. Предотвращение таких аварий требует наличия резервных источников мощности, а также стабилизации напряжения и частоты в энергосистемах. Удачное решение многих проблем, возникающих при этом, обеспечивается при использовании маховичных генераторов переменного тока совместно с полупроводниковыми преобразователями частоты.

Известна экспериментальная маховичная система мощностью 20 МВт фирмы *Beacon Power Corporation* с накопленной кинетической энергией 18 ГДж, состоящая из 200 маховичных генераторов с максимальной рабочей частотой вращения 16000 об./мин. Система размещена в г. Стефентаун и подключена к энергосистеме Нью-Йорка. Подключение маховичных генераторов к энергосистеме осуществлено через полупроводниковые преобразователи, обеспечивающие работу в режиме компенсаторов реактивной мощности [13].

Подобные системы с маховичными генераторами предлагались нами еще в 1999 г. [14]. Впоследствии эти предложения были развиты в [14–17]. Также выработаны предложения по применению систем резервного электропитания на основе маховичных агрегатов переменного тока и газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов для стабилизации режимов энергосистем [18, 19].

Выводы

1. В мощных энергетических системах для стабилизации частоты при переходных режимах целесообразно применять маховичные накопители энергии.

2. При разработке таких накопителей энергии может быть использован большой практический опыт, накопленный при создании инерционных накопителей энергии с большой энергоемкостью.

Библиографический список

1. *Титов В. В.* От 500 кВт до 500 МВт // Сб. «Электросила». № 27. Л.: Энергия, 1968. С. 174–180.

2. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 1. 456 с.

3. *Волков Э. П., Баринов В. А., Маневич А. С.* Проблемы и перспективы развития электроэнергетики России. М.: Энергоатомиздат, 2001. 432 с.

4. *Видмар М.* Экономические законы проектирования электрических машин. М.: Государственное техническое издательство, 1924. 110 с.

5. Анализ развития крупных системных аварий: учеб. пособие по курсу. «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; сост. А. Н. Беляев, Ю. П. Горюнов, А. А. Смирнов, С. В. Смоловик. СПб.: Нестор, 2006. 70 с.

6. *Руммель Д.* Работа электростанций в нормальных и аварийных режимах // Управление энергосистемами / Пер. докладов на сессии СИГРЭ-82. М.: Энергоатомиздат, 1984.

7. *Баринов В. А.* Питание потребителей электроэнергии от электроэнергетических систем // Электричество. 1990. № 11. С. 1–6.

8. *Безлепкин В. П., Михайлов С. Я.* Регулировочный диапазон тепловых электростанций. Л.: Энергоатомздат, 1990. 168 с.

9. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России. Проект стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2009. 35 с.

10. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности. Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.240.001-2010. М., 2009. 21 с.

11. *Кабанов И. А., Смоловик С. В.* Эффективность сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии для обеспечения устойчивости энергосистемы // Фундаментальные исследования в технических университетах. СПбГПУ, 2001.

12. *Глебов И. А., Кашарский Э. Г., Рутберг Ф. Г.* Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. Л.: Наука,1985. 324 с.

13. Bill Capp. Beacon Power Corporation // Adour Capital Energy Technology Conference. September 15, 2011. 29 p.

14. *Рутберг Ф. Г., Гончаренко Р. Б., Кашарский Э. Г.* Перспективы энергоснабжения в электрических сетях с пониженной динамической устойчивостью при помощи маховичных агрегатов // Известия РАН, Энергетика. 1999. № 3. С. 158–160.

15. Перспективные системы энергопитания корабельных импульсных и кратковременных нагрузок / И. А. Глебов, Ф. Г. Рутберг, Р. Б. Гончаренко и др. // Российская наука – Военно-морскому флоту. М.: Наука, 1997. С. 269–272.

16. *Рутберг Ф. Г., Гончаренко Р. Б., Сафронов А. А.* Перспективы применения синхронных ударных генераторов и емкостных накопителей энергии для испытания электрооборудования электрических сетей // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 1. С. 1–7.

17. Устройство для быстродействующего выравнивания активной мощности энергосистем / Р. Б. Гончаренко, В. Е. Попов, Ф. Г. Рутберг // Патент РФ 2515269. Приоритет от 04.03.2013.

18. Особенности плазмотронов переменного тока и выбор их автономных источников электропитания применительно к установкам для получения синтез-газа / Ф. Г. Рутберг, Р. Б. Гончаренко, И. И. Кумкова, А. А. Сафронов // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 4. С. 104–115.

19. Применение систем резервного электропитания на основе маховичных агрегатов переменного тока и газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов для стабилизации режимов энергосистем / Р. Б. Гончаренко, А. А. Киселев, В. Е. Попов, Ф. Г. Рутберг // Электричество. 2014. № 9. С. 13–22.

УДК 621.311

С. А. Гришанов*
старший преподаватель
Д. А. Свищенков*
магистрант 2-го курса
**Донецкий национальный технический университет*

ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье выполнен анализ математических моделей генератора, которые в основном используются в современных программных комплексах. Предложено получение параметров упрощенной схемы замещения турбогенератора по экспериментальным частотным характеристикам. Сопоставлены частотные характеристики синхронного генератора, полученные для разных по сложности схем. Выполнен расчет асинхронного режима генератора при потере возбуждения с использованием полученных данных. Сделан вывод о целесообразности использования упрощенных схем замещения генератора (model 2.2 и model 3.3), используемых в современных программных комплексах.

Ключевые слова: *математическая модель генератора, схемы замещения турбогенератора, частотные характеристики, асинхронный режим.*

S. A. Grishanov*
Senior Lecturer
D. A. Svischenkov*
Master student of 2rd course
**Donetsk National Technical University*

OBTAINING PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODELS FOR GENERATORS USED IN COMPUTER SIMULATION PROGRAMS

The article analyzes the mathematical models of the generator, which are mainly used in modern software complexes. Proposed getting to obtain the parameters of a simplified equivalent circuit of a turbogenerator according to experimental frequency characteristics. The frequency characteristics of a synchronous generator, obtained for schemes of different complexity, are compared. The calculated of the asynchronous mode of the generator with the loss of excitation using the data obtained. The conclusion is made about the expediency of using simplified generator replacement schemes (model 2.2) and (model 3.3) used in modern software systems.

Keywords: *mathematical model of the generator, turbogenerator equivalent circuit, frequency characteristics, asynchronous mode.*

Введение

Как известно, в современных условиях повышаются требования к надежности и управляемости электрических систем [1]. Это влечет за собой повышение требований к устройствам противоаварийной автоматики и, соответственно, к средствам моделирования сложных ситуаций, в том числе и аварийных, в электрических системах. Надежная работа электрической системы в первую очередь зависит от поведения синхронных генераторов в переходных режимах [2]. Поэтому исследованию переходных процессов в синхронных машинах уделяют большое внимание.

Актуальность работы и основные положения

В настоящее время для исследования переходных режимов в электрических системах наиболее широко используются специализированные компьютерные программы («Mustang», «Анарэс», «Dakar», «Eurostag», PSS/E, «SimPow», «Netovac», ETAP, «DIgSILENT PowerFactory» и др.), а также универсальные пакеты моделирования с наборами приложений, например среда Matlab.

Данные программные комплексы можно классифицировать по [2]:

– степени соответствия требованиям построения открытых систем;

Таблица 1

Параметры схем замещения турбогенератора типа ТГВ-200

Параметр			Параметры схемы, о. е.								
	$R_f + jX_{\sigma f}$		Параметры контуров массива ротора $R_k + jX_{\sigma k}$								
		1	2		3	4	5	6	7		
ТГВ–200	Ось d ОВГ на R_{cc}	R	0,00668	0,0758	0,028		0,00836	0,0064	–	–	–
		X	0,196	0,0704	2,34		1,684	9,18	–	–	–
	Ось d ОВГ КЗ	R	0,000848	0,084	0,043		0,00149	–	–	–	–
		X	0,189	0,0443	1,21		2,865	–	–	–	–
	Ось q	R	–	0,0336	0,134		2,24	0,0126	0,113	0,0526	0,0187
		X	–	0,142	0,091		9,41	2,74	0,803	0,498	0,686
	$R_{ст} + jX_{\sigma} = 0{,}00127 + j0{,}175$				$X_{ad} = 1{,}724\ X_{aq} = 1{,}661$						

– возможности включения в ПО современных SCADA-систем;

– наличию стандартных моделей IEEE систем регулирования;

– наличию различных источников энергии, включая нетрадиционные;

– возможности использования современных устройств регулирования FACTS;

– степени отражения физических явлений в моделях элементов;

– наличию макроязыка для создания новых моделей и формирования сценариев событий имитационного моделирования;

– отражению новых технологий построения и управления электрическими системами.

В то же время общим фактором для существующих программ является представление машин переменного тока (генераторов) с помощью схем замещения различного вида при наличии ряда методик по определению параметров, что вызывает определенные трудности при формировании модели исходных данных для исследования переходных режимов в электрических системах. Для большинства программных продуктов характерно использование в качестве исходных данных постоянных времени и сопротивлений X_d, X''_d, X'_d, X_q, X''_q, X'_q, которые в самой программе обычно используются для получения схемы замещения. А параметры получаемой в программе схемы замещения от пользователя скрыты. Этот механизм представления математической модели генераторов характерен для таких программных продуктов, как «DIgSILENT PowerFactory» [3], PSS/E, ETAP, и других зарубежных специализированных программ.

Как известно из анализа большого количества работ отечественных [4–5], а также зарубежных авторов [6–7], для моделирования переходных процессов в электрических машинах переменного тока широко используются схемы замещения с несколькими постоянными или даже переменными контурами. Параметры контуров определяются на основе экспериментальных данных. В то же время расчетные параметры современных крупных синхронных генераторов не могут в полной мере учесть влияние бесконечно большого числа контуров массива ротора, а также изменение параметров вследствие вытеснения токов в массиве ротора. Наиболее точно их можно определить по экспериментальным частотным характеристикам [5]. При этом промышленные программы, как отмечалось ранее, используют в модели генераторов постоянные времени и сопротивления, следовательно, необходимо выполнить преобразование или синтез многоконтурных схем замещения турбогенераторов, полученных по экспериментальным частотным характеристикам и получить упрощенные схемы замещения с меньшим количеством контуров [2]. Поэтому задача по определению параметров синхронных машин, наиболее часто используемых в современных программных продуктах, является актуальной.

Цель работы: определение постоянных времени и сопротивлений отечественных генераторов для моделирования в современных программных комплексах на основе параметров схем замещения, синтезированных по экспериментальным данным.

Результаты работы: в качестве исследуемого объекта были взяты отечественные турбогенераторы серии ТГВ и ТВВ, а именно следующие модели генераторов: ТГВ-200, ТГВ-300, ТВВ-200 и ТВВ-320. Для всех этих генераторов имеются параметры сложных многоконтурных схем замещения, полученные по экспериментальным частотным характеристикам [8–9]. Параметры сложных многоконтурных схем замещения турбогенератора ТГВ-200 по данным [9] при короткозамкнутой и замкнутой на сопротивление самосинхронизации обмотки возбуждения приведены в табл. 1.

В качестве базового программного продукта для моделирования в сложных аварийных ситуациях во многих странах мира используют PowerFactory [10], поэтому наши исследования

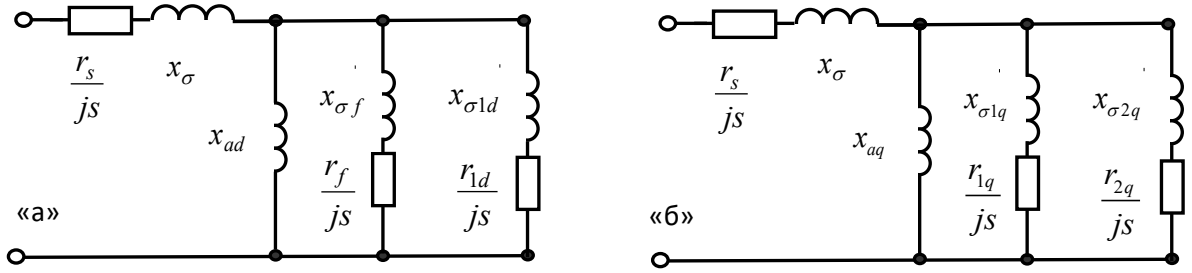


Рис. 1. Схема замещения синхронной машины (model 2.2):
а – схема замещения по оси d; б – схема замещения по оси q

в дальнейшем в большей степени будут адаптироваться под это программное обеспечение. Как известно, в PowerFactory модель генератора реализована с использованием схем замещения по продольной и поперечной осям [11]. Число контуров, представляющих в модели массив ротора, определяется в соответствии с международным стандартом [12].

Исследование было разделено на такие этапы:

1. Синтез упрощенной схемы замещения (рис. 1) турбогенератора (model 2.2) [12] и более сложной схемы замещения турбогенератора (model 3.3 – данная модель генератора реализована в новых версиях PowerFactory) по экспериментальным частотным характеристикам.

2. Моделирование асинхронного режима с потерей возбуждения турбогенератора и сопоставление результатов моделирования с данными эксперимента.

3. Получение модели в виде постоянных времени и сопротивлений, применяемой в PowerFactory, по методике [11] для синтезированной схемы (model 2.2).

Синтез упрощенных схем замещения (model 2.2 и model 3.3) генератора ТГВ-200 по экспериментальным частотным характеристикам выполнен по точкам, дающим наибольшее сходство с оригинальной частотной характеристикой. Данные синтезированных схем замещения для генератора ТГВ-200 приведены в табл. 2.

Следует заметить, что контур ОВГ для схемы (model 2.2) получен в результате синтеза (выбран первый контур), а для схемы (model 3.3) синтез выполнен только для массива ротора, контур ОВГ взят из схемы оригинала.

На рис. 2, 3 приведены частотные характеристики по осям d и q, полученные по параметрам схем замещения генератора ТГВ-200, которые были синтезированы по исходной частотной характеристике.

Как видно из рис. 2, 3, синтезированные частотные характеристики (model 2.2) отличаются от исходной как по оси d, так и по оси q, причем отличие по оси d даже более значительно в зоне малых скольжений. В то же время синтезированная частотная характеристика (model 3.3) практически совпадает с исходной.

Расчеты асинхронного режима турбогенератора ТГВ-200, представленного различными по сложности схемами замещения, сопоставлены с данными эксперимента [13]. Исследование проводилось на примере простейшей схемы (генератор – трансформатор – эквивалентная система) с учетом системы регулирования скорости генератора (АРС). Результаты моделирования и сопоставление с экспериментом приведены на рис. 4.

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что среднее значение активной мощности и тока статора в асинхронном режиме при моделировании с использованием всех вариантов схем замещения практически совпадают с экспериментальными данными. Это подтверждает утверждение, сделанное в [14]. Период колебаний параметров режима при моделировании асинхронного режима по схеме (model 2.2) незначительно отличается от периода при использовании более сложных

Таблица 2

Параметры синтезированных схем замещения генератора ТГВ-200

	Параметр	Ось d ОВГ на R_{cc}		Ось d ОВГ КЗ		Ось q	
model 3.3	$R_f + jX_{\sigma f}$	0,000844	0,189	0,00668	0,196	–	–
	$R_1 + jX_{\sigma 1}$	0,00179	2,656	0,005	1,242	0,0104	1,562
	$R_2 + jX_{\sigma 2}$	0,0761	0,0658	0,0721	0,0771	0,0171	0,249
	$R_3 + jX_{\sigma 3}$	–	–	–	–	0,0295	0,0823
model 2.2	$R_f + jX_{\sigma f}$	0,00073	0,188	0,00397	0,264	–	–
	$R_1 + jX_{\sigma 1}$	0,073	0,0679	0,0457	0,109	0,00987	0,979
	$R_2 + jX_{\sigma 2}$	–	–	–	–	0,0139	0,0864

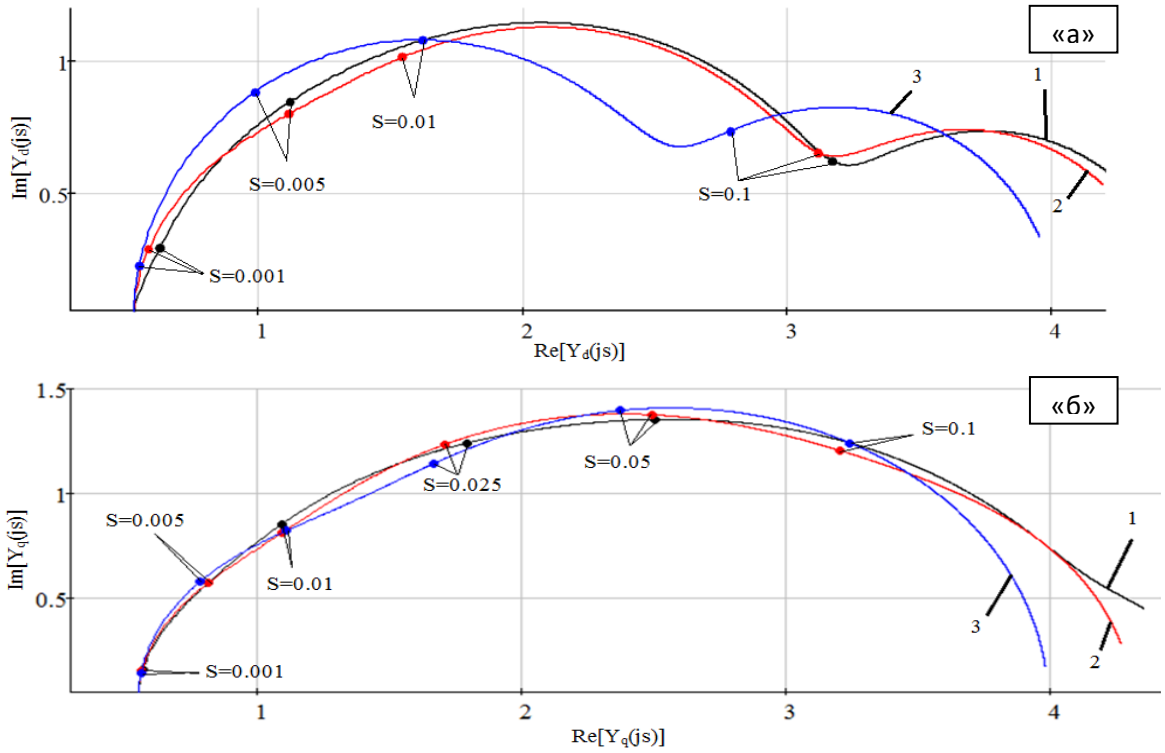


Рис. 2. Частотные характеристики со стороны обмотки статора по осям d и q турбогенератора ТГВ-200 полученные при ОВГ замкнутой на R_{cc}: а – частотная характеристика по оси d; б – частотная характеристика по оси q; 1 – исходная ЧХ; 2 – синтезированная (model 3.3); 3 – синтезированная (model 2.2)

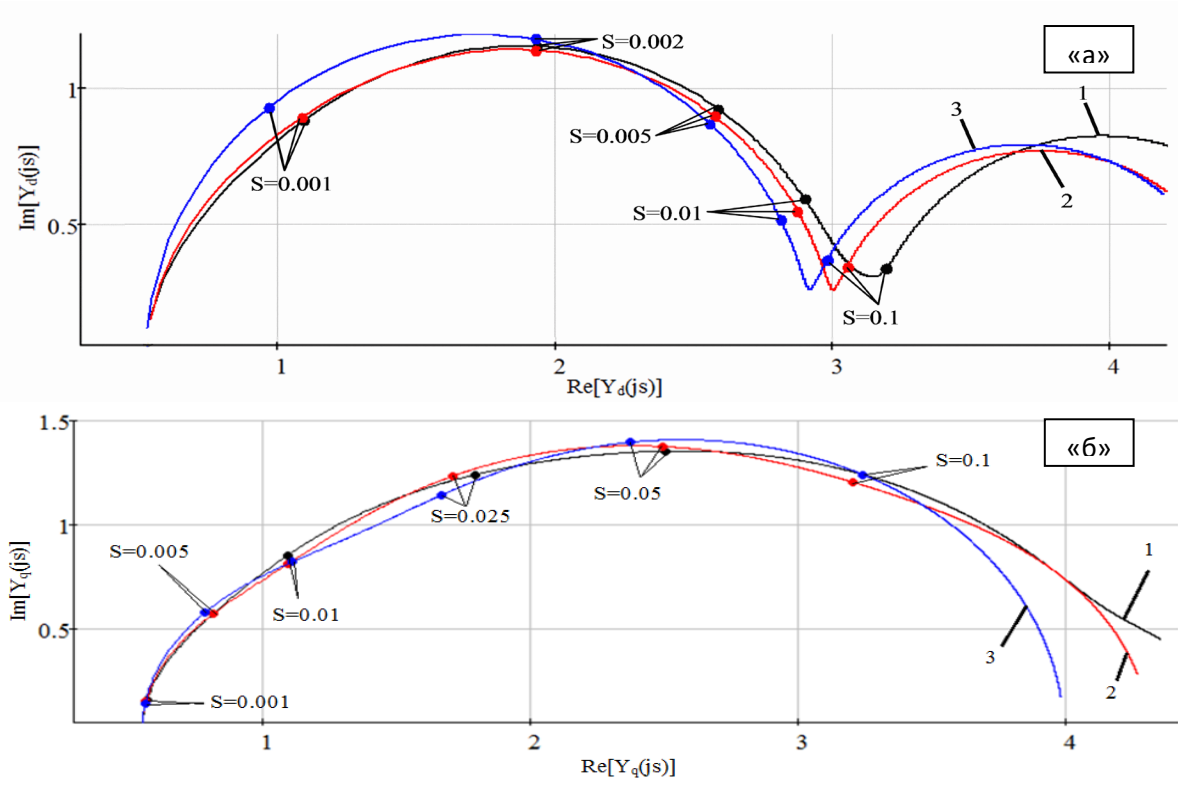


Рис. 3. Частотные характеристики со стороны обмотки статора по осям d и q турбогенератора ТГВ-200, полученные при ОВГ короткозамкнутой: а – частотная характеристика по оси d; б – частотная характеристика по оси q; 1 – исходная ЧХ; 2 – синтезированная (model 3.3); 3 – синтезированная (model 2.2)

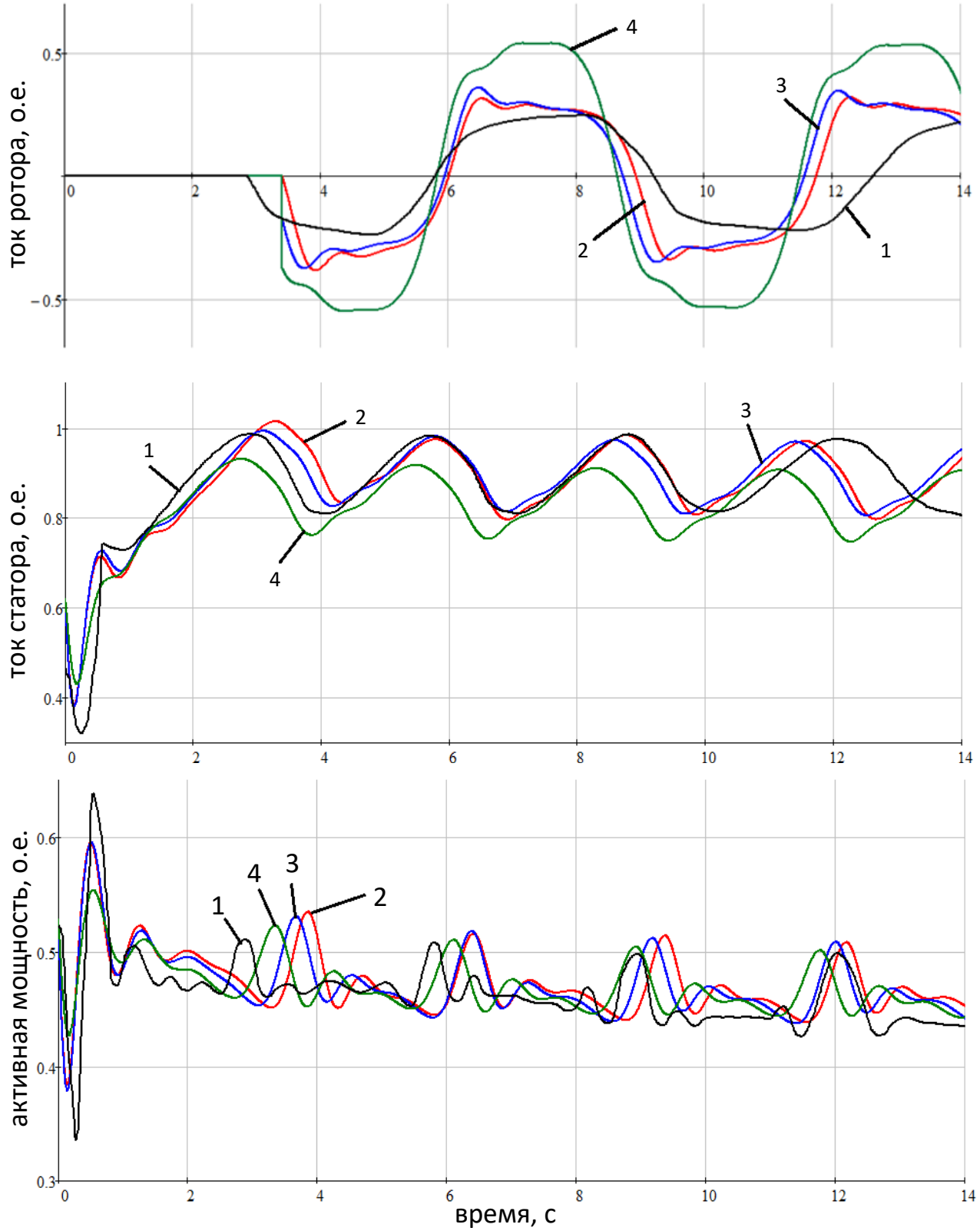


Рис. 4. Сопоставление расчетов асинхронного режима, возникающего при потере возбуждения и замкнутой на R_{cc} ОВГ с экспериментом для различных вариантов схем замещения генератора ТГВ-200: 1 – опытные данные; 2 – полная схема замещения; 3 – model 3.3; 4 – model 2.2

схем. Результаты моделирования по полной схеме замещения и синтезированной (model 3.3) практически совпадают. При сопоставлении с экспериментом имеют место быть отличия результатов моделирования, но их можно считать приемлемыми, период колебаний близок, амплитуды параметров режима практически совпадают. Наибольшие отличия имеются в токе ротора, причем только для схемы (model 2.2). В целом результаты моделирования подтверж-

Таблица 3

Параметры генератора ТГВ-200

Параметр	ТГВ-200 ОВГ на Rсс		ТГВ-200 ОВГ КЗ	
	Ось d	Ось q	Ось d	Ось q
$X^{/}$	0,403987	0,34467	0,790877	0,790877
$X^{//}$	0,248627	0,223479	0,25078	0,25078
$T^{/}$	0,350751	1,519529	0,386698	0,386698
$T^{//}$	0,000556	0,000029	0,005845	0,005845

Таблица 4

Параметры генераторов ТГВ-300, ТВВ-200 и ТВВ-320

Параметр $X^{/}$		Сопротивления, о. е.		Постоянные времени, с	
		$X^{//}$	$T^{/}$	$X^{/}$	$T^{//}$
ТВВ-200	Ось d	0,339043	0,231525	0,846719	0,000291
	Ось q	1,02079	0,371359	1,288225	0,002084
ТВВ-320	Ось d	0,349687	0,317838	1,594098	0,000194
	Ось q	1,09775	0,51831	1,155999	0,002691
ТГВ-300	Ось d	0,295018	0,194147	0,739258	0,001812
	Ось q	1,250297	0,347667	1,460792	0,002011

дают утверждения о том, что использование более сложных многоконтурных схем замещения генератора позволяет более точно моделировать физические процессы в роторе генератора [15]. В то же время схема замещения генератора типа (model 2.2) также дает более или менее приемлемые результаты при моделировании переходных процессов в синхронных машинах, поэтому эту схему также можно использовать, но параметры ее должны быть получены путем синтеза из более сложных схем.

Используя методику преобразования параметров схемы замещения (model 2.2) [11], были получены постоянные времени и сопротивления X_d, $X^{//}{}_d$, $X^{/}{}_d$, X_q, $X^{//}{}_q$, $X^{/}{}_q$, для генератора ТГВ-200, которые можно применить в программном комплексе PowerFactory. Эти параметры приведены в табл. 3.

Аналогичным образом были получены необходимые для моделирования в PowerFactory параметры синхронной машины в результате синтеза полной схемы замещения генераторов ТВВ-200, ТВВ-320 и ТГВ-300 [8] и методики, приведенной в [11]. Эти параметры показаны в табл. 4.

Заключение

1. В работе выполнен синтез параметров схем замещения (model 2.2 и model 3.3) на примере турбогенератора ТГВ-200 для различных вариантов представления обмотки возбуждения (короткозамкнута или замкнута на сопротивление самосинхронизации).

2. По результатам моделирования асинхронного режима турбогенератора, вызванного потерей возбуждения и сопоставления с опытными данными, предложено использование параметров синтезированных схем, в первую очередь model 3.3.

3. Выполнен расчет постоянных времени и сопротивлений X_d, $X^{//}{}_d$, $X^{/}{}_d$, X_q, $X^{//}{}_q$, $X^{/}{}_q$ для ряда отечественных турбогенераторов. Эти значения необходимо использовать в программных комплексах типа PowerFactory в качестве исходных данных либо в программах модель генератора непосредственно в виде схемы замещения, если имеется такая возможность.

Библиографический список

1. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н. И. Воропай, С. В. Подковальников, В. В. Труфанов и др. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.

2. *Заболотный И. П.* Анализ методов формирования модели генератора в компьютерных программах имитационного моделирования режимов электрических систем / И. П. Заболотный, С. А. Гришанов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: електротехніка і енергетика. Вип. 11 (186). Донецьк: ДонНТУ, 2011. С. 150–153.

3. DIgSILENT GmbH Gomaringen. PowerFactory. Руководство пользователя. DIgSILENT PowerFactory. Версия 14.0. Germany, 2011. 1192 с.

4. *Казовский Е. Я., Лернер Л. Г., Сидельников А. В.* Синтез схем замещения электрических машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам // Электротехника. 1979. № 5. С. 6–13.

5. *Рогозин Г. Г.* Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. Киев: Техніка, 1992. 168 с.

6. *Dandeno P. L., Hauth R. L., Schulz R.* Effects Synchronous machine modelling in large scale system stability // Trans. IEEE. 1973. Pas 92. 2. P. 574–582.

7. *Дандено Р. Л., Кундур Р., Шульц Р. П.* Современные тенденции и достижения в области моделирования синхронных машин в электроэнергетике / Пер. с англ. Proc. IEE. 1974. 62. 7. С. 95–106.

8. Экспериментальные частотные характеристики турбогенераторов и их исследование: Отчет о НИР (заключительный) / ДПИ;

ГР74012165; инв. № Б429358. Донецк, 1975. 154 с.

9. Определение параметров сложных эквивалентных схем замещения турбогенераторов мощностью 100, 200, 300 МВт: Отчет по хоз. теме № 69–67 ДПИ; № 69043358. Донецк, 1969. 78 с.

10. *Gonzalez-Longatt, F., Ruda J.* Powerfactory applications for power system analysis. Springer International Publishing, 2014. 489 p.

11. DigSILENT Technical Documentation Synchronous Generator Copyright 2007. All rights reserved. Unauthorised copying or publishing of this or any part of this document is prohibited. TechRef ElmSym V1 Build 331 30.03.2007.

12. IEEE Std 1110–2002. IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses.

13. Технический отчет. Испытания турбогенератора ТГВ-200 ст. № 6 Бурштынской ГРЭС в асинхронном режиме. Львов, 1968.

14. *Ларин А. М., Килани Г. Ф. Б.* Анализ частотных характеристик и многоконтурных эквивалентных схем замещения турбогенераторов серии ТГВ мощностью 200 МВт // Вісник Кременчуцького ДПУ. 2008. Вип. 3/2008 (50). Ч. 2. С. 100–104.

15. *Гришанов С. А.* Анализ математических моделей генератора для исследования асинхронных режимов // Завалишинские чтения'17. СПб.: ГУАП, 2017. С. 135–139.

УДК 621.82/.85

Д. Ю. Ершов*
кандидат технических наук, доцент
И. Н. Лукьяненко**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; Санкт-Петербургский горный университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С S СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

В статье рассмотрены основные приемы математического моделирования привода технологического оборудования с точки зрения учета динамических воздействий на элементы электромеханического привода, возникающих при работе технологической машины. Рассмотрены основные допущения, осуществляемые при переходе от реальной исходной технологической системы к ее модели в зависимости от постановки динамической задачи исследования.

Ключевые слова: *привод технологического оборудования, динамические процессы, технологические системы, идеальные связи, нелинейные механические системы, металлорежущие станки, уравнения Лагранжа.*

D. Y. Ershov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. N. Lukjanenko**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; St. Petersburg Mining University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DYNAMIC MODEL OF THE DRIVE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH S DEGREES OF FREEDOM

The study discusses main techniques of mathematical modeling of the technological equipment drive, namely the dynamics affecting the parts of an electromechanical drive in the machine operation. The main assumptions for moving from an initial physical assembly to its design model with specific research dynamic tasks set are considered.

Keywords: *technological equipment drive, dynamic processes, technological systems, ideal constraints, nonlinear mechanical systems, metal-cutting machinery, Lagrange equations.*

Важным структурным элементом технологической машины является привод. Он обеспечивает движение рабочего органа, передачу мощности, необходимой для преодоления сил технологического сопротивления, осуществляет установочные перемещения. Привод в значительной степени определяет конструкцию технологической машины, ее эксплуатационные возможности и динамические свойства [1, 2].

Механическая система привода включает в себя ротор двигателя, передаточный и исполнительный механизмы и рабочий орган. В настоящем статье рассматриваются приемы, с помощью которых осуществляется переход от реальной конструкции механической системы к ее расчетной схеме (динамической модели).

На рис. 1 показана схема привода, включающая в себя ротор двигателя, момент инерции которого равен J_1, передачу, состоящую из зубчатых колес 2 и 2^*, с моментами инерции J_2 и $J_2{}^*$, а также рабочий орган (например, шпиндель станка) 3 с моментом инерции J_3. Моменты инерции звеньев, указанных на схеме, вычислены относительно собственных осей вращения. К ротору двигателя приложен момент двигателя M_∂, а к рабочему органу – момент сил технологического сопротивления M_c.

В общем случае реальная механическая система привода представляет собой сложную упругоинерционную систему, составленную из валов с насаженными на них зубчатыми колесами, шкивами, муфтами и т. д. [1, 3]. Валы рас-

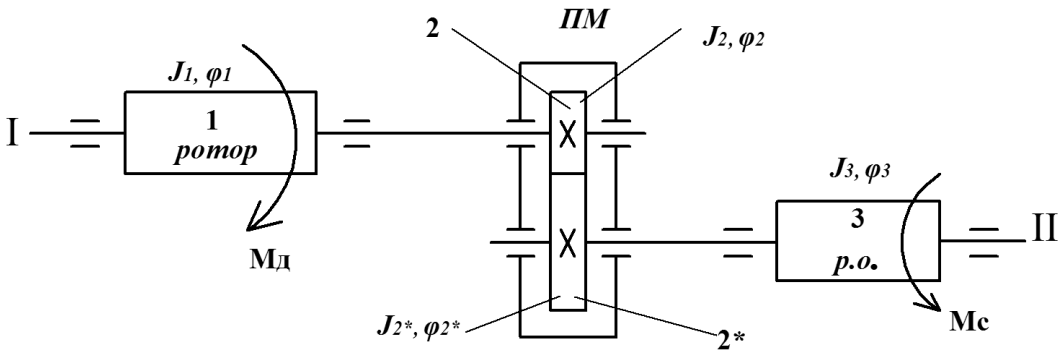


Рис. 1. Схема привода технологического оборудования

положены на деформируемые подшипниковые опоры. Все звенья системы, а также подвижные и неподвижные (шлицевые и шпоночные) соединения при работе механизма испытывают различные деформации – кручения, изгиба, смятия и т. д. Поэтому для полного описания поведения системы необходимо определить перемещения всех ее точек как функций времени и координат. Таким образом, любой реальный механизм является механической системой с бесконечным числом степеней свободы.

Изучение движения механизма в такой постановке, с одной стороны, представляет значительные трудности, а с другой – является с практической точки зрения неоправданным. Сравнительный анализ упругих деформаций различных элементов системы позволяет пренебречь деформируемостью отдельных звеньев и рассматривать их как абсолютно твердые тела. Оценка инерционных свойств звеньев позволяет выделить наиболее существенные элементы, пренебрегая звеньями, имеющими малые массы. Поэтому существуют различные приемы целесообразного упрощения исходной сложной системы для получения расчетной схемы, обеспечивающей решение поставленной задачи. Степень идеализации реальной механической системы и превращение ее в расчетную модель в первую очередь определяется постановкой задачи. В результате возможно введение ряда допущений для осуществления перехода от исходной системы с бесконечным числом степеней свободы к системе с конечным числом степеней свободы [5, 6]. Причем в многоэтапном процессе теоретического и экспериментального исследования машины выявляются как число степеней свободы, так и другие свойства модели, которые адекватным образом отражают процессы в реальной системе. На первом этапе необходимо использовать наиболее простую (с наименьшим числом степеней свободы) модель [2, 5]. Таким образом, разработка адекватной динамической модели машины представляет собой многоэтапный процесс итерационного характера.

Перейдем *к* разработке расчетной схемы механической системы привода, показанного на рис. 1. Сформулируем, прежде всего, основную динамическую задачу: будем исследовать вращение ротора (звено 1) и шпинделя (звено 3) под действием момента двигателя $M_д$ и момента сопротивления M_c.

Введем несколько упрощающих предположений.

1. Будем считать подшипниковые опоры (вращательные кинематические пары) валов недеформируемыми. При этом допущении опоры становятся связями, ограничивающими движение валов. Последние теперь могут лишь вращаться вокруг своих осей и не могут совершать поперечных колебаний как твердые тела на упругих опорах. Связи накладывают ограничения на перемещения валов и поэтому являются позиционными.

2. Будем полагать ротор двигателя, шпиндель и зубчатые колеса абсолютно твердыми телами. Зубья зубчатых колес также будем полагать недеформируемыми. В этом случае кинематическая пара, образованная поверхностями взаимодействующих зубьев, является связью, которая накладывает ограничение на относительное перемещение валов ротора (вал I) и шпинделя (вал II). При этом уравнение связи записывается следующим образом:

$$\varphi_{2^*} = i^{-1} \cdot \varphi_2 , \qquad (1)$$

где φ_2, φ_{2^*} – углы поворота зубчатых колес 2 и 2^*; i – кинематическое передаточное отношение зубчатой передачи.

Выражение (1) определяет уравнение позиционной связи.

3. Будем считать зазор *в* зубчатой передаче пренебрежимо малым. В этом случае зависимость между углами φ_2 и $\varphi_{2^*} i$ оказывается линейной. Если возникает необходимость учитывать зазор, то получаем нелинейную зависимость между φ_2 и $\varphi_{2^*} i$, а, следовательно, и нелинейную механическую систему с нелинейностью типа «зазор».

4. Будем полагать участок вала I между ротором двигателя и зубчатым колесом 2, а также участок вала II между зубчатым колесом 2* и рабочим органом 3 недеформируемыми. При этом предположении механическую систему можно рассматривать состоящей из двух твердых тел, вращающихся вокруг своих неподвижных осей. Как уже было отмечено, на относительное перемещение этих тел наложено ограничение (1). Сделанное допущение позволяет записать следующие тождества:

$$\varphi_2 \equiv \varphi_1,\ \varphi_{2*} \equiv \varphi_2 \cdot i^{-1} = \varphi_1 \cdot i^{-1},$$
$$\varphi_3 \equiv \varphi_{2*} = \varphi_1 \cdot i^{-1}, \qquad (2)$$

где φ_1 и φ_3 – углы поворота ротора и шпинделя.

Из (2) следует, что углы поворота φ_2, φ_{2*} и φ_3 определяются значением угла φ_1.

5. Будем пренебрегать силами трения в кинематических парах. Это допущение делает связи, наложенные на движение системы, идеальными.

При указанных предположениях механическая система привода представляется системой с одной степенью свободы, движение которой ограничено голономными стационарными удерживающими и идеальными связями. Такую механическую систему привода принято называть жесткой машиной. Таким образом, рассматриваемая система имеет одну степень свободы. Выберем в качестве обобщенной координаты, например, угол поворота ротора j1.

Запишем уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}_1}\right) - \frac{dT}{d\varphi} = Q_{\varphi_1}. \qquad (3)$$

Кинетическая энергия системы T равна сумме кинетических энергий тел, в нее входящих. Так как все тела вращаются вокруг неподвижных осей, то кинетическая энергия привода определяется из выражения:

$$T = \frac{1}{2}J_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2 + \frac{1}{2}J_{2*}\omega_{2*}^2 + \frac{1}{2}J_3\omega_3^2, \qquad (4)$$

где ω_1, ω_2, ω_{2*}, ω_3 – угловые скорости ротора, зубчатых колес 2 и 2* и рабочего органа соответственно.

Продифференцировав по времени тождества (2)

$$\omega_2 \equiv \omega_1,\ \omega_{2*} \equiv \omega_2 \cdot i^{-1} = \omega_1 \cdot i^{-1},$$
$$\omega_3 \equiv \omega_{2*} = \omega_1 \cdot i^{-1}, \qquad (5)$$

запишем кинетическую энергию системы в виде:

$$T = \frac{1}{2}\omega_1^2\left(J_1 + J_2 + J_{2*} \cdot i^{-2} + J_3 \cdot i^{-2}\right). \qquad (6)$$

Величина, стоящая в круглых скобках и равная

$$J_{np} = J_1 + J_2 + J_{2*} \cdot i^{-2} + J_3 \cdot i^{-2}, \qquad (7)$$

называется моментом инерции механической системы, приведенным к оси вращения ротора как ведущего звена. Заметим, что поскольку передаточное отношение i передаточного механизма является постоянным, то в силу (7) приведенный момент инерции системы также является постоянным. Теперь кинетическая энергия может быть записана следующим образом:

$$T = \frac{1}{2}J_{np}\omega_1^2. \qquad (8)$$

Для вычисления обобщенной силы $Q_{\varphi 1}$ сообщим системе возможное перемещение $\delta\varphi_1$, которое определяет бесконечно малый угол поворота ротора в направлении действия момента двигателя. Вычислим на этом перемещении работу моментов M_∂ и M_c:

$$\delta A = M_д \cdot \delta\varphi_1 - M_c \cdot \delta\varphi_3, \qquad (9)$$

где $\delta\varphi_3$ – элементарный угол поворота исполнительного органа.

Проварьируем третье уравнение связи (2):

$$\delta\varphi_3 = i^{-1} \cdot \varphi_1. \qquad (10)$$

Тогда, подставив вместо $\delta\varphi_3$ его выражение через $\delta\varphi_1$, получим:

$$\varphi A = M_\partial \cdot \delta\varphi_1 - M_c \cdot i^{-1} \cdot \delta\varphi_1 = \left(M_д - M_c \cdot i^{-1}\right) \cdot \delta\varphi_1, \qquad (11)$$

откуда:

$$Q_{\varphi 1} = M_д - M_c \cdot i^{-1} = M_{пр}, \qquad (12)$$

где $M_{пр}$ – момент активных сил, приведенный к оси ротора.

Таким образом, обобщенная сила определяет момент $M_{пр}$. При этом работа сил тяжести тел системы равна нулю, так как точки их приложения на возможном перемещении остаются неподвижными. Суммарная работа реакций связей в опорах и зацеплении зубчатых колес также равна нулю, так как связи полагаются идеальными.

Выполнив над функцией кинетической энергии процедуры, предписываемые уравнением Лагранжа

$$\frac{dT}{d\omega_1} = J_{пр} \cdot \omega_1$$
$$\frac{d}{dt}\left(J_{пр} \cdot \omega_1\right) = J_{пр} \cdot \dot{\omega}_1$$
$$\frac{dT}{d\varphi_1} = 0 \qquad (13)$$

и учитывая обобщенную силу $Q_{\varphi 1}$, получим дифференциальное уравнение движения механической системы:

$$J_{пр} \cdot \dot{\omega}_1 = M_д - M_c \cdot i^{-1} = M_{пр}. \qquad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что исходную сложную механическую систему привода после принятых предположений можно представить некоторым твердым телом с моментом инерции

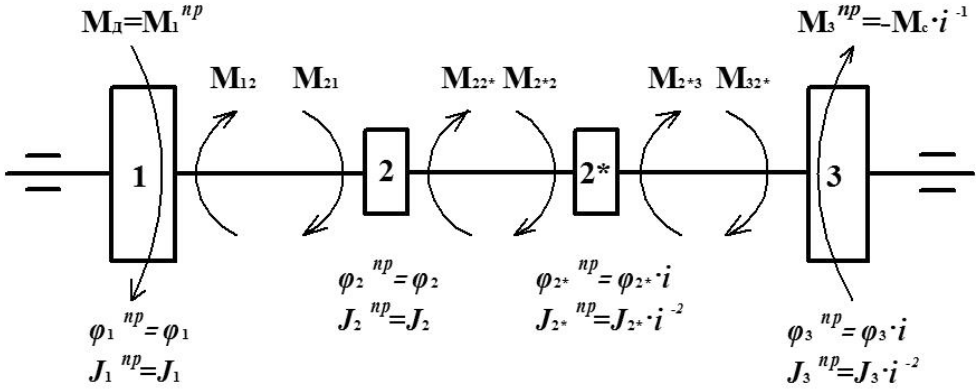


Рис. 2. Расчетная схема привода

$J_{\text{пр}}$, вращающимся под действием момента $M_{\text{пр}}$ вокруг неподвижной оси OZ. Это твердое тело с приложенным к нему моментом $M_{\text{пр}}$ и является расчетной схемой исходной механической системы привода или ее динамической моделью. С ее помощью можно решать ряд задач, связанных с изучением поведения системы без учета упругих деформаций звеньев в режимах разбега, торможения или равновесного движения. Использование этой динамической модели целесообразно, как правило, на начальном (эскизном) этапе проектирования привода технологической машины. Однако уже на этом этапе конструктора могут интересовать величины динамических нагрузок, например, крутящих моментов на валах и усилий в зацеплении, возникающих в тех или иных режимах движения привода. В этом случае расчетную схему удобно представить в виде жесткого вала, на котором последовательно расположены диски (рис. 2).

Она характеризуется углами поворота дисков, их моментами инерции и моментами внешних активных сил. В исходной системе углы поворота звеньев равны φ_1, φ_2, φ_{2*} и φ_3. В расчетной схеме приведенные их значения $\varphi_i^{\text{пр}}$ определяются следующим образом: $\varphi_1^{\text{пр}} = \varphi_1$ – угол поворота диска 1, соответствующего ротору двигателя; $\varphi_2^{\text{пр}} = \varphi_2$ – угол поворота диска 2, соответствующего зубчатому колесу 2; $\varphi_{2*}^{\text{пр}} = \varphi_{2*} \cdot i$ – угол поворота диска 2^*, соответствующего зубчатому колесу 2^*; $\varphi_3^{\text{пр}} = \varphi_3 \cdot i$ – угол поворота диска 3, соответствующего звену 3.

Поскольку участки вала, соединяющие диски 1, 2, 2^* и 3, полагаются недеформируемыми, а приведение выполнено к оси ротора, то приведенные углы поворота равны:

$$\varphi_1^{\text{пр}} = \varphi_2^{\text{пр}} = \varphi_{2*}^{\text{пр}} = \varphi_3^{\text{пр}} = \varphi_1 . \qquad (15)$$

Приведенные моменты инерции $J_i^{\text{пр}}$ дисков расчетной схемы определяются в соответствии с (7) следующим образом:

$$J_1^{\text{пр}} = J_1,\ J_2^{\text{пр}} = J_2,\ J_{2*}^{\text{пр}} = J_{2*} \cdot i^{-2},$$
$$J_3^{\text{пр}} = J_3 \cdot i^{-2}. \qquad (16)$$

Заметим, что приведенные моменты инерции дисков, соответствующих звеньям исходной системы, расположенных на валу II, не равны моментам инерции J_{2*} и J_3, вычисленным относительно их собственных осей. Это объясняется тем, что при получении приведенных инерционных характеристик расчетной схемы необходимо соблюдать равенство кинетической энергии исходной системы и расчетной схемы. Рассмотрим i-е звено ПМ с моментом инерции J_i относительно собственной оси вращения, расположенное на l-м валу. Вычислим момент инерции $J_i^{\text{пр}}$ этого звена, приведенный к валу I (рис. 3).

Исходя из условия равенства кинетической энергии тела в исходной системе и в расчетной имеем:

$$\frac{J_i \cdot \omega_l^2}{2} = \frac{J_i^{\text{пр}} \cdot \omega_I^2}{2}, \qquad (17)$$

где ω_I, ω_l – угловые скорости вращения валов I и l-го.

Отсюда получаем:

$$J_i^{\text{пр}} = J_i \cdot \left(\frac{\omega_l}{\omega_I}\right)^2 = J_i \cdot i_{I,l}^{-2}, \qquad (18)$$

где $i_{I,l} = \dfrac{\omega_I}{\omega_l}$ – кинематическое передаточное отношение между валами I и l-м.

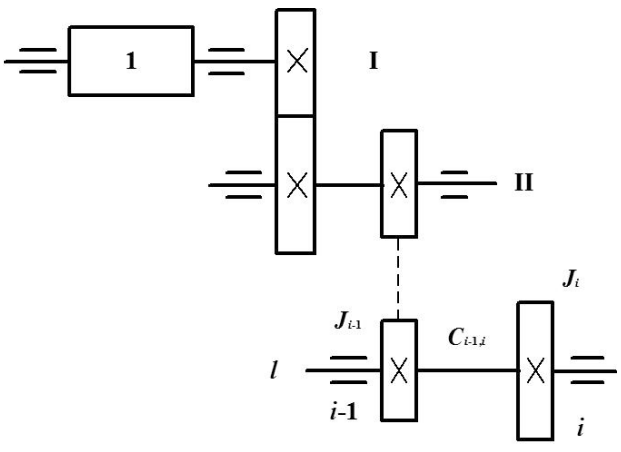


Рис. 3. Вычисление приведенного момента инерции

Выражение (18) дает правило приведения моментов инерции звеньев системы при определении параметров приведенной расчетной схемы.

Слагаемые в выражении обобщенной силы $Q_{\varphi 1}$ определяют приведенные значения внешних моментов активных сил:

$$M_1^{\text{пр}} = M_{\text{д}},\ M_2^{\text{пр}} = 0, M_{2^*}^{\text{пр}} = 0,\ M_3^{\text{пр}} = -M_c \cdot i^{-2}. \quad (19)$$

Покажем на приведенной расчетной схеме характеризующие ее параметры (рис. 3).

Участки 1–2, 2–2* и 2*–3 вала расчетной схемы (рис. 2) передают крутящие моменты, которые являются моментами внутренних сил. Условимся их обозначать следующим образом: M_{12} – крутящий момент на участке 1–2 вала, приложенный *к* диску 1; M_{21} – крутящий момент на том же участке, приложенный к диску 2, причем $M_{12} = -M_{21}$. Далее имеем $M_{22^*} = -M_{2^*2}$ и $M_{23} = -M_{32}$ – крутящие моменты на участках 2–2* и 2*–3 вала расчетной схемы.

Использование при динамическом анализе приведенной расчетной схемы удобно, так как позволяет при математическом описании абстрагироваться от конструктивных особенностей исходной механической системы (характера соединений, типов подшипников, видов зубчатых колес), а также оценить долю кинетической энергии каждого из звеньев в суммарной энергии и ее влияние на динамику системы в целом. Одним словом, приведенная расчетная схема дает возможность получить сравнимые величины параметров, характеризующих исходную систему.

Неудобство, связанное с использованием расчетной схемы, состоит в том, что величины, получаемые при ее анализе (ускорения, скорости, крутящие моменты), справедливы для расчетной схемы и для определения соответствующих их значений исходной системы необходимо выполнить процедуру обратного приведения, например, скорости и ускорения разделить, а крутящие моменты умножить на кинематическое передаточное отношение.

Далее рассмотрим изменение совокупности ранее принятых допущений к расчетной схеме. Пусть по-прежнему выполняются предположения 1–3 и 5, а допущение 4 не выполняется. Это означает, что участок вала I и участок вала II полагаются деформируемыми. Теперь возникает необходимость определить количественные характеристики упругих свойств участков 1–2 и 2*–3 вала динамической модели.

Определим приведенные коэффициенты крутильной жесткости динамической модели, для участков 1–2 и 2*–3 вала. Пусть C_{12} и C_{2^*3} – коэффициенты крутильной жесткости участков исходной механическом системы (рис. 1). Потенциальная энергия системы равна сумме потенциальных энергий участка вала I и участка вала II:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)^2 + \frac{1}{2} C_{2^*3} (\varphi_{2^*} - \varphi_3)^2. \quad (20)$$

Перейдем от обобщенных координат φ_1 φ_2, φ_{2^*} и φ_3 исходной системы к приведенным обобщенным координатам динамической модели:

$$\varphi_1^{\text{пр}} = \varphi_1,\ \varphi_2^{\text{пр}} = \varphi_2,\ \varphi_{2^*}^{\text{пр}} = \varphi_{2^*} \cdot i,\ \varphi_3^{\text{пр}} = \varphi_3 \cdot i. \quad (21)$$

Учитывая эти соотношения, запишем потенциальную энергию системы следующим образом:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_{12} \left(\varphi_1^{\text{пр}} - \varphi_2^{\text{пр}}\right)^2 + \frac{1}{2} C_{2^*3} \cdot i^{-2} \left(\varphi_{2^*}^{np} - \varphi_3^{\text{пр}}\right)^2. \quad (22)$$

Теперь получаем:

$$C_{12}^{\text{пр}} = C_{12},\ C_{2^*3}^{\text{пр}} = C_{2^*3} \cdot i^{-2}. \quad (23)$$

Выполним приведение коэффициента жесткости $C_{i-l,i}$, *l*-го вала к оси вращения *i*-го вала (см. рис. 3). Потенциальная энергия *l*-го вала записывается следующим образом:

$$\Pi_l = \frac{1}{2} C_{i-l,i} (\varphi_{i-l} - \varphi_i)^2. \quad (24)$$

Приведенные значения обобщенных координат φ_{i-l} и φ_i равны $\varphi_{i-l}^{\text{пр}} = \varphi_{i-l} \cdot i_l$ и $\varphi_i^{\text{пр}} = \varphi_i \cdot i_l$.

Используя эти соотношения, запишем:

$$\Pi_l = \frac{1}{2} C_{i-l,i} \cdot i_{1,l}^{-2} \left(\varphi_{i-1}^{\text{пр}} - \varphi_i^{\text{пр}}\right)^2. \quad (25)$$

Отсюда значение приведенной жесткости равно:

$$C_{i-1,i}^{\text{пр}} = C_{i-1,i} \cdot i_{1,l}^{-2}. \quad (26)$$

Зависимость (26) дает правило вычисления приведенного коэффициента жесткости при определении упругих параметров модели. Вычисление приведенного коэффициента жесткости можно выполнить и иным способом. Рассмотрим механическую систему (рис. 1) и определим $C_{2^*3}^{\text{пр}}$. Для этого приложим к звену 1 некоторый момент M_i, зафиксировав рабочий орган 3. Будем полагать все звенья системы недеформируемыми, кроме участка 2*–3 вала II, жесткость которого конечна и равна C_{2^*3}. На зубчатом колесе 2* возникает момент $M_{2^*} = M_1 \cdot i$, под действием которого оно повернется на угол $\varphi_{2^*} = \frac{M_{2^*}}{C_{2^*3}}$. Это вызовет поворот вала I на угол $\varphi_1 = \varphi_{2^*} \cdot i$. Угол поворота φ_1 определяет деформацию системы за счет упругости вала II, приведенную к валу I и вызванную внешним воздействием – моментом M_1, приложенным на входе системы. Тогда $\frac{M_1}{\varphi_1}$ определяет жесткость системы, приведенную к валу I и обусловленную упругостью вала II, то есть:

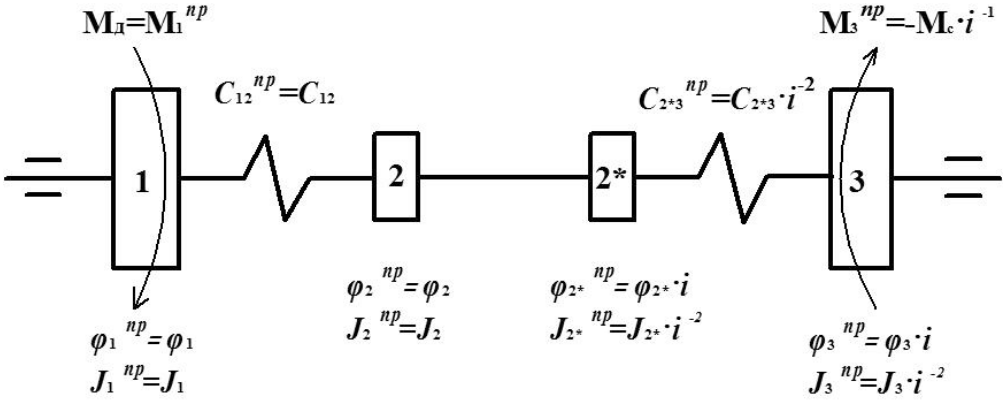


Рис. 4. Приведенная расчетная схема привода

$$C_{2^*3}^{\text{пр}} = \frac{M_1}{\varphi_1} = \frac{M_{2^*}}{i \cdot \varphi_{2^*} \cdot i} = \frac{C_{2^*3} \cdot \varphi_{2^*}}{\varphi_{2^*} \cdot i^2} = C_{2^*3} \cdot i^{-2}. \quad (27)$$

Теперь приведенная расчетная схема исходной системы приобретает вид, показанный на рис. 4*:*

Положение дисков теперь не определяется одной координатой φ_1, как это было в расчетной схеме, показанной на рис. 2. Положение диска 1 характеризуется координатой $\varphi_1^{\text{пр}}$, дисков 2 и 2^*, связанных между собой жестко, – координатой $\varphi_2^{\text{пр}}$ и диска 3 – координатой $\varphi_3^{\text{пр}}$. Поскольку диски 2 и 2^* соединены недеформируемым участком вала, то их можно представить одним диском с моментом инерции $J_2^{\text{пр}} = J_2 + J_{2^*} \cdot i^{-2}$. В дальнейшем для упрощения записи опустим буквы «пр» в обозначении параметров приведенной расчетной схемы и тогда получаем динамическую модель, показанную на рис. 5.

Таким образом, изменение совокупности допущений, связанное с отказом от недеформируемости валов исходной системы, приводит к новой динамической модели с тремя степенями свободы, положение дисков которой определяется тремя обобщенными координатами φ_1, φ_2 и φ_3. Поведение системы описывается тремя дифференциальными уравнениями движения, а не одним уравнением, как это было ранее.

Если учесть кроме упругости валов также и упругие свойства зубчатой передачи, обусловленные контактной и изгибной деформацией зубьев колес, то в расчетной схеме, показанной на рис. 5, участок вала между зубчатыми колесами 2 и 2^* уже будет не жестким, а податливым. Жесткость зубчатой передачи в соответствии с [8] определяется формулой:

$$C = k \cdot B \cdot r^2, \quad (28)$$

где r – радиус начальной окружности зубчатого колоса; B – ширина зуба зубчатого венца; k – коэффициент, определяемый экспериментально для стальных зубчатых колес, он равен $k = 150 \cdot 10^4$ Н/ см^2.

С помощью (28) получаем крутильную жесткость зубчатой передачи, приведенную к оси ротора того колеса, радиус которого r использован в формуле. Так, если воспользоваться величиной начального радиуса r_2 зубчатого колеса 2, получим крутильную жесткость C_{22^*} зубчатой передачи, приведенную колесу 2:

$$C_{22^*} = k \cdot B \cdot r_2^2. \quad (29)$$

Если использовать радиус r_{2^*} начальной окружности зубчатого колеса 2^*, получим крутильную жесткость $C_{22^*}^*$, приведенную *к* оси колеса 2^*:

$$C_{22^*}^* = k \cdot B \cdot r_{2^*}^2, \quad (30)$$

поскольку $\frac{r_{2^*}}{r_2} = i$, получим:

$$C_{22^*} = k \cdot B \cdot r_{2^*}^2 \cdot i^{-2} = C_{22^*}^* \cdot i^{-2}. \quad (31)$$

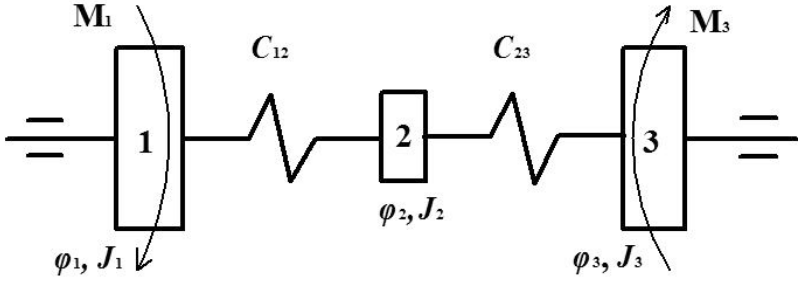


Рис. 5. Динамическая модель привода с 3 степенями свободы

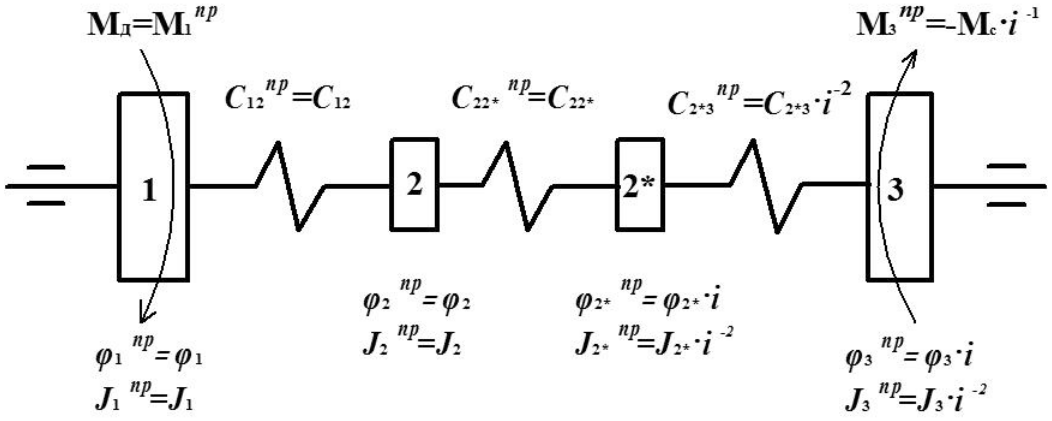


Рис. 6. Приведенная расчетная схема привода с 4 степенями свободы

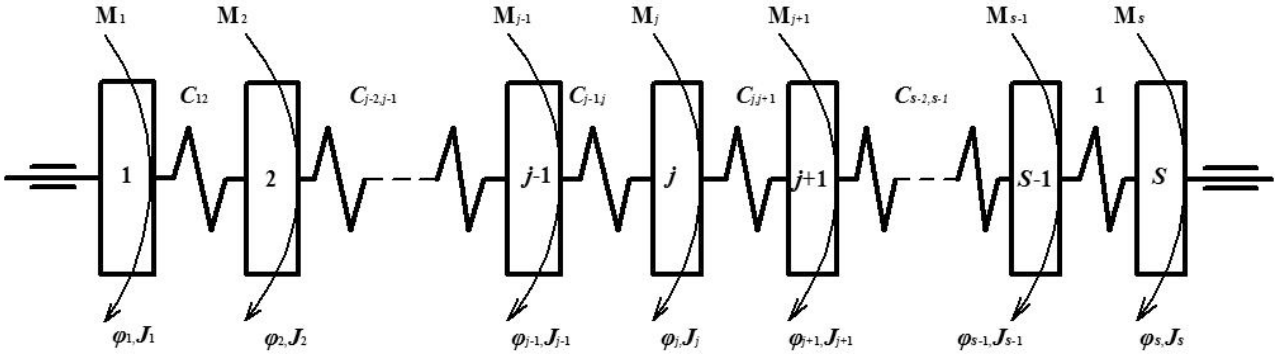


Рис. 7. Динамическая модель привода с S степенями свободы

Крутильная жесткость передачи, приведенной к оси колеса 2, в i^2 раз меньше, чем жесткость, приведенная к оси колеса 2^*.

Теперь получаем динамическую модель исходной механической системы, показанную на рис. 6.

Система имеет четыре степени свободы, так как положение тел определяется заданием четырех обобщенных координат:

$$\varphi_1^{\text{пр}} = \varphi_1,\ \varphi_2^{\text{пр}} = \varphi_2,\ \varphi_{2^*}^{\text{пр}} = \varphi_{2^*} \cdot i,\ \varphi_3^{\text{пр}} = \varphi_3 \cdot i\ . \quad (32)$$

Моменты инерции дисков расчетной схемы равны:

$$J_1^{\text{пр}} = J_1,\ J_2^{\text{пр}} = J_2,\ J_{2^*}^{\text{пр}} = J_{2^*} \cdot i^{-2},\ J_3^{\text{пр}} = J_3 \cdot i^{-2}\ . \quad (33)$$

Участки вала между дисками характеризуются коэффициентами жесткости:

$$C_{12}^{\text{пр}} = C_{12}, C_{22^*}^{\text{пр}} = C_{22^*}, C_{2^*3}^{\text{пр}} = C_{2^*3} \cdot i^{-2}\ . \quad (34)$$

Значения приведенных моментов двигателя и сил сопротивления равны:

$$M_1^{\text{пр}} = M_{\partial},\ M_2^{\text{пр}} = 0,\ M_{2^*}^{\text{пр}} = 0,\ M_3^{\text{пр}} = -M_c \cdot i^{-2}. \quad (35)$$

В общем случае получаем динамическую модель привода с S степенями свободы, показанную на рис. 7.

Система, показанная на рис. 7, будет являться крутильной цепной системой. Крутильной потому, что все диски системы находятся во вращательном движении, а участки упругого вала испытывают деформацию кручения.

Цепной она является потому, что моменты упругих сил, возникающие на участках вала, зависят только от относительных смещений соседних масс (дисков).

Таким образом, в общем случае исходная механическая система привода при определенной совокупности допущений может быть представлена динамической моделью крутильной цепной системы с S степенями свободы.

Связи, наложенные на движение системы в силу принятых допущений, являются удерживающими голономными стационарными и идеальными.

Библиографический список

1. *Вейц В. Л.* Динамика машинных агрегатов. Л.: Машиностроение, 1969. 370 с

2. *Вейц В. Л., Кочура А. Е., Мартыненко А. М.* Динамика машинных агрегатов. Л.: Машиностроение, 1971. 352 с.

3. *Ершов Д. Ю.* Математическое моделирование многомассовых механических систем // Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. трудов IV международной научно-практической конференции / Под ред. Максарова В. В. СПб.:

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2016. Т. III. № 3. С. 31–35.

4. *Ершов Д. Ю., Лукьяненко И. Н.* Применение трехмассовых динамических моделей при исследовании колебательных процессов в электромеханических системах // Современные проблемы теории машин. 2016. № 4. С. 71–74.

5. *Ершов Д. Ю., Лукьяненко И. Н.* Причины возникновения динамических процессов в технологических системах механической обработки // Journal of advanced research in technical science. 2017. № 4. P. 39 – 43.

6. *Ershov D. Y., Zlotnikov E. G., Koboyankwe L. E.* Dynamic processes in technological systems of machining and the nature of their origin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 8. № 87. P. 82016–82016.

7. *Ершов Д. Ю.* Определение собственных частот колебаний трехмассовых динамических систем // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018: сб. тезисов международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2018 г.) / Под ред. Максарова В. В. СПб.: СПбГУ, 2018. С. 25.

8. *Коловский М. З.* Динамика машин. Л.: Машиностроение. 1989. 264 с.

УДК 62-83:621.314:621.382

А. А. Ефимов*
доктор технических наук, профессор
С. Ю. Мельников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА С АЛГОРИТМОМ ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Для трехфазного мостового активного преобразователя тока был подробно рассмотрен алгоритм векторной ШИМ входного тока его полупроводникового коммутатора. В среде MATLAB/Simulink была создана моделирующая программа, позволяющая анализировать динамические и энергетические показатели работы активного преобразователя тока, работающего в режимах выпрямителя и сетевого инвертора. Представлены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: *трехфазный активный преобразователь тока, алгоритм векторной ШИМ, математическое моделирование.*

A. A. Efimov*
Dr. Sc., Tech., Professor
S. Yu. Melnikov*
PhD Sc., Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospase Instrumentation*

SIMULATION OF CURRENT SOURCE CONVERTER WITH SPACE VECTOR PWM ALGORITHM

For a three-phase bridge current source converter, the space vector PWM algorithm of its semiconductor switch current was considered in detail. A simulation program was created in the MATLAB / Simulink environment, which allows analyzing the dynamic and energy performance of a current source converter operating in rectifier and network inverter modes. The results of mathematical modeling are presented.

Keywords: *three-phase current source converter, space vector PWM algorithm, mathematical modeling.*

В настоящее время наиболее актуальным направлением совершенствования устройств силовой электроники является обеспечение электромагнитной и энергетической совместимости полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии с питающими электросетями, особенно автономными. В связи с возрастанием требований к качеству электрической энергии, потребляемой из сети, стали широко применяться различные схемы активных преобразователей. Вопросам исследования режимов работы активных преобразователей, изучения их свойств и возможностей, построения замкнутых систем автоматического управления (САУ), а также применения этих преобразователей в различных электромеханических системах как у нас в стране, так и за рубежом уделялось и уделяется значительное внимание. Однако наиболее широко представлены работы, в которых анализируются принципы построения, математическое описание и системы управления активных преобразователей напряжения, а также электромеханических систем на их основе. Это во многом объясняется тем, что элементная база современных силовых полупроводниковых приборов и специализированных микроконтроллеров ориентирована именно на этот тип преобразователей. Но эти преобразователи имеют и ряд недостатков, таких как пониженная надежность, обусловленная более тяжелыми аварийными режимами в случае выхода силовых ключей из строя и наличием в преобразователе электролитического конденсатора. Именно наличие электролитического конденсатора в звене постоянного тока, имеющего ограничение по допустимой отрицательной температуре, характеризующегося высокими скоростями нарастания напряжения на нем, а также высоким уровнем электромагнитных помех, существенно ограничивает практическое применение этих преобразователей.

Вопросы построения и применения активных преобразователей тока (АПТ), работающих

в режиме источника тока: активных выпрямителей тока – (АВТ) и сетевых инверторов тока – (СИТ), изучения их свойств, математического моделирования режимов работы и синтеза систем управления разработаны в меньшей степени [1–9]. И только в последние годы внимание к этим преобразователям существенно возросло [10–18].

По сравнению с преобразователями напряжения, преобразователи тока обладают существенными преимуществами, такими как простота топологии, компактные размеры, возможность регулирования выпрямленного напряжения в меньшую, по сравнению с неуправляемым выпрямителем, сторону при сохранении возможности регулирования входного коэффициента мощности и превосходную защиту от токов короткого замыкания. АПТ более надежны, так как в звене постоянного тока у них находится дроссель. Существенным преимуществом токовых преобразователей, работающих в инверторном режиме, является возможность увеличения выходного напряжения относительно входного, что не позволяют сделать ни инверторы напряжения, ни матричные преобразователи без дополнительного силового оборудования.

Преобразователи частоты на базе токовых преобразователей имеют более простую схему силовых цепей и обеспечивают возможность формирования практически синусоидального выходного напряжения с минимальными гармоническими искажениями.

Вопросам реализации импульсно-модуляционных алгоритмов управления АПТ и создания их САУ посвящено достаточно много публикаций. Достаточное внимание уделено проблемам их математического моделирования [10, 14–18]. Однако работ, в которых были бы раскрыты особенности разработки алгоритмов управления, представлены схемы их реализации в среде MATLAB/Simulink, а также проведено сравнение различных алгоритмов по получаемым динамическим и энергетическим показателям работы, явно недостаточно.

Цель данной работы заключается в подробном рассмотрении алгоритма векторной ШИМ (ВШИМ) активного преобразователя тока, работающего как в режиме АВТ, так и СИТ, разработке в среде MATLAB/Simulink его имитационной модели и анализе полученных при ее реализации динамических и энергетических показателей работы АПТ.

В работе рассматривается силовая схема трехфазного мостового АПТ, которой соответствует его схема замещения, используемая для моделирования и изображенная на рис. 1 [1–3]. В ней блок полупроводникового коммутатора (ПК) представляет собой трехфазную мостовую схему, реализованную на полностью управляемых ключах с односторонней токовой проводимостью. Каждый ключ реализован либо на GTO-тиристорах, либо на IGB-транзисторах с последовательно включенным диодом. Помимо ПК в состав АПТ входит трехфазный сетевой фильтр с параметрами r_k, l_k, C_k ($k = a, b, c$), емкости которого преобразованы в эквивалентную звезду, а также индуктивный фильтр выпрямленного тока (l_d, r_d). Нагрузка представлена активным сопротивлением $r_{\text{наг.}}$ и противо-ЭДС $E_{\text{наг.}}$, с емкостью $C_{\text{наг}}$. Питается АПТ от трехфазной симметричной сети напряжением 220/380В, частота которого равна 50 Гц. Условно-положительные направления токов силовой схемы АПТ соответствуют режиму работы схемы в качестве АВТ и отражают процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока. В трехфазной мостовой схеме АПТ существует всего девять состояний, когда ток проводят только два ключа (один в анодной, другой в катодной группе) [1–3].

Нумерация ключей стандартная, соответствующая порядку их работы (1, 3, 5 – в катодной, и 4, 6, 2 – в анодной группах). В зависимости от комбинации замкнутых ключей существует шесть ненулевых образующих (пространственных результирующих) векторов входного тока ПК

$$\mathbf{I}_{\text{п}(i)} = \frac{2}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_d e^{j(2i-1)\frac{\pi}{6}}, \quad i = 1\ldots6, \qquad (1)$$

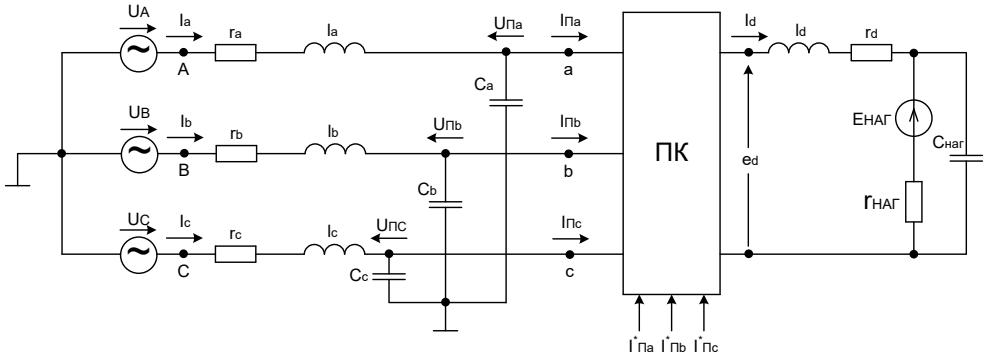


Рис. 1. Схема замещения АПТ в режиме АВТ

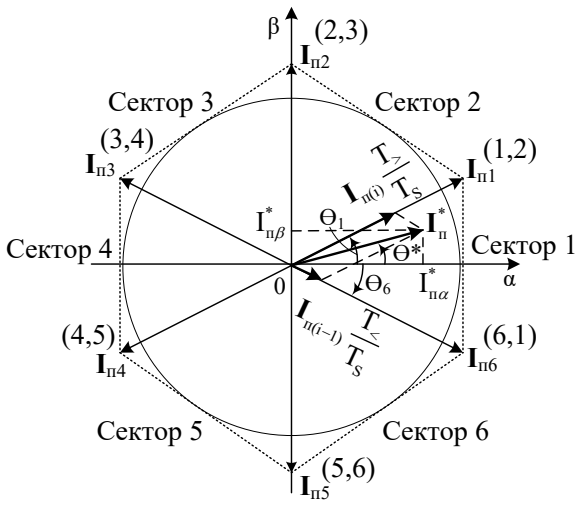


Рис. 2. Вектор задания (задающий вектор) $I_п^*$ и образующие векторы $I_{п(i)}$ (i = 1,2,..,6) АПТ

имеющих неизменную амплитуду, равную $\mathrm{I}=\frac{2}{\sqrt{3}}\mathrm{I}_d$, с фазовыми углами Θ_i, принимающими в неподвижной системе координат α – β дискретные значения: $\Theta_i=(2i-1)\frac{\pi}{6}$, где i = 1...6 – номер сектора, который совпадает с номером конечного в этом секторе образующего вектора входного тока ПК (рис. 2).

Кроме того, в трехфазном АПТ существуют три нулевых образующих вектора входного тока ПК, характеризующих одновременную проводимость ключей в одном из плеч ПК и соответствующих началу координат. Они имеют нулевую амплитуду: $\mathbf{I}_{п(i)}=0,\ \ i=7,8,9.$

Отсчет секторов начинается от вещественной оси α и ведется в направлении, противоположном ходу часовой стрелки. Таким образом, первый сектор расположен в пределах фазового угла $-\frac{\pi}{6}\le\Theta\le\frac{\pi}{6}$. Номера проводящих ключей, при включении которых реализуются соответствующие образующие векторы, показаны около них в круглых скобках. Все девять состояний АПТ, входные токи ПК, образующие векторы и их проекции на оси , выраженные в долях выходного тока I_d, представлены в табл. 1.

В алгоритме ВШИМ АПТ [1–3] среднее значение вектора тока на входе ПК ($I_{ср}$) за период ШИМ (T_s) получается за счет использования двух ненулевых и одного нулевого образующих векторов, находящихся в том же секторе, что и вектор задания, которые в сумме должны быть равны модулю вектора задания $I_п^*$. На рис. 2 в качестве примера показано, что вектор задания $I_п^*$ расположен в первом секторе, соседними ненулевыми образующими векторами являются $I_{п6}$ и $I_{п1}$. Причем первый вектор имеет меньшую фазу, а второй большую фазу по сравнению с фазой вектора задания. В дальнейшем время $T_<$ соответствует времени реализации в любом секторе на периоде ШИМ ненулевого образующего вектора с меньшей фазой (в примере – $I_{п6}$), а время $T_>$ – время реализации на периоде ШИМ ненулевого образующего вектора с большей фазой (в примере – $I_{п1}$). Время T_0 обозначает время реализации нулевого вектора тока. Учитывая, что период ШИМ T_s достаточно мал, $I_п^*$ можно считать практически постоянным в течение этого интервала, а также тот факт, что и $I_{п(i-1)}$ и $I_{п(i)}$ являются постоянными векторами в течение интервала T_s, время реализации среднего на периоде ШИМ вектора входного тока АПТ можно рассчитать по выражению:

$$\begin{gathered}\mathbf{I}_{ср}\cdot T_s=\mathbf{I}_п^*\cdot T_s=\mathbf{I}_{п(i-1)}\cdot T_<+\mathbf{I}_{п(i)}\cdot T_>,\\ T_s=T_<+T_>+T_0.\end{gathered}\qquad(2)$$

В уравнении для периода ШИМ (T_s) кроме времен реализации ненулевых образующих векторов с меньшей фазой ($\mathbf{I}_{п(i-1)}$) и большей фазой ($\mathbf{I}_{п(i)}$) по отношению к фазе вектора задания входит и время реализации нулевого вектора, что обеспечивает равенство среднего на периоде ШИМ вектора входного тока ПК $I_{ср}$ вектору задания $I_п^*$.

Таким образом, в каждом цикле модуляции желаемый вектор тока на входе ПК реализуется за счет перехода между этими тремя состояниями АПТ. Чтобы получить минимальную частоту коммутации силовых ключей ПК, последовательность

Таблица 1

Состояния АПТ, входные токи ПК и образующие векторы

Состояния АПТ	$\mathrm{I}_{пa}$	$\mathrm{I}_{пb}$	$\mathrm{I}_{пc}$	I_{α}	I_{β}	Векторы
1	1	0	–1	1	1/	$\mathbf{I}_{п1}=2/^{j\varpi/6}$
2	0	1	–1	0	2/	$\mathbf{I}_{п2}=2/^{j3\varpi/6}$
3	–1	1	0	–1	1/	$\mathbf{I}_{п3}=2/^{j5\varpi/6}$
4	–1	0	1	–1	–1/	$\mathbf{I}_{п4}=2/^{j7\varpi/6}$
5	0	–1	1	0	–2/	$\mathbf{I}_{п5}=2/^{j9\varpi/6}$
6	1	–1	0	1	–1/	$\mathbf{I}_{п6}=2/^{j11\varpi/6}$
7	0	0	0	0	0	$\mathbf{I}_{п7}=0$
8	0	0	0	0	0	$\mathbf{I}_{п8}=0$
9	0	0	0	0	0	$\mathbf{I}_{п9}=0$

Таблица 2

Образующие векторы, включаемые в различных секторах

Сектор	Образующие векторы с меньшей фазой $\mathbf{I}_{п(i-1)}$ и проводящие ключи, обозначенные 1 (в порядке нумерации)	Образующие векторы с большей фазой $\mathbf{I}_{п(i)}$ и проводящие ключи, обозначенные 1 (в порядке нумерации)	Нулевые векторы и проводящие ключи, обозначенные 1 (в порядке нумерации)
1	$\mathbf{I}_{п6}(1,0,0,0,0,1)$	$\mathbf{I}_{п1}(1,1,0,0,0,0)$	$\mathbf{I}_{п7}(1,0,0,1,0,0)$
2	$\mathbf{I}_{п1}(1,1,0,0,0,0)$	$\mathbf{I}_{п2}(0,1,1,0,0,0)$	$\mathbf{I}_{п9}(0,1,0,0,1,0)$
3	$\mathbf{I}_{п2}(0,1,1,0,0,0)$	$\mathbf{I}_{п3}(0,0,1,1,0,0)$	$\mathbf{I}_{п8}(0,0,1,0,0,1)$
4	$\mathbf{I}_{п3}(0,0,1,1,0,0)$	$\mathbf{I}_{п4}(0,0,0,1,1,0)$	$\mathbf{I}_{п7}(1,0,0,1,0,0)$
5	$\mathbf{I}_{п4}(0,0,0,1,1,0)$	$\mathbf{I}_{п5}(0,0,0,0,1,1)$	$\mathbf{I}_{п9}(0,1,0,0,1,0)$
6	$\mathbf{I}_{п5}(0,0,0,0,1,1)$	$\mathbf{I}_{п6}(1,0,0,0,0,1)$	$\mathbf{I}_{п8}(0,0,1,0,0,1)$

состояний должна быть такой, чтобы переход от одного состояния к другому выполнялся путем переключения только одной фазы преобразователя. Это условие определяет наряду с номерами ненулевых образующих векторов номера и нулевых образующих векторов, включенных в различных секторах. Эти данные представлены в табл. 2. Из них очевидно, что в каждом секторе есть силовой ключ, номер которого совпадает с номером сектора, включающийся на все время прохождения задающего вектора тока через этот сектор.

На практике обычно используют относительные времена реализации образующих векторов, которые получаются из уравнения (2) при делении его обеих частей на T_s. Тогда каждый из трех образующих векторов среднего на периоде ШИМ входного тока ПК реализуется на соответствующих временных интервалах периода ШИМ, для которых должно выполняться следующее условие [1–3]:

$$\tau_{>} + \tau_{<} + \tau_0 = 1, \qquad (3)$$

где $\tau_{<}$. и $\tau_{>}$ – относительные (по отношению к периоду ШИМ T_s) продолжительности реализации образующих ненулевых векторов, углы поворота которых имеют ближайшие меньшее ($\Theta_i^{<}$) и большее ($\Theta_i^{>}$) значения по сравнению с углом поворота задающего вектора тока (Θ^*); τ_0 – относительная (по отношению к периоду ШИМ) продолжительность реализации нулевого вектора тока.

Относительные продолжительности реализации образующих ненулевых векторов рассчитываются по следующим выражениям [1–3]:

$$\tau_{<} = \frac{\mathrm{I}_{п}^*}{\mathrm{I}} \frac{\sin(\Theta_i^{>} - \Theta^*)}{\sin\delta}; \qquad (4)$$

$$\tau_{>} = \frac{\mathrm{I}_{п}^*}{\mathrm{I}} \frac{\sin(\Theta^* - \Theta_i^{<})}{\sin\delta}, \qquad (5)$$

где Θ^* – значение фазы вектора задания фазных токов на силовом входе ПК; $I_{п}^*$ – модуль вектора задания (задающего вектора) тока на входе ПК; $\mathrm{I} = \frac{2}{\sqrt{3}}\mathrm{I}_d$ – модуль ненулевых образующих векторов входного тока ПК; . δ . – угол между соседними образующими векторами, который в данном алгоритме управления равен $\frac{\pi}{3}$.

Отношение модуля вектора задания к току $\mathrm{I}_{d\max} = \mathrm{I}\sin\delta$. в дальнейшем изложении рассматривается как коэффициент модуляции по амплитуде K_{μ}, который определяется следующим соотношением:

$$0 \le K_{\mu} = \frac{\mathrm{I}_{п}^*}{\mathrm{I}_{d\max}} \le 1. \qquad (6)$$

Из выражения (6) следует, что для того, чтобы модулятор образующего вектора АПТ функционировал в линейном режиме, необходимо, чтобы модуль вектора задания не превышал максимальной величины выпрямленного тока. В реальных САУ АПТ задание на величину модуля задающего вектора тока на входе ПК АПТ поступает с выхода регулятора выпрямленного тока и в переходных режимах работы может превышать максимальное значение выпрямленного тока $I_{d\max}$. При этом коэффициент модуляции превышает 1, что соответствует переходу АПТ в режим сверхмодуляции [10].

Основная задача модулятора АПТ состоит в том, чтобы вычислить требуемые относительные продолжительности реализации образующих векторов ($\tau_{<}$, $\tau_{>}$, и τ_0) непосредственно по проекциям вектора задания на оси неподвижной координатной системы $\alpha - \beta$ ($\mathrm{I}_{п\alpha}^*$ и $\mathrm{I}_{п\beta}^*$), сформировать импульсы управления необходимой длительности для силовых ключей ПК и распределить их по соответствующим ключам в зависимости от текущего сектора, в котором находится вектор задания (рис. 2). Общее соотношение между $\mathrm{I}_{п\alpha}^*$, $\mathrm{I}_{п\beta}^*$ и необходимыми относительными продолжительностями реализации образующих векторов ($\tau_{<}$, $\tau_{>}$, и τ_0), которое справедливо для всех секторов (i = 1...6), может быть получено из уравнений (1), (2) и [10]:

$$\begin{bmatrix} \tau_{<} \\ \tau_{>} \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathrm{I}_d} \times \begin{bmatrix} \sin(2i-1)\cdot\frac{\pi}{6} & -\cos(2i-1)\cdot\frac{\pi}{6} \\ -\sin(2i-3)\cdot\frac{\pi}{6} & \cos(2i-3)\cdot\frac{\pi}{6} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathrm{I}_{п\alpha}^* \\ \mathrm{I}_{п\beta}^* \end{bmatrix}; \qquad (7)$$

$$\tau_0 = 1 - \tau_{<} - \tau_{>}. \qquad (8)$$

Следует отметить, что в разрабатываемом алгоритме управления проекции вектора задания ($I^*_{п\alpha}$ и $I^*_{п\beta}$) являются дискретными функциями времени, дискретизируемыми с тактовой частотой ШИМ $f_s=1/T_s$.

Представленные выражения (4), (5), (7) и (8) образуют алгоритм модуляции АПТ, который определяет продолжительности реализации образующих векторов в зависимости от величины и дискретности перемещения вектора задания $I^*_п$ в пределах любого сектора.

Кроме алгоритма модуляции в алгоритме ВШИМ существуют различные последовательности реализации образующих векторов на периоде ШИМ, которые образуют алгоритм переключения. В работе рассматривается простейший алгоритм переключения, при котором относительные длительности реализации образующих векторов подчиняются последовательности: $\tau_<$, $\tau_>$, τ_0. Дальнейшая реализация образующих векторов на последующих периодах ШИМ циклически повторяется в той же самой последовательности.

На основе анализа выражений (7) и (8) была создана табл. 3, в которой представлена информация о временах включения на периодах ШИМ всех силовых ключей ПК, реализующих как ненулевые, так и нулевые образующие векторы входного тока ПК в каждом из секторов. Например, первый ключ (S1), как это было отмечено в табл. 2, в первом секторе включен постоянно, чему соответствует равное единице относительное время его включенного состояния на всех периодах ШИМ этого сектора. Во втором секторе первый ключ включается на периоде ШИМ первым на время $\tau_<$, в четвертом секторе – последним на время τ_0, а в шестом секторе – вторым на время $\tau_>$. В остальных секторах этот ключ не включается. Второй ключ (S2) повторяет эту же последовательность переключения со сдвигом по фазе на 60 градусов, что соответствует длительности реализации одного сектора. Остальные ключи повторяют ту же самую последовательность переключения с тем же фазовым сдвигом в 60 градусов относительно предшествующего (по номеру) ключа.

Для рассмотренного выше алгоритма ВШИМ АПТ, блок которого на схеме моделирования обозначен как SVCSC, была реализована схема набора модели в среде MATLAB/Simulink, представленная на рис. 3. Тактовая частота ВШИМ АПТ была принята равной $f_s = 1/T_s = 1{,}8$ кГц.

Таблица 3

Относительные времена включения ключей ПК на периоде ШИМ в различных секторах

Силовые ключи	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 5	Сектор 6
S1	1	$\tau_<$	0	τ_0	0	$\tau_>$
S2	$\tau_>$	1	$\tau_<$	0	τ_0	0
S3	0	$\tau_>$	1	$\tau_<$	0	τ_0
S4	τ_0	0	$\tau_>$	1	$\tau_<$	0
S5	0	τ_0	0	$\tau_>$	1	$\tau_<$
S6	$\tau_<$	0	τ_0	0	$\tau_>$	1

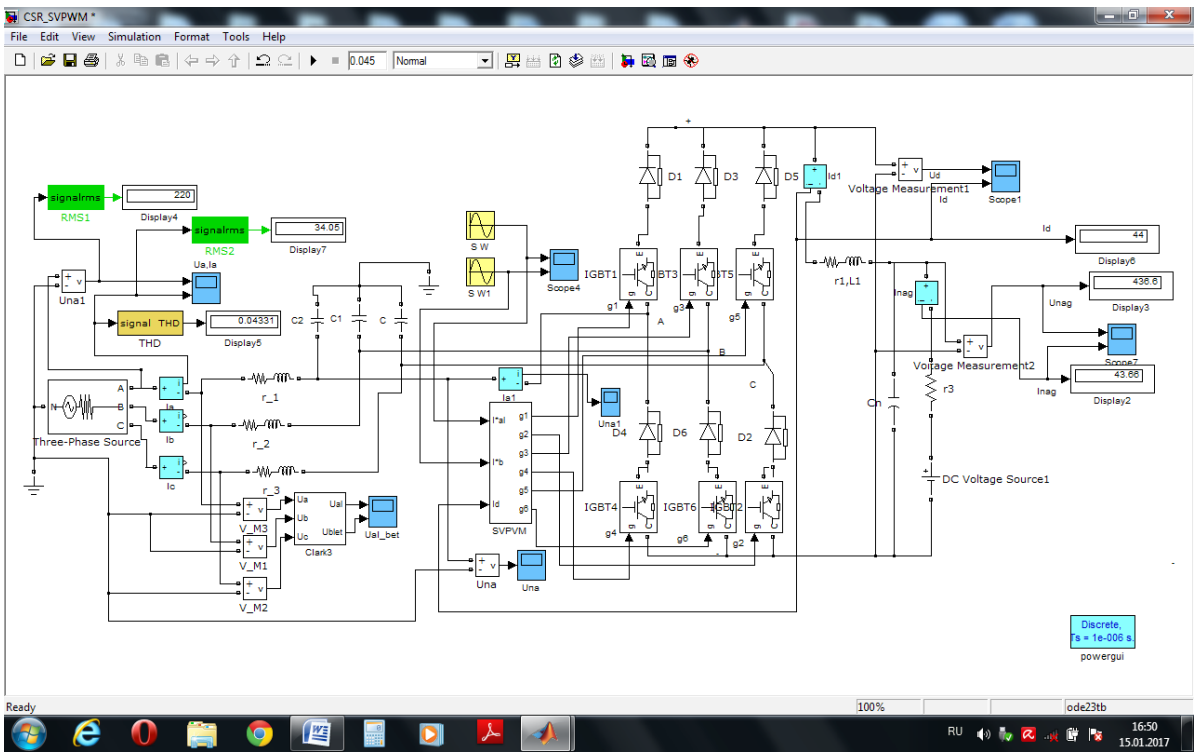


Рис. 3. Схема моделирования в среде MATLAB/Simulink

Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: фазное напряжение сети U_c = 220 В; частота f = 50 Гц; параметры сетевого фильтра: r_k = 0,5 Ом, l_k, = 0,045 Гн, C_k = 30,0 мкФ (звезда), (k = a, b, c). Параметры выходного дросселя: r_d = 0,1 Ом, l_d = 0,09 Гн. Емкость конденсатора в цепи нагрузки $C_{\text{наг.}}$ = 50мкФ. Мощность нагрузки $P_{\text{наг}}$ = 19,062 кВт, сопротивление нагрузки $r3 = r_{\text{наг.}}$ = 10 Ом, $E_{\text{наг.}}$ = 0 В.

Импульсы управления силовыми ключами ПК в порядке их нумерации представлены на рис. 4.

Осцилограммы сетевого напряжения фазы А и соответствующего фазного тока, полученные при моделировании режима подключения к питающей сети АПТ, работающего в режиме выпрямителя, приведены на рис. 5.

Осцилограммы выпрямленного напряжения и тока нагрузки в этом же режиме работы представлены на рис. 6.

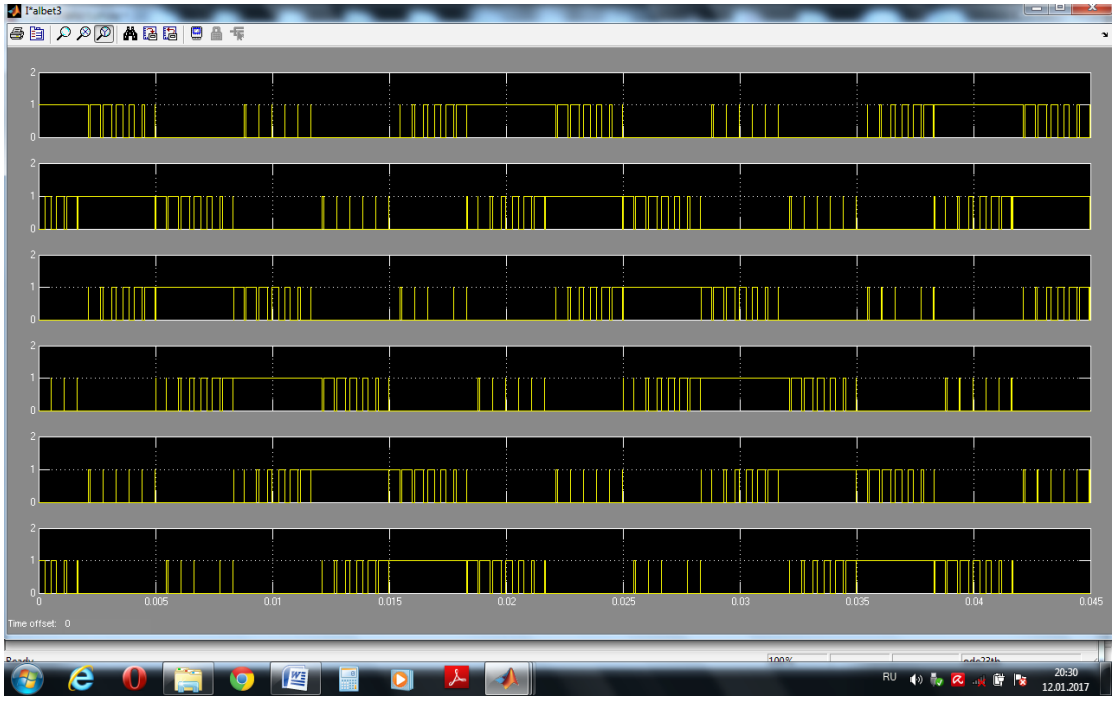


Рис. 4. Импульсы управления силовыми ключами ПК

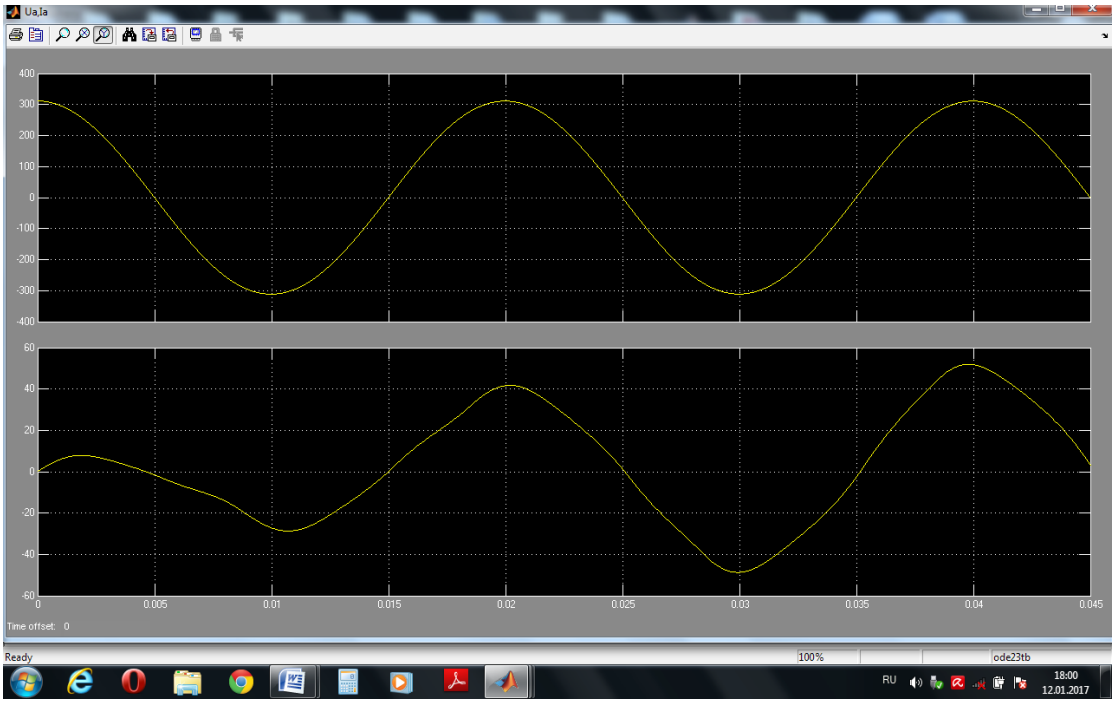


Рис. 5. Напряжение и ток фазы А в режиме АВТ при его подключении к сети

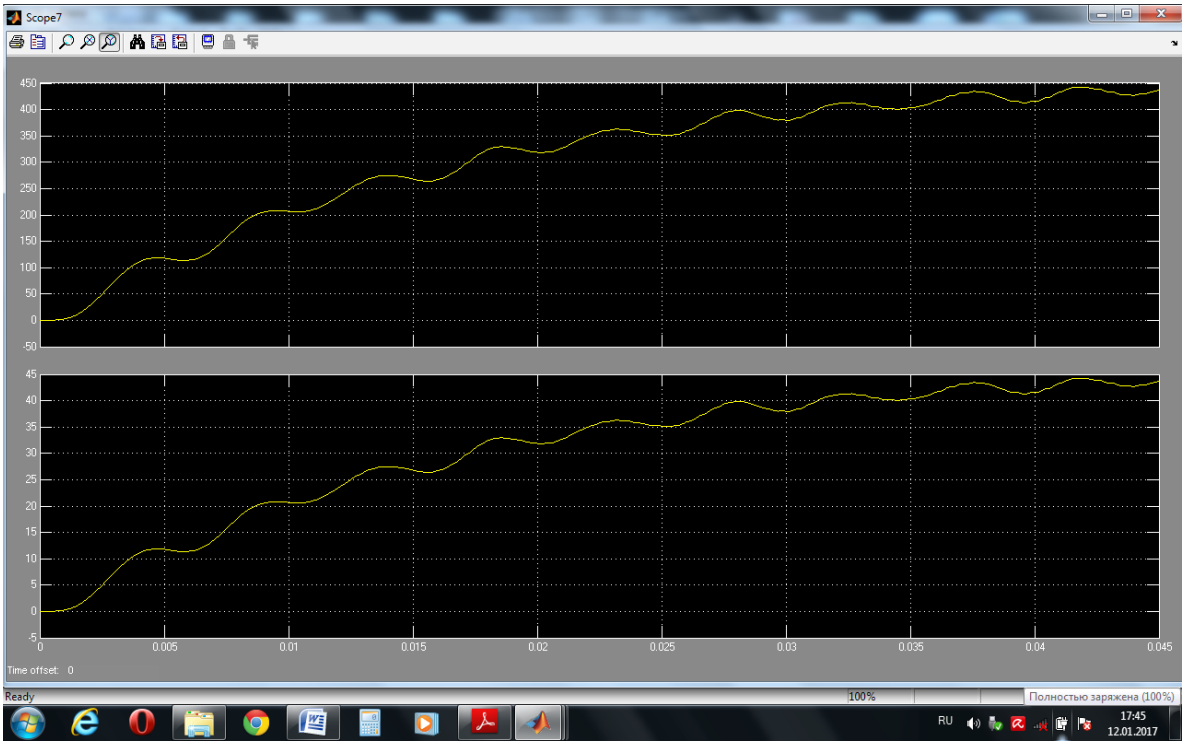


Рис. 6. Напряжение и ток нагрузки АВТ при его подключении к сети

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно хороших энергетических показателях работы АВТ с анализируемым алгоритмом ВШИМ. КПД активного выпрямителя в установившемся режиме работы $\eta = 84{,}82\%$, коэффициент гармоник сетевого тока $K_{г} = 4{,}33\%$, коэффициент сдвига сетевого тока относительно сетевого напряжения $K_{сдв} = 1{,}0$.

Однако из-за наличия сетевого фильтра, обладающего высокой добротностью, выпрямленное напряжение и ток характеризуются выраженной колебательностью.

По сравнению с алгоритмом синусоидальной ШИМ (СШИМ) [1–3, 18], алгоритм ВШИМ обладает большими по величине коэффициентами передачи по напряжению (ВШИМ – 2,12; СШИМ – 1,84), по току (ВШИМ – 1,0; СШИМ – 0,866) и в два раза лучшим коэффициентом гармоник сетевых токов (ВШИМ – 4,33%; СШИМ – 8,73%).

Как это было показано в [1–3], для алгоритма СШИМ устранение колебаний входных и выходных переменных АПТ при одновременном регулировании выпрямленного тока (напряжения) и сетевого коэффициента мощности требует разработки векторных САУ. Увеличение активных сопротивлений сетевых фильтров не целесообразно, поскольку это приводит к ухудшению КПД преобразователя. Поэтому единственным действенным способом устранения возникающих колебаний является введение демпфирующих обратных связей по производным сетевых токов, действие которых эквивалентно увеличению активных сопротивлений сетевых фильтров.

Разработанная модель позволяет также анализировать работу схемы АПТ в режиме сетевого инвертора тока (СИТ). Однако, в отличие от схемы активного преобразователя напряжения (АПН), в схеме АПТ переход из выпрямительного в инверторный режим более сложен. В АПН перевод схемы из выпрямительного в инверторный режим происходит наиболее просто, так как благодаря двухсторонней токовой проводимости каждого силового ключа при изменении направления тока нагрузки, при постоянной полярности выходного напряжения схема автоматически переходит в инверторный режим без изменения алгоритма управления.

В схеме АПТ для перехода из выпрямительного в инверторный режим требуется, во-первых, изменение знака и величины противоЭДС в цепи нагрузки при сохранении направления постоянного тока и, во-вторых, изменение алгоритма управления. В разработанной модели это изменение алгоритма управления может быть реализовано путем скачкообразного изменения на 180 градусов фазы задающего вектора тока I_{n}^{*}. Однако при этом необходимо одновременно изменить в алгоритме модуляции (7) и номера секторов таким образом, чтобы их номера совпадали с номерами ключей анодной группы в каждом из плеч ПК (4 взамен 1), (6 взамен 3) и (2 взамен 5) (рис. 2). Более просто перевести АПТ в режим СИТ за счет сдвига импульсов управления силовыми ключами АВТ на половину периода напряжения сети, что и было сделано в работе.

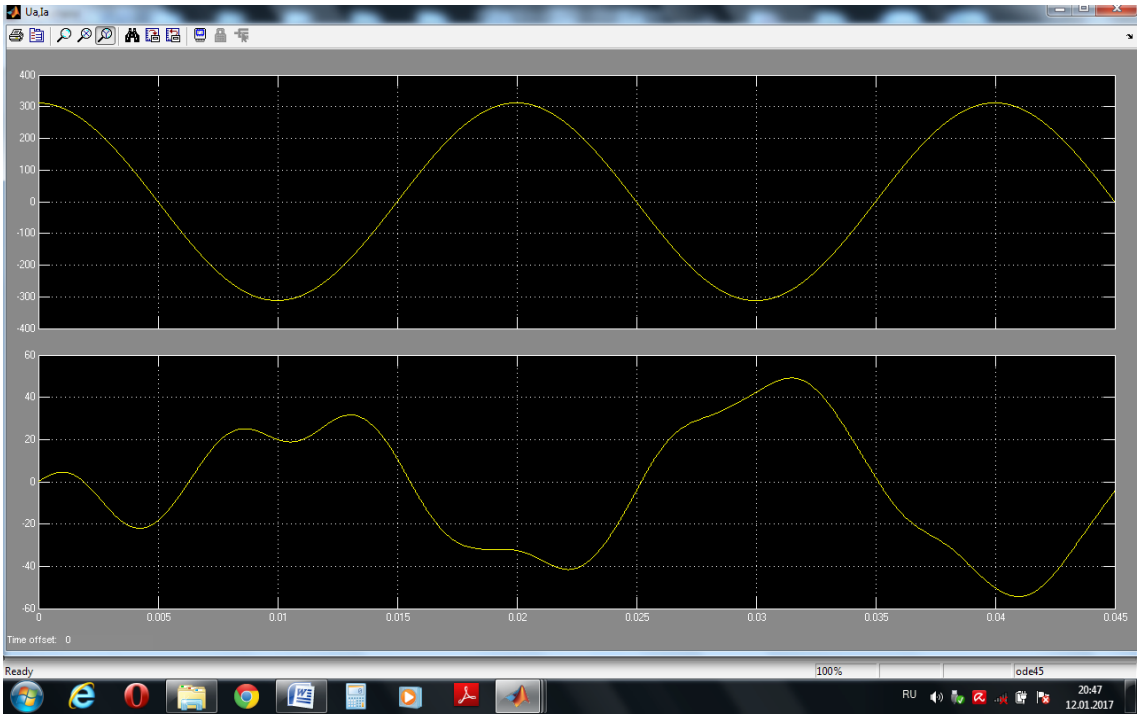


Рис. 7. Напряжение и ток фазы А в режиме СИТ при его подключении к сети

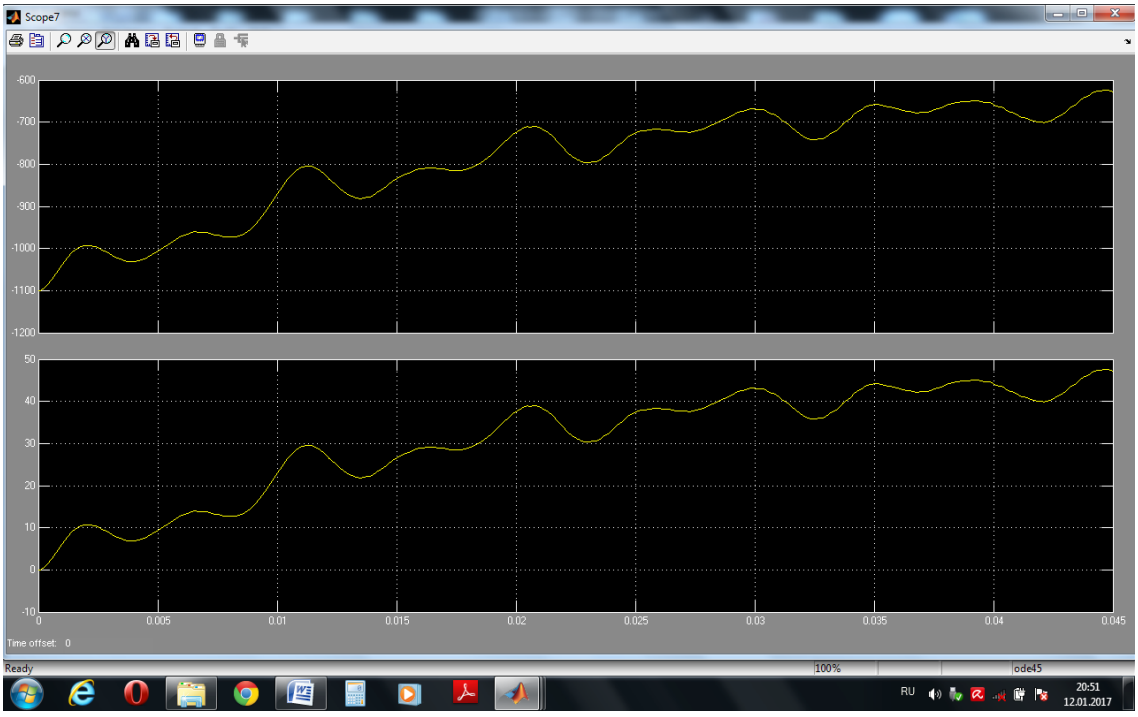


Рис. 8. Напряжение и ток на входе СИТ при его подключении к сети

Процессы в питающей сети и в цепи постоянного тока СИТ при его подключении к сети примерно при тех же величинах токов, что в режиме АВТ, представлены на рис. 7 и 8.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при всех прочих равных условиях, по сравнению с режимом АВТ, в режиме СИТ ухудшаются как энергетические, так и динамические показатели его работы. В режиме СИТ КПД $\eta = 77{,}65\%$, коэффициент гармоник сетевого тока $K_{г} = 12{,}58\%$, коэффициент сдвига сетевого тока относительно сетевого напряжения $K_{сдв.}$ 1,0, а входные напряжение и ток характеризуются еще большей колебательностью. Это еще раз подтверждает необходимость создания векторной САУ АПТ.

Заключение

1. По сравнению с алгоритмом синусоидальной ШИМ [1–3], алгоритм векторной ШИМ об-

ладает большими по величине коэффициентами передачи по напряжению (ВШИМ – 2,12; СШИМ – 1,84), по току (ВШИМ – 1; СШИМ – 0,866) и меньшим в два раза коэффициентом гармоник токов питающей сети (ВШИМ – 4,33%; СШИМ – 8,73%).

2. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о достаточно хороших энергетических и не вполне удовлетворительных динамических показателях работы АПТ с алгоритмом ВШИМ как в режиме АВТ, так и в режиме СИТ, что вызывает необходимость разработки и создания для АПТ с анализируемым алгоритмом векторной САУ АПТ, для которой за основу может быть взята векторная система автоматического управления для АВТ с алгоритмом СШИМ [1–3], что позволит улучшить во вновь создаваемой векторной САУ динамические показатели работы АПТ.

Библиографический список

1. *Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: НГТИ, 2001. 250 с.

2. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И.* Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.

3. *Shreiner R., Efimov A., Kalygin A.* Active Current Converter Mathematical Model. 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC-2000). 5–7 September 2000, Proceedings, Kosice, Slovakia. 2000. Vol. 2. P. 188–193.

4. *Doval-Gandoy J., Castro C., Penalver C.* Dynamic and Steady – State Analysis of a Three Phase Buck Rectifier. Proceeding 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC-2000). 5–7 September 2000, Koshice, Slovac Republic. 2000. Vol. 2. P. 134–137.

5. *Pires V., Fernando Silva J.* Sliding Mode Current Controller for Three – Phase Single – State AC/DC Buck – Boost Converters. Proceeding 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC-2000). 5–7 September 2000, Koshice, Slovac Republic. 2000. Vol. 2. P. 151–156.

6. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, Г. С. Зиновьев и др. // Электротехника. 2004. № 10. С. 43–50.

7. *Wiseman J.* Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 52, N 3, June 2005.

8. *Ефимов А. А., Мухаматшин И. А.* Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 4. С. 91–112.

9. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухаматшин И. А.* Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты // Электротехника. 2005. № 9. С. 47–53.

10. *Adzic M., Adzic E., Katic V.* Space Vector Modulated Three-Phase Current Source Converter for DC Motor Drive. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMS 2010), Macedonia, 2010. P. 52–59.

11. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями в составе электромеханических систем // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: научн. журнал. СПб.: ГУАП, 2012. Вып. 2. С. 58–67.

12. *Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы: научн. журнал. СПб.: ГУАП, 2014. № 4. С. 48–53.

13. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями тока // Завалишинские чтения'14. СПб.: ГУАП, 2014. С. 61–67.

14. *Волков А. Г.* Многозонные электронные конверторы для автономных систем генерирования электрической энергии. Автореф. дисс... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2016. 21 с.

15. *Ефимов А. А.* Системы релейного управления активным выпрямителем тока // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 51–62.

16. *Ефимов А. А.* Моделирование системы управления в скользящем режиме активным преобразователем тока // Информационно-управляющие системы: научный журнал. СПб.: ГУАП, 2018. № 2. С. 49–59.

17. *Шавёлкин А. А.* Активный выпрямитель тока для высоковольтных преобразователей частоты с автономным инвертором тока // Сб. научных трудов Донбасского государственного технического университета. Алчевск: ДонГТУ, 2013. Вып. 39. С. 241–249.

18. URL: https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62372-three-phase-spwm-buck-rectifier // Amit Kumar Singh (National University of Singapore).

УДК 621.313.126

Д. В. Кукушкин*
ведущий инженер-конструктор, аспирант
**Институт электрофизики и электроэнергетики РАН ПАО «Силовые машины»*

РАЗВИТИЕ БЕСЩЕТОЧНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН

В статье рассмотрены основные этапы развития статических и бесщеточных возбудителей начиная с появления в 60-х годах XX века до современного уровня.

Ключевые слова: *система возбуждения, вращающийся возбудитель.*

D. V. Kukushkin*
Lead Engineer Designer, PhD Student
**Institute of Electrophysics and electric power of RAS PJSC “Power machines”*

EVOLUTION OF BRUSHLESS EXCITERS OF SYNCHRONOUS MACHINES

The article presents the main evolution stages of static and brushless exciters since the appearance in the 60th years of the XX century to the modern level.

Keywords: *excitation system, rotating exciter.*

Введение

На протяжении всего XX и начала XXI века развитие мировой промышленности связано с возрастающими потребностями в электроэнергии, главным потребителем которой являются асинхронные и синхронные электромашинные преобразователи энергии, влекущее за собой ввод в эксплуатацию новых электростанций различных типов, в том числе работающих на возобновляемых источниках энергии. Однако основными источниками электроэнергии переменного тока по-прежнему являются электрические машины – синхронные генераторы тепло-, гидро- и атомных электростанций – и согласно прогнозам Международного энергетического агентства, показанным на рис. 1, такая ситуация сохранится до 2040 года [1].

Развитие генераторостроения характеризуется значительным замедлением роста единичной мощности турбо- и гидрогенераторов в конце XX века и увеличением числа работ, посвященных анализу причин отказов и их последствий [2], что коррелируется с требованиями электрогенерирующих организаций по сокращению времени вынужденных простоев, обусловленных профилактическими и ремонтными работами. Одним из способов повышения надежности генераторов является применение вращающегося

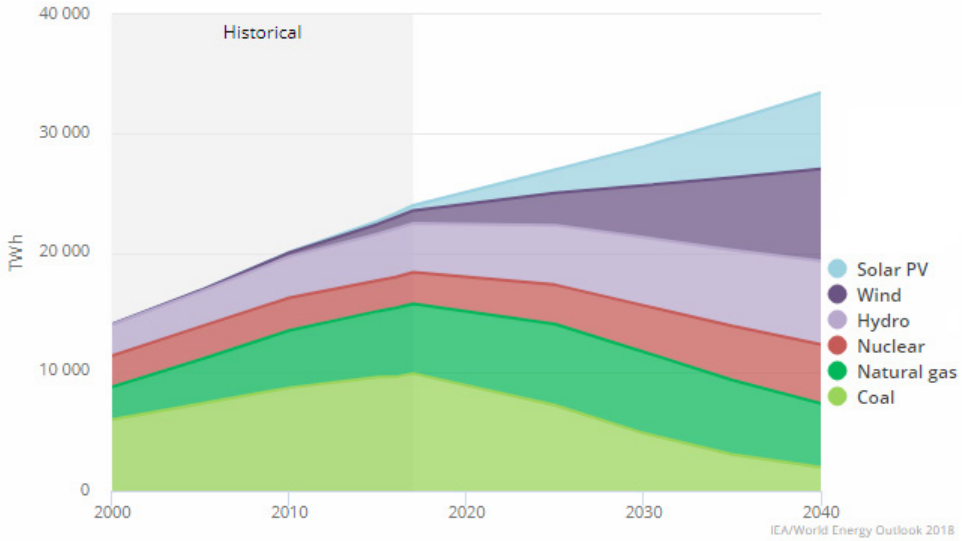


Рис. 1. Прогноз выработки электроэнергии различными технологиями

бесщеточного возбудителя, который позволяет отказаться от дорогостоящего в обслуживании щеточного контакта, предназначенного для передачи тока возбуждения поля ротора от статической системы возбуждения [3–5].

Бесщеточный возбудитель представляет собой обращенную электрическую машину, якорь которой закреплен на вале генератора и питает обмотку возбуждения генератора через вращающийся полупроводниковый выпрямитель. Вращающийся выпрямитель представляет собой управляемый или неуправляемый шестипульсный выпрямитель с несколькими параллельными полупроводниковыми приборами в плече, каждый из которых защищается быстродействующими предохранителями [4].

В настоящее время бесщеточные возбудители в основном устанавливаются на турбогенераторах высокой мощности [4, 6, 7], где ток возбуждения в номинальном режиме достигает нескольких килоампер, а при форсировке может превышать десять килоампер, так как щеточный контакт на такие токи крайне сложен в изготовлении и обслуживании. В последние годы наметилась тенденция установки управляемых и неуправляемых бесщеточных возбудителей на низкооборотные гидрогенераторы [8, 9], что, с одной стороны, повышает надежность генератора за счет исключения щеточного контакта, а с другой – обеспечивает высокое быстродействие за счет применения управляемых полупроводниковых приборов во вращающемся выпрямителе [5].

Развитие статических систем возбуждения с управляемыми ионными преобразователями

Системы возбуждения с управляемыми полупроводниковыми преобразователями разрабатывались и применялись еще в 30-х годах XX века, но широкое распространение получили уже начиная с 50-х годов. В СССР работы по исследованию систем возбуждения с управляемыми преобразователями велись во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина, Киевском индустриальном институте, Московском энергетическом институте и др. [3].

В СССР и за рубежом был опубликован ряд работ об исследованиях синхронных машин разной мощности с управляемыми ртутными выпрямителями [10–12], которые повлекли за собой массовое внедрение систем ионного возбуждения в Советском Союзе, занявшего лидерские позиции в этой тематике [3]. Это позволило впоследствии накопить необходимый опыт для создания тиристорных систем возбуждения.

С развитием энергосистемы и ростом единичной мощности турбо- и гидроагрегатов в конце 50-х – начале 60-х годов в СССР возникла необходимость в переходе с электромашинных возбудителей постоянного тока на ионные системы возбуждения, которые обладали высоким быстродействием и сильным регулированием. Эти преимущества повышали статическую и динамическую устойчивость [13] и позволяли интенсивно демпфировать качания роторов синхронных машин в послеаварийных режимах, а также форсировать возбуждение при просадках напряжения во время аварийных режимов в течение нескольких десятков секунд, позволяющие оперативному персоналу принять необходимые меры для ликвидации аварии. В СССР системы ионного возбуждения были разработаны для ряда турбо- и гидрогенераторов мощностью до 500 МВт, а в США, ФРГ и Швейцарии системы ионного возбуждения разработаны для турбогенераторов мощностью от 50 до 220 МВА.

Однако, несмотря на десятилетия работ в области физики газового разряда, не удалось создать надежные, компактные и недорогие вентили как кремниевые полупроводниковые приборы, выпускаемые мировыми производителями и в настоящее время. В связи с этим с конца 60-х годов выпускаются статические системы возбуждения только с кремниевыми полупроводниковыми приборами.

Развитие статических систем возбуждения с кремниевыми преобразователями

Структура статической системы возбуждения (рис. 2) с конца 60-х годов не претерпела значительных изменений. Силовой полупроводниковый преобразователь питается от трансформатора возбуждения TE или от вспомогательного генератора. Автоматический регулятор возбуждения AVR регулирует напряжение на выводах генератора и управляет полупроводниковым преобразователем. В случае нештатных ситуаций предусмотрен автомат гашения поля и разрядное сопротивление.

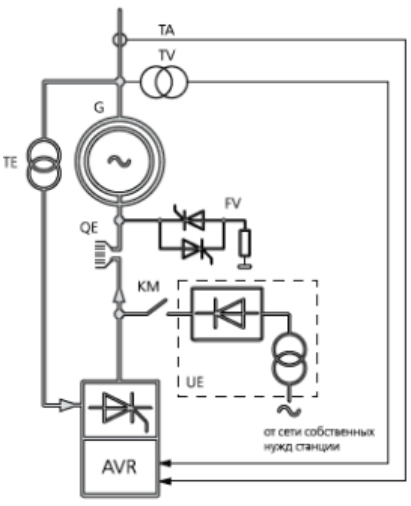


Рис. 2. Структура системы возбуждения

Дальнейшее развитие силовой части систем возбуждения следовало за развитием силовой электроники. Кремниевые тиристоры, которые на сегодняшний день остаются самыми надежными и полупроводниковыми вентилями и выделяют наименьшее количество потерь, позволяют отказаться от последовательного, а в последнее десятилетие и от параллельного соединения тиристоров, что позволило значительно уменьшить массогабаритные показатели систем возбуждения.

Следующей вехой в развитии систем возбуждения стала замена дорогих, громоздких и ненадежных аналоговых автоматических регуляторов цифровыми [14], которые позволяют быстро и точно производить наладку системы. Этот процесс стартовал в 80-е годы в Европе, Азии и Америке, но затянулся в СССР из-за отсутствия необходимых комплектующих и нашел широкое применение уже в конце 90-х годов XX века [15].

Применение микропроцессорной техники позволило реализовать в статических системах возбуждения дополнительные функции, такие как динамическое распределение токов среди параллельных тиристоров [16], систему контроля вращающихся диодов бесщеточных выпрямителей для мощных турбогенераторов, устройства защиты и автоматики генератора и системы возбуждения [17].

Важным недостатком статических систем возбуждения, как уже отмечалось ранее, является наличие щеток и контактных колец на роторе [18]. Для мощных турбогенераторов с номинальными токами возбуждения около 10 кА изготовление щеточного контакта и его обслуживание является сложной и дорогостоящей задачей. Современный бесщеточный возбудитель для гидрогенераторов и крупных турбогенераторов позволит значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить надежность всего агрегата в целом.

Бесщеточные возбудители синхронных машин

Основное преимущество бесщеточных систем возбуждения – это отсутствие щеток и контактных колец, которые требуют постоянного обслуживания [3]. Применение вращающегося выпрямителя позволяет сделать наиболее компактную и экономически привлекательную систему возбуждения.

Идея создание бесщеточного возбудителя была впервые высказана О. Ирион в 1927 году [19]. Впоследствии многочисленные исследования проводились в СССР и за рубежом. В 60-х годах фирма Westinghouse разработала возбудитель для турбогенератора 50 МВА 3600 об./мин [20]. Обращенный трехфазный генератор подключен к вращающемуся выпрямительному блоку, собранному по мостовой схеме с двумя последовательными и тремя параллельными кремниевыми диодами в плече. Защита диодов осуществлялась быстродействующими предохранителями. Регулирование происходило с помощью изменения тока возбуждения неподвижного индуктора с помощью статической системы возбуждения.

В 70-х годах опыт Westinghouse был использован фирмой Siemens (Германия) для генераторов 1600 МВА с номинальных токов возбудителя 12 кА, Alstom (Франция) для генераторов 1000 МВт и другими ведущими мировыми производителями мощных генераторов.

В СССР работа над бесщеточным возбудителем началась несколько позднее с бесщеточного возбудителя для турбогенератора ТВВ-320-2 ЛПЭО «Электросила» и ВНИИэлектромаш, на котором были проверены технические решения для создания возбудителей для турбогенераторов мощностью 500, 1000 и 1200 МВТ. Созданы кремниевые диоды, рассчитанные на большие ускорения до значений 7000–8000g, а для упрощения конструкции возбудителя были изготовлены диоды с нормальным p-n переходом и обратным n-p.

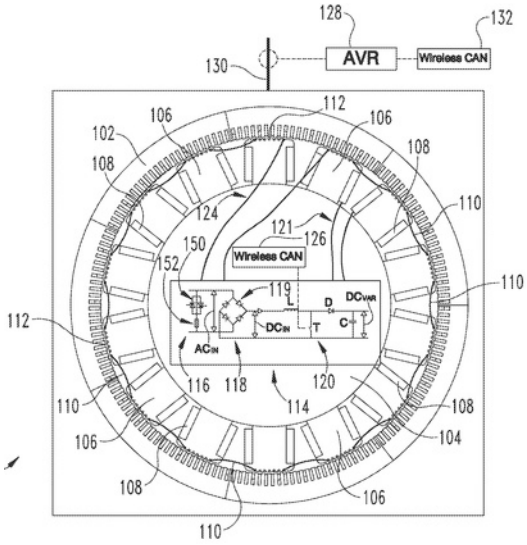
С увеличением мощности генератора с бесщеточным возбудителем ужесточаются требования по его надежности. В турбогенераторах ТВВ-500-2, ТВВ-100-4 и ТВВ-1200-2 с бесщеточными возбудителями применили и установили защитные кольца, которые подключены к устройству защиты от перенапряжений, защищают обмотку возбуждения бесщеточного генератора от перенапряжений.

В системах бесщеточного возбуждения используется устройство контроля вращающегося выпрямителя УКВВ-М [17], позволяющее проводить постоянный контроль целостности быстродействующих предохранителей в ветвях вращающегося выпрямителя.

Важной проблемой является повышение быстродействия бесщеточных возбудителей, решение которой могло бы позволить применить АРВ сильного действия. Быстродействующая бесщеточная система возбуждения для мощных турбогенераторов с вращающимися тиристорными блоками впервые была создана в СССР [3] ВНИИэлектромаш и ЛПЭО «Электросила». Промышленный образце данного возбудителя для ТВВ-320-2 был разработан и испытан [21], но широкого распространения не получил.

Не менее важной проблемой является гашение поля генератора с бесщеточным возбудителем [22], так как в цепи ротора генератора нет коммутационной аппаратуры, которая могла бы быстро погасить поле в случае нештатной ситуации. В 2013 году в Мадридском Политехническом институте было произведено эксперимен-

а)



б)

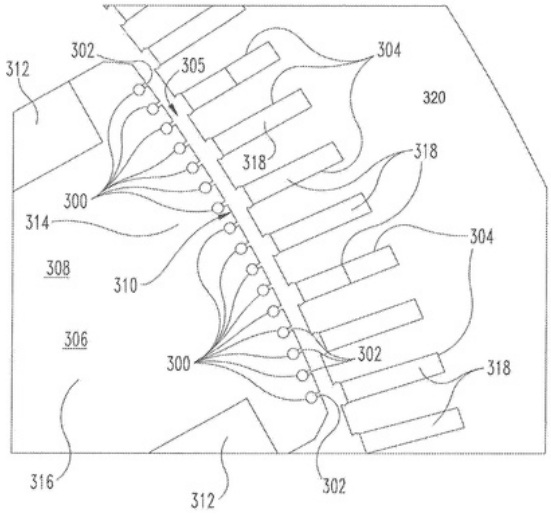


Рис. 3. Безвозбудительная синхронная машина:
а – общий вид; б – полюс ротора

тальное включение мощного IGBT транзистора, шунтирующего разрядный резистор в цепи обмотки возбуждения [23], благодаря которому при обнаружении аварии снимается напряжение с возбудителя, IGBT запирается и ток возбуждения генератора начинает протекать через разрядный резистор, что позволяет быстро погасить генератор.

Другим интересным направлением в последние годы занимается группа ученых из разных стран – это управляемые тиристорные бесщеточные возбудители для гидрогенераторов. Управляющее воздействие на тиристоры передается с помощью Bluetooth [24] (решение, предлагаемое Voith Hydro). Такие системы позволят в будущем строить гидроэлектростанции с минимальным количеством операционного персонала.

Наибольший интерес представляет собой так называемая безвозбудительная синхронная машина, предлагаемая в 2015 году ABB [25]. Это решение позволяет отказаться от отдельно стоящего возбудителя и расположить его в бочке ротора, что уменьшит массу машины на 2%, а длину вала на 20%. Помимо этого для возбуждения машины не требуется трансформатора, отдельно стоящего полупроводникового преобразователя и самого возбудителя на валу.

Обмотка возбудителя располагается на полюсах ротора (рис. 3, б, поз. 300), питается от индуцируемых в воздушном зазоре гармоник и питает обмотку возбуждения машины (рис. 3, б, поз. 312) через управляемый автоматическим регулятором полупроводниковый преобразователь по беспроводному протоколу Wireless CAN (рис. 3, а, поз. 128).

Заключение

Несмотря на бурное развитие возобновляемой энергетики в мире и в Российской Федерации, основным источником электроэнергии остаются синхронные генераторы, к которым будут предъявляться все более жесткие требования по стоимости, эффективности и надежности. Те же требования предъявляются и к системам возбуждения, в развитие которых наблюдаются следующие тенденции:

– увеличение единичной мощности полупроводниковых приборов приводит к увеличению единичной мощности выпрямителей систем возбуждения и постепенному отказу от параллельного соединения тиристоров;

– в системах возбуждения появляются дополнительные функции, такие как защита генератора и его диагностика;

– применение управляемых бесщеточных возбудителей для возбуждения гидрогенераторов;

– отказ от машин с традиционным бесщеточным возбудителем в пользу безвозбудительных машин.

Библиографический список

1. World Energy Outlook 2018. URL: https://www.iea.org/weo (дата обращения: 27.12.2018).

2. *Глебов И. А., Данилевич Я. Б.* Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.

3. *Глебов И. А.* Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1979. 316 с.

4. *Глебов И. А.* Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1988. 332 с.

5. *Nøland J. K.* A New Paradigm for Large Brushless Hydrogenerators, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy 2017.

6. Alstom. GIGATOP 4-pole hydrogen and water-cooled turbogenerator for nuclear power 2013. URL: https://www.electricityconnect.com/upload_fichier/1439991723_alstom_gigatop-4-pole-hydrogen-and-water-cooled-turbogenerator.pdf (дата обращения: 26.12.2018).

7. BRUSH Turbogenerators. DAX 2-Pole Turbogenerators. URL: https://www.brush-sem.cz/soubory/DAX.pdf (дата обращения: 25.12.2018).

8. Alstom. Brushless Exciter for Hydro Generators 2011. URL: https://docplayer.net/20868199-Brushless-excitation-for-hydro-generators.html (дата обращения: 26.12.2018).

9. GE Energy. Synchronous Hydro Generators // Hydro Power Conversion. 2011. URL: https://www.gepowerconversion.com/sites/gepc/files/product/Hydro% 20Generator% 20Brochure.pdf (дата обращения: 25.12.2018).

10. *Шепфер К. И., Юдицкий С. Б.* Возбуждение синхронных машин от ионных выпрямителей // Изв. Ан СССР. ОТН. 1939. № 7. С. 3–16.

11. *Эттингер Е. Л.* Возбуждение синхронных машин от управлямых ртутных выпрямителей // Тр. Всесоюзного электротехнического института. 1941. № 46.

12. *McClure J., Whittlesey S., Hartman M.* Modern excitation systems for large synchronous machines // Electrical Engineering. 1946. Vol. 65. No. P. 939–945.

13. *Трофименко Д. Е.* Об эффективности регулирования возбуждения в повышении динамической устойчивости // Тр. межвузовскй научно-техн. конференции по дальним электропередачам. Секция: пропускная способность и устойчивость дальних электропередач. 1957. С. 16–29.

14. *Schaefer R.* Excitation control of the synchronous generator // IEEE Ind. Appl. Mag. 2001. Vol. 7. No. 2. P. 37–43.

15. *Логинов А. Г., Фадеев А. В.* Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила» // Электротехника. 2001. № 9.

16. *Логинов А. Г.* Разработка и исследование устройства автоматического управления нагрузками тиристоров параллельно соединенных выпрямителей систем возбуждения: дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2006.

17. Совершенствование микропроцессорных средств систем возбуждения генераторов / К. А. Балихин, А. А. Бурмистров, Л. Г. Егоров и др. // Устойчивость и надежность электроэнергетических систем.СПб.: ПЭИПК, 2005.

18. *Nøland J., Alves E.* Continuous Evolution and Modern Approaches of Excitation Systems for Synchronous Machines // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE. 2018. P. 104–110.

19. *Аспит В. В.* Исторический обзор развития бесконтактных синхронных машин // Бесконтактные электрические машины. Рига, 1970. С. 5–64.

20. *Ferguson R.* Analytical studies of the brushless excitation system // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part. III: Power Apparatus and Systems. 1959. Vol. 78. No. 4. P. 1815–1821.

21. *Воробей В. К., Глебов И. А.* Тиристорный бесщеточный возбудитель турбогенератора мощностью 300 МВт // Электротехническая промышленость: Электрические машины. 1975. № 9 (55). С. 8–10.

22. *Кукушкин Д. В.* Способ гашения магнитного поля обмотки возбуждения // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 133–137.

23. *Platero C.* Enhancement of a high speed de-excitation system for brushless synchronous machines by large blocking voltage semiconductors // Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2015 IEEE 10th International Symposium on. IEEE. 2015. P. 50–55.

24. VOITH. Maintenance Free Exciter. URL: http://voith.com/corp-en/t3383_Maintenance_Free_Exciter_screen.pdf (дата обращения: 01.02.2019).

25. Systems and methods concerning exciterless synchronous machines / G. Shrestha, D. Tremelling, W. Arshad et al. Patent 15726443, Jan 16, 2015.

УДК 621.365.53

В. А. Лазерко*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПРАВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ECLUT 6.3

В статье представлено описание моделирования связных задач для проверки правильности работы системы индукционного нагрева для правки металлического листа стали марки СТ45. В ходе работы решаются две задачи магнитного поля переменного тока и 2 задачи теплового стационарного (при 20 градусах Цельсия) и нестационарного поля. По полученным результатам делаются выводы о корректности работы проектируемой системы.

Ключевые слова: *моделирование, индуктор, индукционная правка, сталь 45, магнитное поле, индукционный нагрев, тепловое поле, магнитопровод.*

V. A. Lazerko
Student
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MODELING THERMAL FIELDS OF THE INDUCTION STRAIGHTENING SYSTEM IN THE ELCUT 6.3

The article presents the modeling of connected tasks for the correct work of the induction straightening system for steel sheet CT45. Two tasks of AC magnetic field and two tasks of thermal stationary (at 20 °C) and non-stationary fields are solving during the work. According to the results, drawn conclusions about the correctness of the designed system.

Keywords: *modeling, inductor, induction straightening, steel 45, magnetic field, induction heat, thermal field, magnetic core.*

Целью данной работы является получение данных о глубине проникновения тока в сталь марки СТ45 и проверка температуры поверхности стальной пластины на условие горячего слоя посредством моделирования в пакете Elcut.

Описание модели системы и связь задач

В данном разделе будет рассматриваться моделирование ряда плоских магнитных и тепловых задач по методике, предложенной В. Э. Фризеном, представленной на рис. 1 [1].

Модель системы представляет собой вид торца конструкции и нагрузки. Конструкция охвачена воздухом согласно реальным условиям, однако нагрузка ограничена по ширине для более точного определения средних температур в слоях. Длина модели принимается равной длине магнитопровода за счет проявления в этом участке требуемого нагрева.

Нагрузка системы разбита на 5 слоев [2] для более точного изменения тепловых свойств стали в 1 и 2 слоях и для лучшего построения кривых намагничивания стали в каждом слое. Толщина 1 и 2 слоя равна глубине проникновения тока в сталь в холодном режиме. Толщины последующих слоев увеличиваются в геометрической прогрессии, таким образом, суммарная толщина нагрузки составит 27, 47 мм.

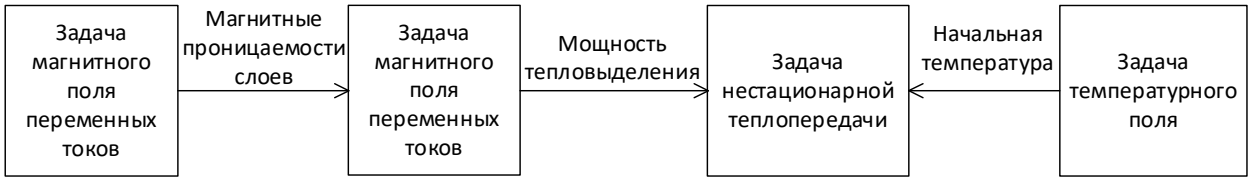


Рис. 1. Схема связи задач

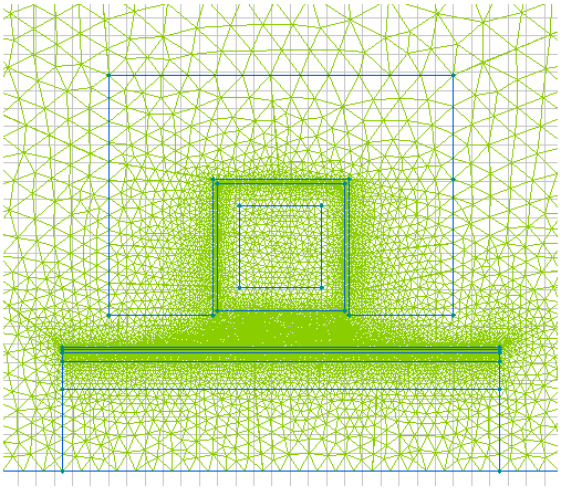


Рис. 2. Геометрия модели с построенной сеткой

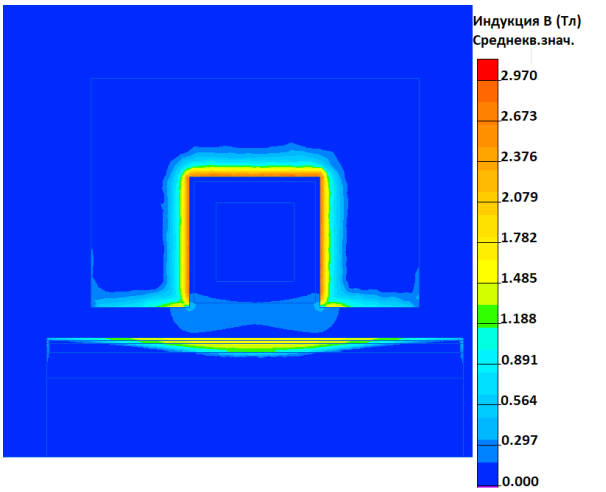


Рис. 4. Результат решения задачи магнитного поля переменного тока

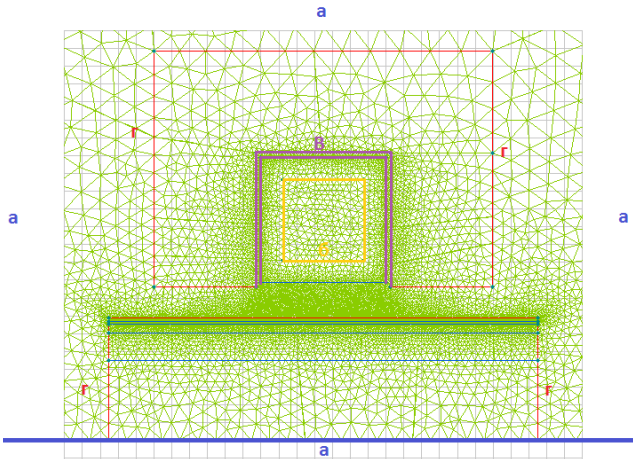


Рис. 3. Границы модели: а – внешние границы модели; б – границы охлаждения; в – границы изоляции; г – границы конструкции

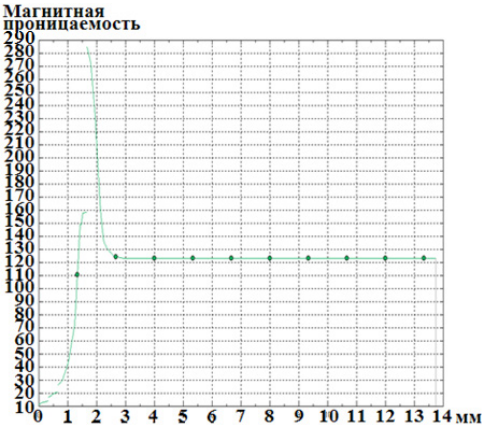


Рис. 5. График зависимости магнитной проницаемости от толщины нагрузки

Во всех задачах необходимо использовать один файл модели. Геометрия модели представлена на рис. 2.

В ходе моделирования задач были определены необходимые граничные условия для каждой из них (рис. 3).

Сетка была построена автоматически, что обеспечило достаточную плотность узлов в необходимых областях конструкции.

Задача магнитного поля переменных токов

Цель моделирования данной задачи заключается в определении магнитных проницаемостей каждого слоя по графику напряженностей магнитного поля в нагрузке [3, 4].

Электропроводность в метке «воздух» отсутствует для минимизации времени расчетов.

Свойства меток ребер:

– внешние границы модели – магнитный потенциал равен 0 (рис. 3, а);

– границы по периметру охлаждения в проводе – однородное условие Дирихле – Неймана для касательного поля (рис. 3, б);

– границы по периметру изоляции – однородное условие Дирихле – Неймана для касательного поля (рис. 3, в);

– границы по периметру магнитопровода и нагрузки – однородное условие Дирихле – Неймана для касательного поля (рис. 3, г) [5].

Результат моделирования задачи представлен на рис. 4, 5.

Мощность тепловыделения будет уточнена в следующем подразделе.

По графику определим средние магнитные проницаемости слоев и занесем полученные значения в табл. 1.

Полученные данные передаем в новую задачу магнитного поля переменных токов.

Таблица 1

Магнитные проницаемости слоев

№ слоя	1	2	3	4	5
Значение магнитной проницаемости	11	20	90	190	123

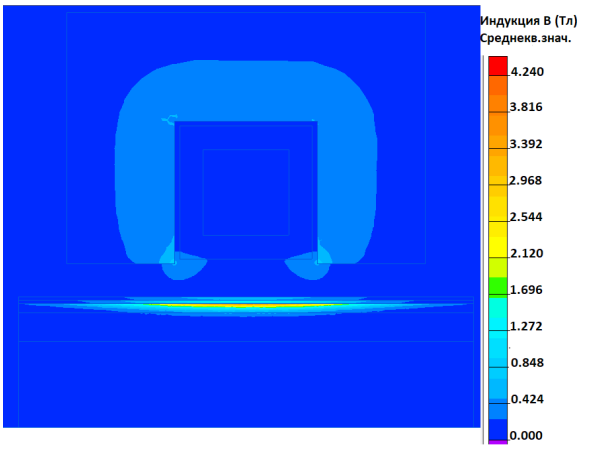


Рис. 6. Картина магнитной индукции системы

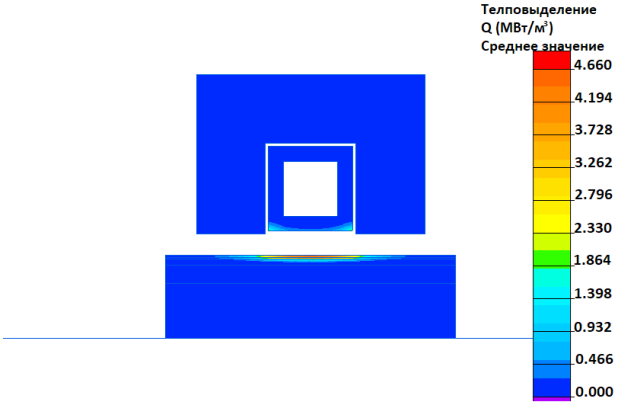


Рис. 7. Мощность тепловыделения модели

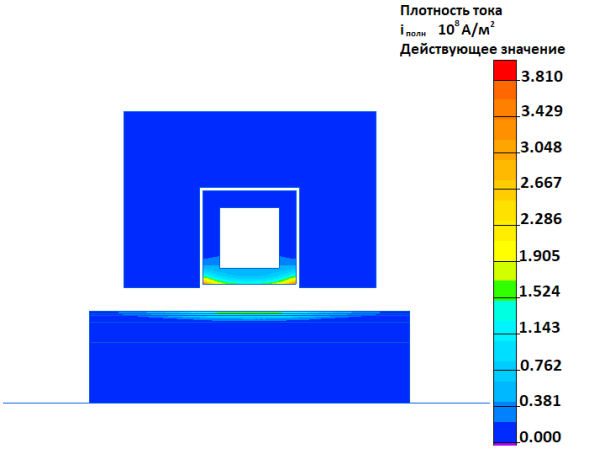


Рис. 8. Плотность тока в модели

Скорректированная задача магнитного поля переменных токов

Цель моделирования данной задачи заключается в более точном определении мощности тепловыделения в индукторе и в слоях нагрузки за счет скорректированных магнитных проницаемостей слоев нагрузки [6].

Новая задача создается как копия предыдущей задачи магнитного поля переменных токов, но в блоках «1 слой – 5 слой» указываются не нелинейные параметры, а значения магнитной проницаемости согласно табл. 1, электропроводность блоков остается нелинейной. Свойства меток ребер также не меняются.

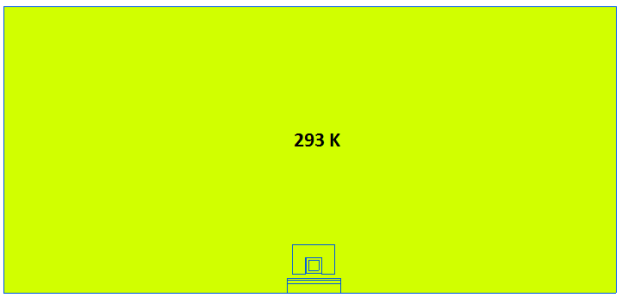


Рис. 9. Начальное тепловое поле системы

Результаты моделирования задачи представлены на рис. 6, 7, 8.

Полученные данные передаем в задачу нестационарного теплового поля.

Задача стационарного теплового поля

Цель моделирования данной задачи заключается в определении начального поля температур для нестационарной задачи теплового поля [7].

Задача будет производиться при температуре окружающей среды 20 градусах Цельсия с мощностью тепловыделения во всех блоках, равной 0. Так как в задаче не происходит нагрев, то зададим линейные теплоемкости и теплопроводности блоков [8].

Результат моделирования задачи представлен на рис. 9.

Задача нестационарного теплового поля

Цель моделирования данной задачи заключается в получении распределения температурного поля во времени в нагрузке.

Воздух исключается из расчета тепловых полей, так как происходит быстрый нагрев, поэтому потери в окружающую среду незначительны. Для этого необходимо задать условие нулевого теплового потока на границах нагрузки [9]. Однако в свойствах меток нужно указать значение теплопроводности, равное 1, тогда в воздухе будет наблюдаться некоторое распределение температур. Полученное распределение температур в воздухе не отображает реальную картину распределения, а только связано с распределением температур в слоях нагрузки.

Результаты моделирования задачи представлены на рис. 10, 11, 12.

Проанализировав последние рисунки, легко заметить, что слои в нагрузке не нагреваются до точки Кюри, данный недостаток системы объясняется недостаточной подводимой мощностью к индуктору, за счет введения малой удельной мощности нагрева в ТЗ. Проверим данное высказывание путем моделирования модели с повышенным напряжением (U_{kor}) на индукторе до 25 В вместо начальных 15 В. Геометрические

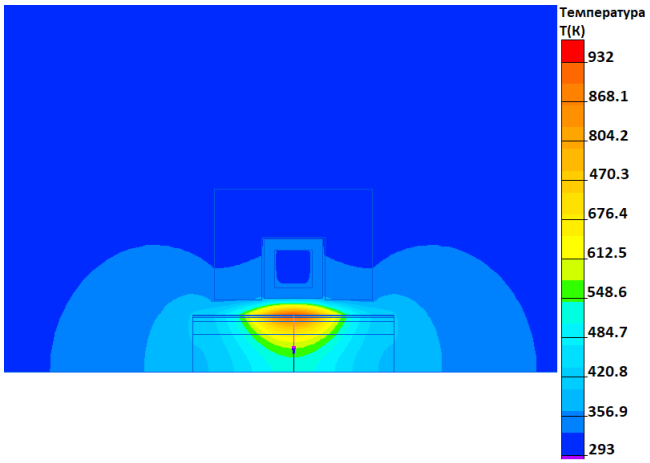


Рис. 10. Конечная картина нестационарного теплового поля

параметры остаются неизменными. Результаты проверочного моделирования представлены на рис. 13, 14, 15.

Из последних двух рисунков видно, что в нагрузке появляется горячий слой начиная с 2,6 секунды, за время работы в течение10 с глубина горячего слоя достигает 5,5 мм.

Выводы

В ходе выполнения работы появилась необходимость скорректировать данные о подаваемой мощности на индуктор, так как при первичном моделировании системы горячий слой в стальной пластине отсутствовал, что не способствует эффективному нагреву пластины. Поэтому было принято решение увеличить подаваемое напря-

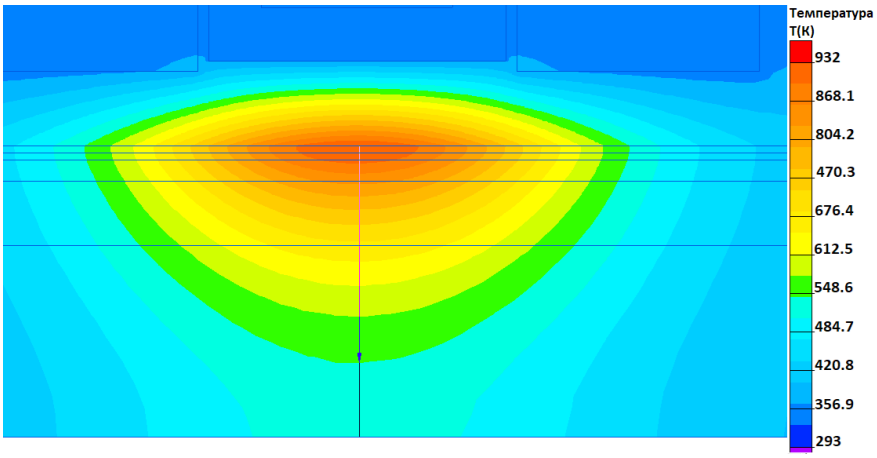


Рис. 11. Распределение температур по слоям

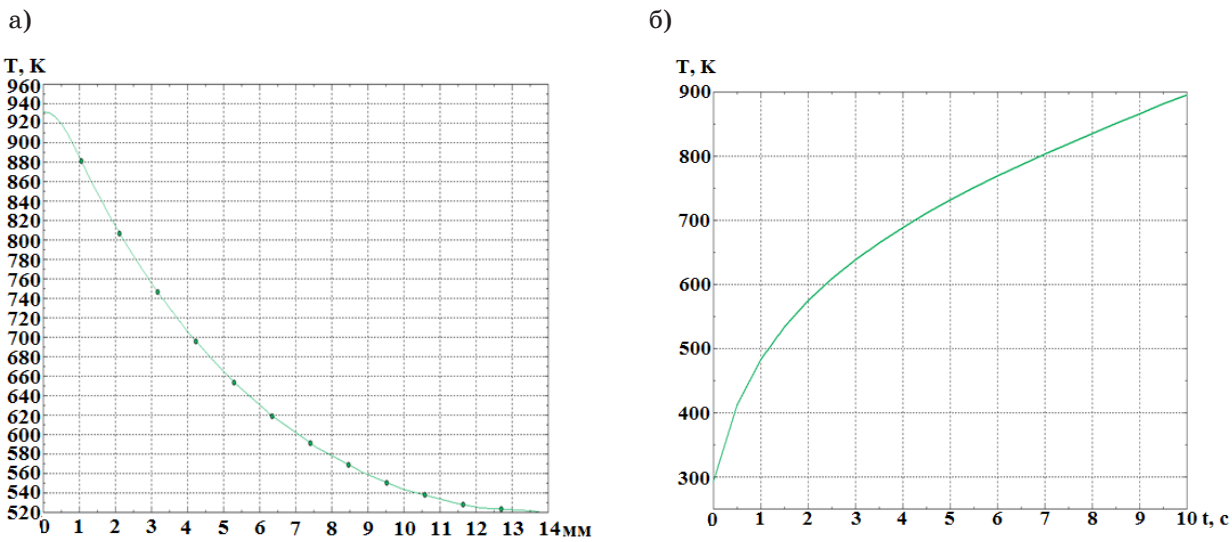


Рис. 12. График зависимости температуры: а) нагрузки от толщины; б) в контуре от времени

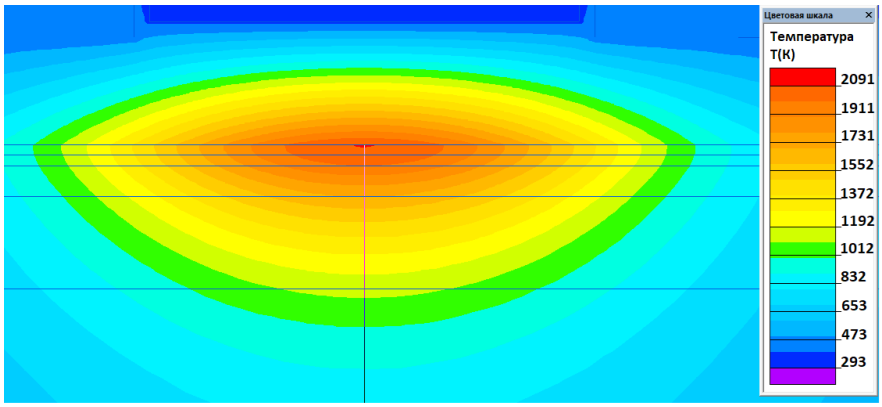


Рис. 13. Распределение температур по слоям

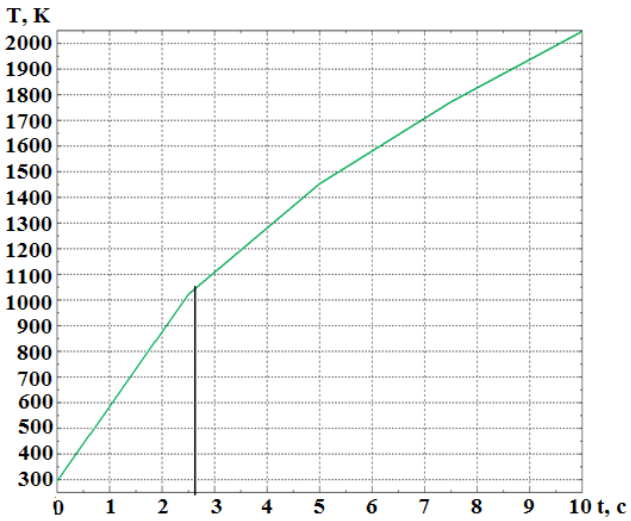


Рис. 14. График зависимости температуры в контуре от времени

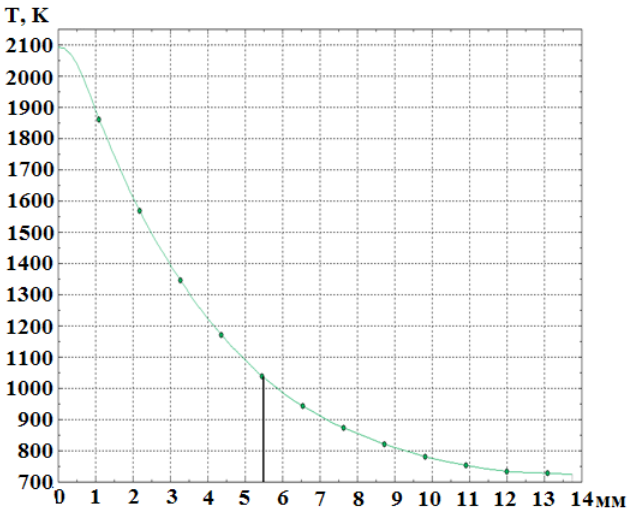


Рис. 15. График зависимости температуры нагрузки от толщины

жение на индуктор до 25 В, тем самым было достигнуто условие создания горячего слоя в пластине. Таким образом, при работе системы в течение 10 с глубина горячего слоя достигаем 5,5 мм, что позволяет эффективно прогревать стальные пластины толщиной 2 см. Глубина проникновения тока в сталь согласно рис. 8 составит приблизительно 20 мм.

Библиографический список

1. *Воскресенский К. Д.* Сборник расчетов и задач по теплопередаче. Изд. 2-е. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959. 335 с.

2. *Фризен В. Э.* Моделирование индукционного нагрева с помощью программы ELCUT 4.2; Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Методы расчета электромагнитных и тепловых полей». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ. УПИ, 2003. 27 с.

3. ELCUT ® Руководство пользователя. Версия 6.3. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. СПб.: ТОР, 2017. 292 с.

4. *Фризен В. Э.* Методы расчета электрических и магнитных полей: уч. комплект. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 176 с.

5. *Логинов В. С.* Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. М.: Физмалит, 2009. 251 с.

6. *Салова И. А.* Моделирование конечных элементов в программном комплексе ELCUT. Методические указания к выполнению лабораторных работ. СПб.: ГУАП, 2015. 91 с.

7. *Черных И. В.* Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 4.2. Методические указания по дисциплине «Методы расчета электрических и магнитных полей». Екатеринбург: УГТУ. УПИ, 2005. 24 с.

8. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.

9. *Мазо А. Б.* Основы теории и методы расчета теплопередачи: уч. пособие. Казань: Казанский ун-т, 2013. 144 с.

УДК 621.313.823.2

Е. Ю. Малатынская*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ НА ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ СИНХРОННОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

В статье представлена теория синхронного ветрогенератора и приведено сравнение реакции якоря при нагрузке и при холостом ходу. Приведены экспериментальные данные, полученные на кафедре электромеханики и робототехники.

Ключевые слова: *реакция якоря, постоянные магниты, синхронный генератор, ветроэнергетика.*

E. Y. Malatynskaya*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFLUENCE OF THE ARMATURE REACTION ON THE PERMANENT MAGNETS OF A SYNCHRONOUS WIND GENERATOR AT RATED MODE

The article presents the theory of a synchronous wind generator and compares the reaction of the armature at rated mode and no-load duty. The experimental data obtained at department of electromechanics and robotics.

Keywords: *armature reaction, permanent magnets, synchronous generator, wind power.*

Целью данной работы является исследование влияния реакции якоря на постоянные магниты синхронного ветрогенератора при нагрузке.

Главной задачей являлось определение параметров и характеристик машины для наиболее выгодного построения. В ходе работы производился расчет необходимых параметров, так как в основе находился корпус ДПТ. В программе ELCUT 6.0 проводилось исследование магнитных и тепловых полей.

На данный момент именно дисковые машины на постоянных машинах имеют интерес среди исследователей. Генератор на постоянных магнитах может иметь две основные конструктивные схемы: первая представляет собой радиальный тип, где уменьшение длины активной части происходит за счет увеличения диаметра машины, второй аксиальный тип, где уменьшение габаритов происходит за счет иной конструкции активной части. Указанная конструкция является наиболее перспективной в этом направлении [1].

Электромагнитные процессы в машинах с постоянными магнитами протекают так же, как и в генераторах с электромагнитным возбуждением. Однако значительная реакция якоря во время пуска или при коротком замыкании может вызвать необратимое размагничивание постоянных магнитов, в результате чего после снятия размагничивающего действия свойства постоянного магнита не будут полностью восстановлены. Поэтому необходимо рассмотреть влияние реакции якоря на постоянные магниты синхронного ветрогенератора с аксиальной магнитной системой [2].

Для наглядного изучения данной темы будет использован ветрогенератор, спроектированный на кафедре электромеханики и робототехники Государственного университета аэрокосмического приборостроения. Ветрогенератор представляет собой машину, состоящую из двух роторов и статора. Ротор включает постоянные магниты, сделанные на основе сплава неодим – железо-бор. В такой конструкции используется по 8 магнитов на каждом роторе, диаметр одного магнита составлял 40 × 8 мм. Магниты располагаются в корпусе, сделанном на основе стеклотекстолита. В этом же корпусе находится магнитопровод в виде ленты, которая выполнена из аморфной стали – АМАГ 225, ее ширина составила 20 мм, а толщина 20 мк [3].

Статор располагается посередине двух роторов. Он состоит из 12 катушек, по 6 в одном слое. Обмотки катушек соединены в звезду для подавления высших гармоник. Наглядно эта конструкция изображена на рис. 1.

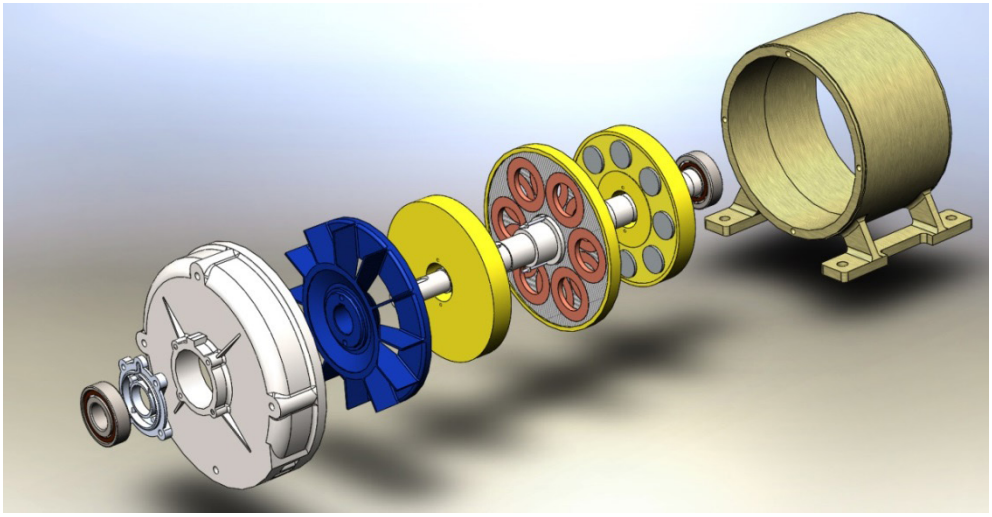


Рис. 1. Модель ветрогенератора

Таблица 1

Характеристики машин

Параметры	Единицы измерения	Значение	Сравнение с ДПТ
Мощность	кВт	До 5	Увеличена мощность по сравнению с аналогом на 20%
Скорость	об./мин	750	КПД увеличен на 10% за счет применения аморфных сталей и постоянных магнитов
Напряжение	В	127	Снижены массогабаритные характеристики
Ток	А	16	Использована новая конструкция с внутренним статором с постоянными магнитами

После сборки данной машины проведен эксперимент, в результате которого были получены параметры, представленные в табл. 1. Также приведено сравнение с ранее разобранным двигателем постоянного тока.

В ходе эксперимента были установлены данные, с помощью которых удалось построить кривую намагничивания для корпуса (рис. 2).

Сборка была смоделирована в программе ELCUT 6.0, где наглядно можно увидеть влия-

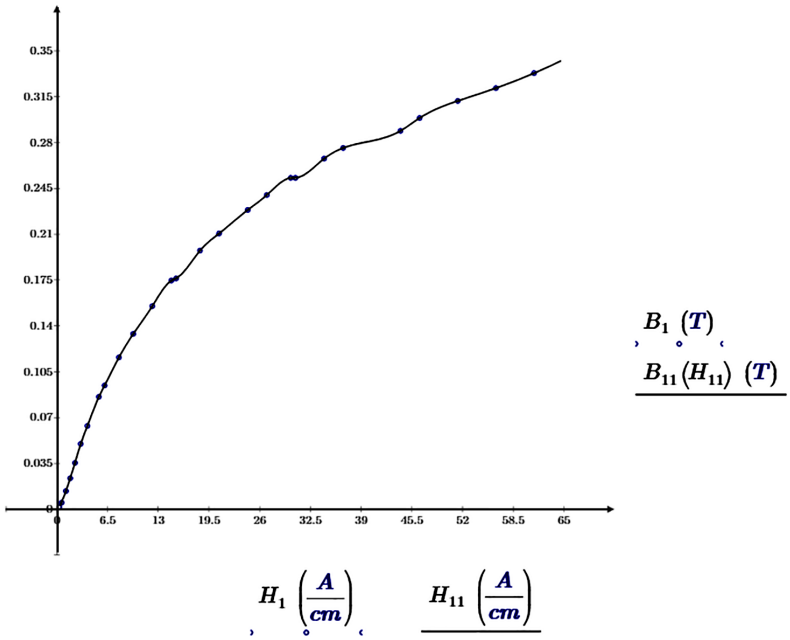


Рис. 2. График кривой намагничивания корпуса

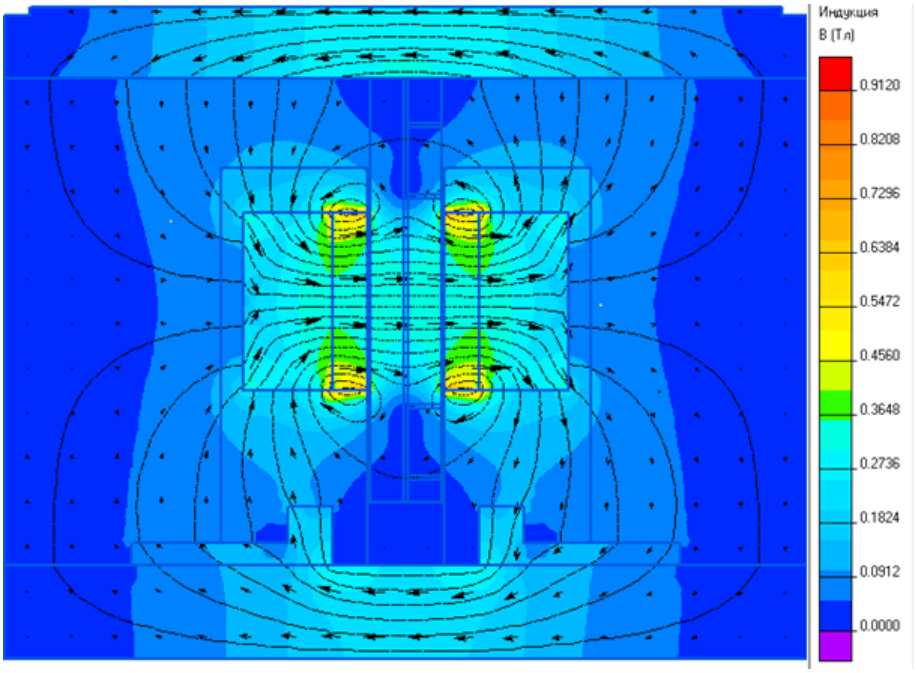


Рис. 3. Магнитное поле генератора на холостом ходу

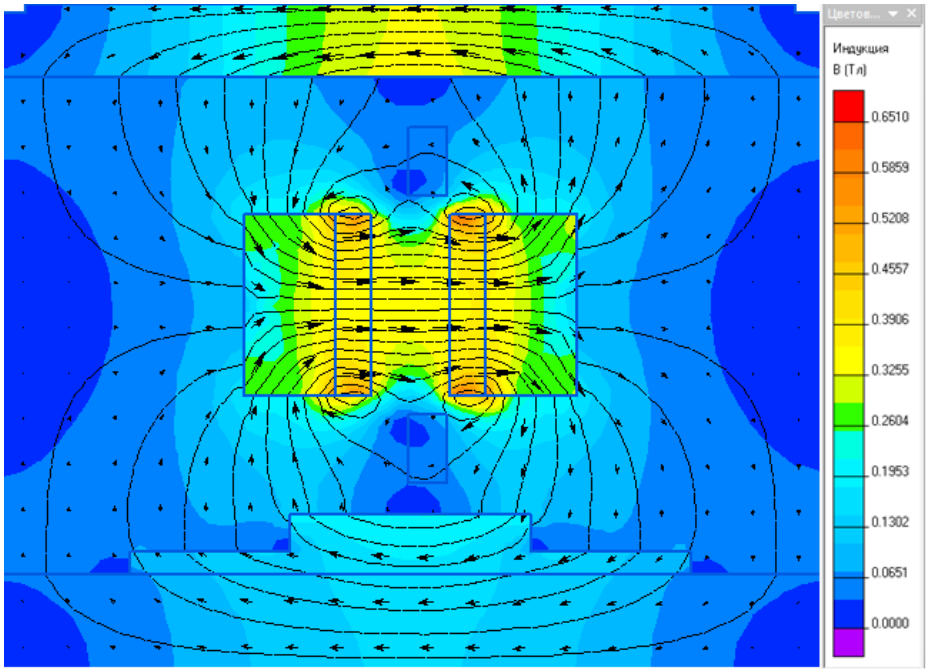


Рис. 4. Магнитное поле ветрогенератора в продольном разрезе при нагрузке

ние реакции якоря на постоянные магниты синхронного ветрогенератора.

При нагрузке синхронного генератора по обмотке статора проходит ток I, который способствует созданию своего магнитного потока. Этот поток оказывает значительное влияние на магнитное поле машины в целом, изменяя его по величине или искажая его распределение. Такое действие магнитного потока статора на поток полюсов ротора называется реакцией якоря [4].

Результаты расчета плоской модели магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами на холостом ходу в комплексе программ ELCUT 6.0 представлены на рис. 3. Результаты моделирования результирующего магнитного поля с учетом реакции якоря представлены на рис. 4, 5.

Результатом опыта является достижение:

1. Максимального значения тангенциального распределения – 0,16 Тл;

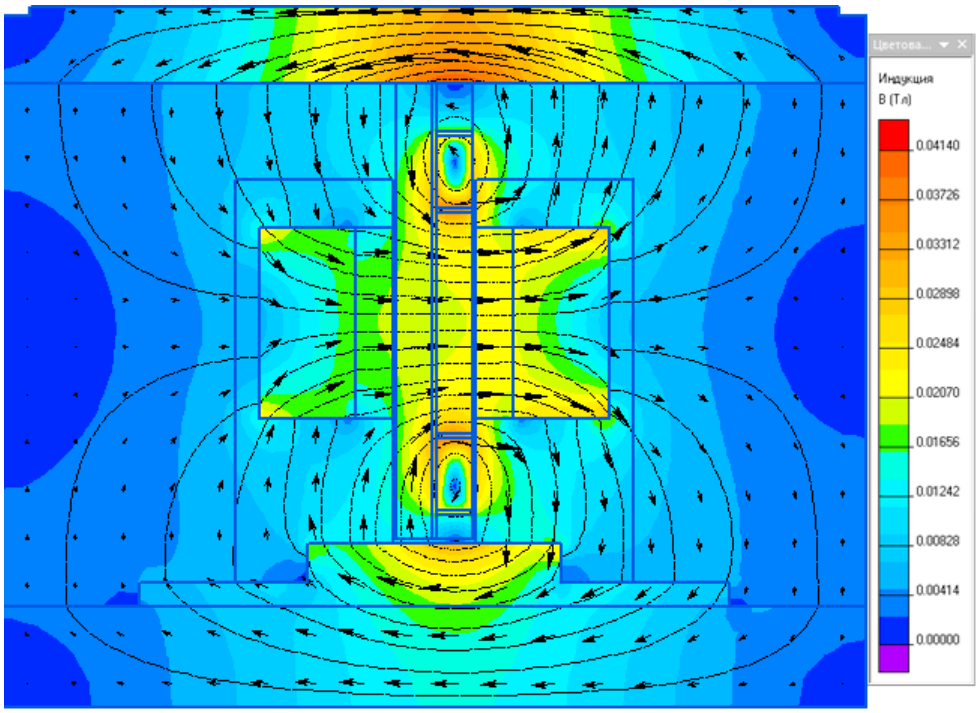


Рис. 5. Магнитостатическое поле реакции якоря ветрогенератора в продольном разрезе

2. Максимального значения нормального распределения – 0,325 Тл.

Результатом опыта является достижение:

1. Максимального значения тангенциального распределения – 0,125 Тл;

2. Максимального значения нормального распределения – 0,345 Тл.

Результатом опыта является достижение:

1. Максимального значения тангенциального распределения – Тл;

2. Максимального значения нормального распределения – 0,034 Тл.

До результатов эксперимента был выполнен расчет по определению параметра магнитной индукции в воздушном зазоре по формуле (1).

Параметры постоянных магнитов принимаются согласно стандартным усредненным спецификациям магнитных материалов на основе сплава неодим – железо-бор, выполненных методом порошковой металлургии.

$$B\sigma = \frac{2 \cdot h_m \cdot H_c}{\frac{2 \cdot h_m \cdot k_\sigma}{\mu_r} + \frac{(2 \cdot \sigma + h_a) \cdot k_\mu}{\mu_0}}. \qquad (1)$$

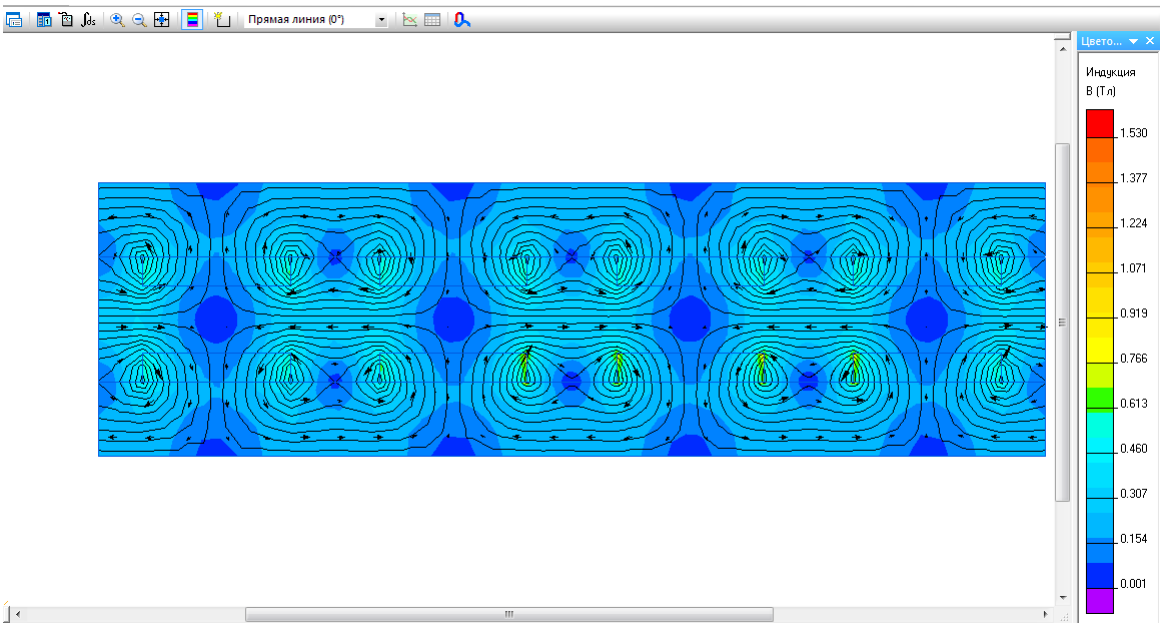


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля при согласном направлении магнитов

Таблица 2

Магнитная индукция в воздушном зазоре

Значение, полученное в результате расчета	Значение, полученное в ходе эксперимента
–	0,325
–	0,034
0,365	0,345

Результаты эксперимента и расчета приведены в табл. 2.

При моделировании магнитного поля было выявлено, что величина магнитной индукции в воздушном зазоре полностью соответствует расчетной.

Магнитостатическое поле ветрогенератора в поперечном разрезе

1. Максимальное значение тангенциального распределения – 0,028 Тл;

2. Максимальное значение нормального распределения – 0,35 Тл.

1. Максимальное значение нормального распределения – 0,5 Тл;

2. Максимальное значение тангенциального распределения – 0,08 Тл.

В результате моделирования было выявлено, что распределение магнитов согласным направлением выгоднее, так как значение магнитной индукции значительно отличается.

На рис. 8 представлена точка максимальной магнитной энергии магнита. Для определения размагничивающего действия необходимо построить рабочую диаграмму магнита, которая устанавливает связь между основными параметрами магнита и параметрами внешней магнитной цепи, а также действием поля реакции якоря.

Намагничивающая сила постоянного магнита меняется при изменении проводимости внешней магнитной цепи и намагничивающей силы реакции якоря. Намагничивающая сила сильно зависит от положения точки перемещения прямой возврата на кривой размагничивания.

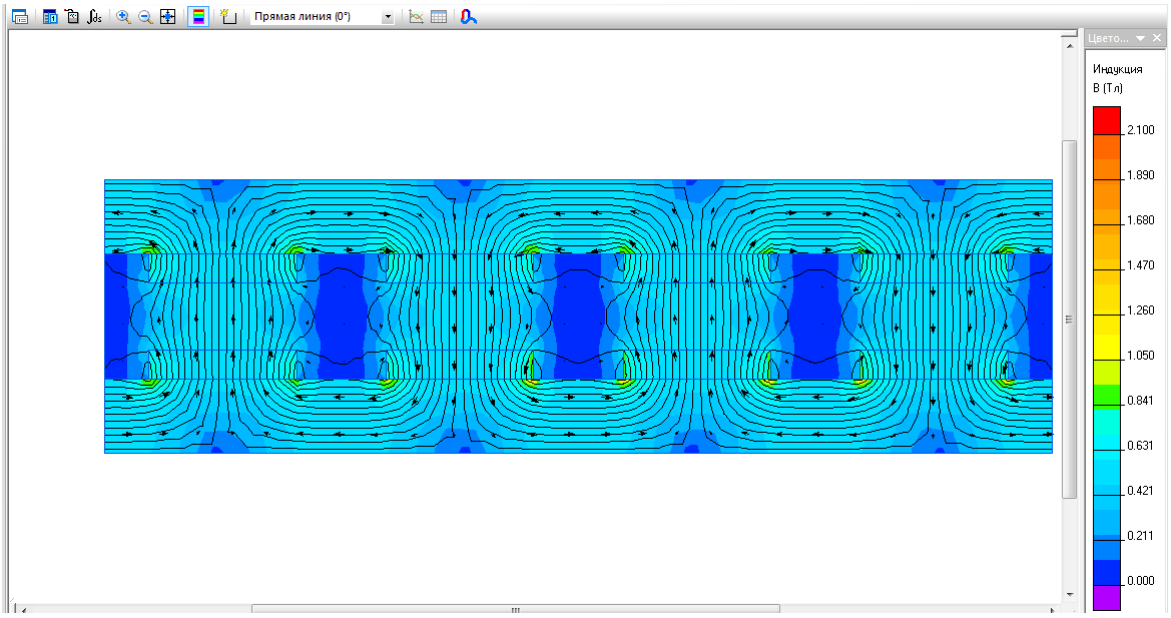


Рис. 7. Распределение магнитного поля при встречном направлении

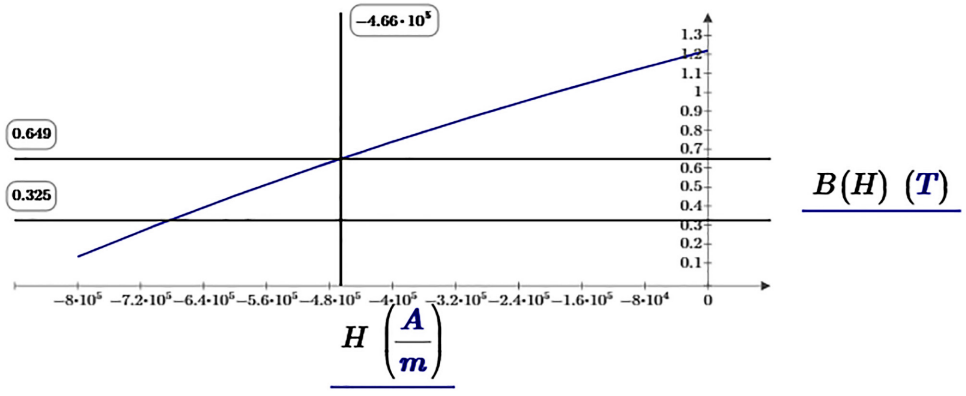


Рис. 8. Точка максимальной магнитной энергии магнита

Чем большей коэрцитивной силой обладает магнит, тем он устойчивее к размагничивающим факторам. При холостом ходе ток якоря равен нулю. Если подключить нагрузку, то создастся магнитное поле, которое будет действовать на магниты. Получается, что наибольшее влияние на магниты происходит именно в данный момент, магниты будут быстрее размагничиваться.

В результате вычислений было выявлено, что максимальная энергия магнита не соответствует данным, полученным в ходе эксперимента. Для достижения необходимых параметров нужно либо выбрать другу сталь, либо изменить конструкцию. В нашем случае достаточно изменить сам материал. Вместо АМАГ 225 нужно произвести эксперимент с АМАГ 492.

Библиографический список

1. *Татевосян А. А., Мищенко В. С.* Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами. Омск: ГТУ, 2016. 148 с.

2. Специальные синхронные машины. URL: http://servomotors. ru/documentation/electromotor/book129/book129p40. html (дата обращения: 19.02.2019).

3. *Малатынская Е. Ю.* Исследование магнитных и тепловых полей и механических нагрузок ветрогенератора с аксиальной магнитной системой: дипломная работа. СПб.: ГУАП, 2018. С. 86.

4. Нагрузка – синхронный генератор. URL: https://www. ngpedia. ru/id169400p1. html (дата обращения: 19.02.2019).

УДК 621.313.823.2

А. И. Маркелов*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКСИАЛЬНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В МОЩНЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕКСИХ УСТАНОВКАХ

В статье проведен анализ использования синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком в ветрогенераторах большой мощности.

Ключевые слова: *дисковые машины, аксиальный магнитный поток, синхронный генератор, возобновляемая энергетика, ветроэнергетика.*

A. I. Markelov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF USING AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR IN HIGH-POWER WIND TURBINES

Article represents the analysis of using synchronous generators with axial magnetic flux in high-power wind generators.

Keywords: *disk electrical machines, axial magnetic flux, synchronous generator, renewable energy, wind power.*

Целью данной работы является проведение анализа существующих на данный момент и используемых в ветрогенераторах, а также в качестве прототипов синхронных генераторов с аксиальным направлением магнитного потока, применяемых в мощных ветроэнергетических установках, и последующее сравнение их основных характеристик.

На текущий момент среди возобновляемых источников энергии лидирующее положение занимает ветроэнергетика, как наиболее перспективное и быстроразвивающееся направление. По состоянию на конец 2017 года суммарная номинальная электрическая мощность всех установленных ветрогенераторов составила 539 ГВт (рис. 1) [1].

Высокий абсолютный и относительный рост показывает малая ветроэнергетика. По состоянию на 2016 год суммарная номинальная электрическая мощность установок класса малой ветроэнергетики составила 830 МВт. Динамика роста увеличилась до 10,9% по сравнению с данными за предыдущий год, где рост составил 10,4% [2].

Существующие на рынке ветроустановки мегаваттных мощностей используют в своей конструкции редукторы с различным количеством ступеней, позволяющие вращать установленные генераторы со скоростью большей, чем скорость вращения лопастей турбины [3].

Однако данный факт влечет за собой наличие дополнительных механических потерь в тур-

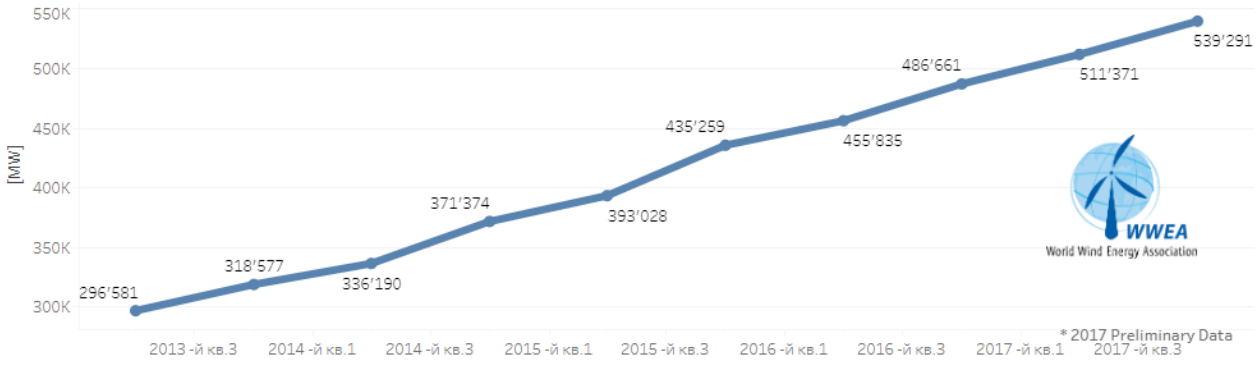


Рис. 1. Общая установленная мощность ветрогенераторов

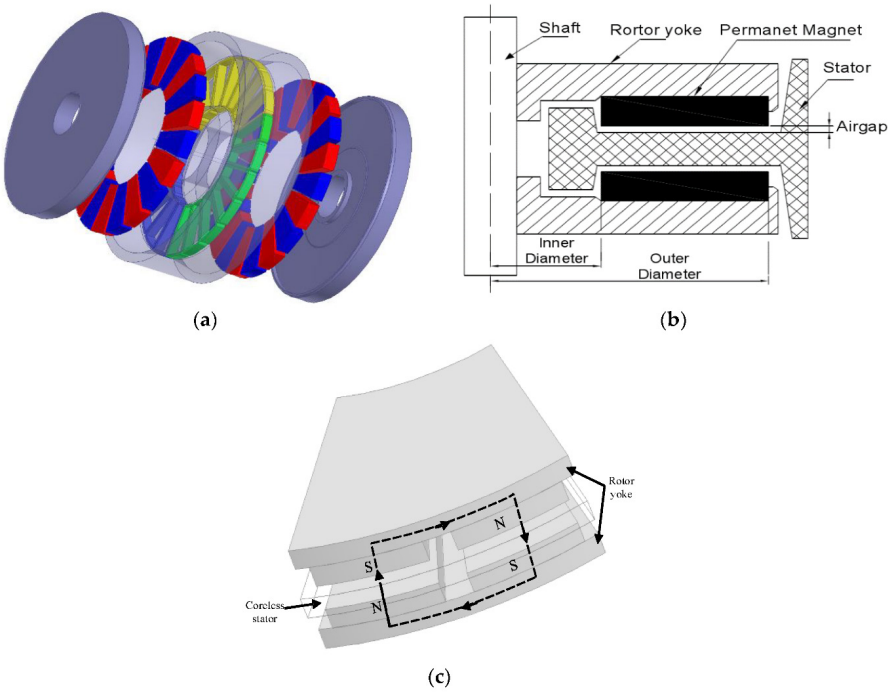


Рис. 2. Конструкция синхронного генератора с аксиальным магнитным потоком

бине и необходимость частого обслуживания. Согласно существующему исследованию редуктор является наиболее слабым местом системы ветроустановки, поскольку представляет собой компонент с наибольшей интенсивностью отказов (порядка 20%) [4]. Повысить надежность ветроэнергетической установки позволяет использование безредукторной технологии передачи вращения (т. н. *direct drive*) или понижение количества ступеней редуктора. Однако, поскольку скорость вращения лопастей, турбины ограничена, необходимо использование иных типов генераторов, способных вырабатывать электроэнергию при низких скоростях вращения.

Для безредукторных ветряных турбин или турбин с одноступенчатыми редукторами применяются низкоскоростные синхронные генераторы с системой возбуждения на постоянных магнитах, позволяющих в силу особенностей конструкции уменьшить количество передач редуктора или отказаться от его использования, что влечет за собой повышение надежности установки, снижение стоимости и уменьшение необходимости обслуживания.

Синхронные генераторы с системой возбуждения на постоянных магнитах и аксиальным магнитным потоком (рис. 2) обладают высокой удельной мощностью, возможностью модульного масштабирования и рядом других преимуществ перед машинами с радиальным магнитным потоком [5, 6], что обуславливает их широкое применение в описанных выше ветроэнергетических установках.

На текущий момент основную долю синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком, производимых для использования в ветряных турбинах, составляют модели китайского производства. Это обуславливается лидирующим положением Китая на рынке малой ветроэнергетики. С общим количеством установок, достигшим 689 тысяч, Китай занимает 72% мирового рынка в данном секторе [2].

Ведущими производителями ветроустановок с аксиальными синхронными генераторами являются: AMG Power Solutions, Xinda Green Energy, Qingdao Greef New Energy Equipment, EDS Group, Seoyoung Tech, Tuge Energia. Основной диапазон мощностей, покрываемый продукцией этих компаний, составляет 5–100 кВт. Для анализа и сравнения генераторов данные представлены в виде таблицы (табл. 1), в которую сведены основные их характеристики [7, 8, 9, 10, 11].

Помимо серийных моделей активно ведутся работы по проектированию и исследованию прототипов аксиальных синхронных генераторов большей мощности.

Бельгийской компанией Magnax сконструирован прототип мощностью 100 кВт, весом 850 кг и осевой длиной 140 мм. Образец приступил к испытаниям на базе Гентского университета в конце 2017 года. Использование особенностей конструкции позволило значительно понизить массу генератора, уменьшить габаритные размеры и повысить эффективность [12].

Компания NGenTec в 2012 году успешно создала и сконструировала синхронный генератор с аксиальным магнитным потоком мощностью 1 МВт, являющийся прототипом для исследований, результаты которых планируется при-

Таблица 1

Основные характеристики аксиальных синхронных генераторов

	Xinda, 50 kW	Xinda 30 kW	XDSHF770-20	XDSHF700-10	GDG-10KW-100	SAV-15kW	XD-20 kW	SYG-660-R-10000-150	AMG20KW-860
Номинальная мощность, кВт	50	30	20	10	10	15	20	10	20
Номинальное выходное напряжение, В	400	400	500/380	380	400	240	380	220	380
Номинальный ток, А	7,6	44	-	-	14,5	65	31	-	31
Номинальное число оборотов ротора, об./мин	400	300	300	300	100	60–90	300	150	100
Количество фаз	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ток с генератора	переменный	переменный	переменный	переменный	переменный	переменный	переменный	переменный	переменный
Вес, кг	300	250	180	145	245	-	165	300	290

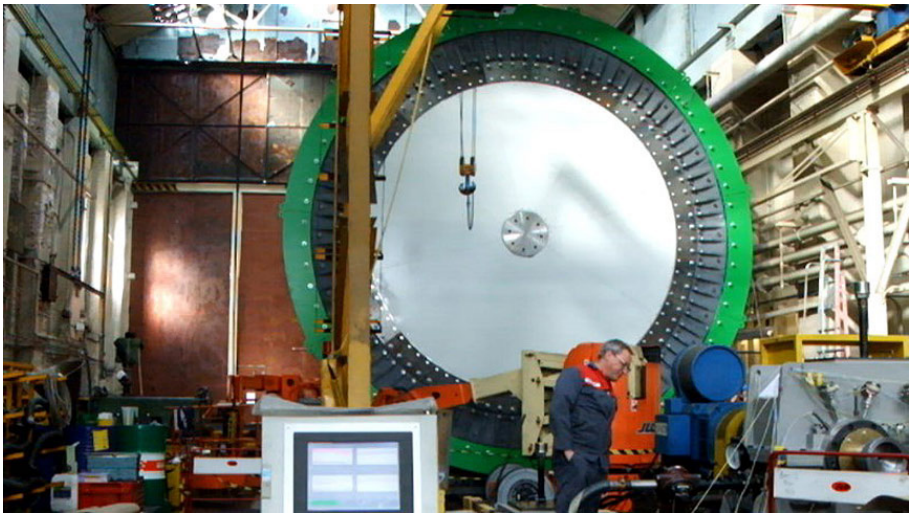


Рис. 3. Прототип NGenTec мощностью 1 МВт

менить для создания генератора мощностью 6 МВт, используемого в оффшорной ветроэнергетике (рис. 3). Прототип прошел 7-месячные испытания. Заявленная частота вращения – 12 об./мин, что позволяет использовать данный генератор в безредукторных ветроэнергетических установках [13].

Таким образом, рассматриваемый тип генераторов находит большое применение в малой ветроэнергетике и в мощных ветроэнергетических установках.

Кроме того, существующие прототипы показывают возможность использования генераторов аксиальной конструкции в ветряных турбинах мощностью до нескольких мегаватт, что открывает им потенциал для использования в оффшорной ветряной энергетике и ветряных электростанциях.

Библиографический список

1. WIND POWER CAPACITY REACHES 539 GW, 52,6 GW ADDED IN 2017, press release. URL: https://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics (дата обращения: 20.02.2019).

2. SMALL WIND WORLD MARKET: BACK ON TRACK AGAIN, press release. URL: https://wwindea.org/blog/2016/03/17/small-wind-world-market-back-on-track-again (дата обращения: 20.02.2019).

3. *Ragheb A., Ragheb, M.* Wind Turbine Gearbox Technologies, Proceedings of the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC'10). Amman, Jordan, March 2010.

4. *Ribrant J., Bertling L.* Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007. Vol 22. No. 1.

5. *Jacek F.* Axial flux permanent magnet brushless machine // Second edition. Netherlands: Springer science, 2008. 362 p.

6. *Aydin M., Huang S., Lipo T.* Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review, Conference Record of SPEEDAM. 2004. P. 61–71.

7. Permanent Magnet Generators, Products. URL: http://www.xindaenergy.com/e_products/?big_id=17 (дата обращения: 20.02.2019).

8. Coreless Permanent magnet generator. Qingdao Greef New Energy Equipment Co., LTD. URL: http://www.greefenergy.com/post/74 (дата обращения: 20.02.2019).

9. 20KW 70RPM 380VAC Permanent Magnet Generator for Wind // Hyro. AMG Power Solutions. URL: http://www.amgenergia.com/20kw-70rpm-380vac-permanent-magnet-generator-for-windhyro-p-22.html (дата обращения: 20.02.2019).

10. SYG-660-R-10000-150. Seoyoung Tech. Co., LTD. URL: http://www.evsmotor.co.kr/kor/product/SYG-660-R-10kW-150.pdf (дата обращения: 20.02.2019).

11. Ветрогенератор SAV-15 кВт. EDS Group. URL: http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogeneratory/vetrogeneratory-sokol-air-vertical/sokol-air-vertical-15-kvt.html (дата обращения: 20.02.2019).

12. Magnax's innovative machine being tested at Ghent University. Ghent University. URL: https://www.ugent.be/energhentic/en/news-events/news/magnax.html (дата обращения: 20.02.2019).

13. C-GEN 1 MW Demonstrator. The University of Edinburgh. URL: https://www.cgen.eng.ed.ac.uk (дата обращения: 20.02.2019).

УДК 621.314

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Разработка и исследование системы энергообеспечения, содержащей в своем составе электрохимический генератор. Исследование проводилось на основе аналитических методов и компьютерного моделирования электромагнитных процессов системы энергообеспечения с электрохимическим генератором. Разработаны методики расчета и компьютерные модели системы энергообеспечения с электрохимическим генератором. Выполнено исследование электромагнитных процессов и характеристик системы энергообеспечения с электрохимическим генератором. Показаны пути совершенствования характеристик систем энергообеспечения с электрохимическим генератором.

Ключевые слова: *электрохимический генератор, малая энергетическая установка, зарядно-разрядное устройство, преобразователь постоянного напряжения, индуктивность, емкость, фильтр.*

A. A. Martynov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. S. Timofeyev*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

POWER SUPPLY SYSTEM WITH AN ELECTROCHEMICAL GENERATOR MODELING

Development and research of power supply system, containing an electrochemical generator. The study was conducted on the base of analytical methods and computer simulation of electromagnetic processes of the power supply system with an electrochemical generator. Calculation methods and computer models of power supply system with electrochemical generator are developed. The study of electromagnetic processes and characteristics of the power supply system with an electrochemical generator. The ways of improving the characteristics of power supply systems with an electrochemical generator are shown.

Keywords: *electrochemical generator, small power plant, charge-discharge device, DC voltage Converter, inductance, capacitance, filter.*

Системы энергообеспечения с электрохимическими генераторами (ЭХГ) находят широкое применение в различных областях техники как общепромышленного, так и военного назначения [1–8]. ЭХГ преобразует энергию водородного топлива в электрическую энергию постоянного тока [1]. Для космических летательных аппаратов (КЛА) многоразового использования «Спейс Шатлл» фирма «Дженерал Электрик» разработала ЭХГ, выходная мощность которого составляла 5 кВт. Для отечественного КЛА «Буран» были разработаны 4 ЭХГ мощностью по 10 кВт.

Проводятся многочисленные разработки систем энергообеспечения автомобилей, судов, подводных необитаемых аппаратов и т п. Успех внедрения ЭХГ в состав систем энергообеспечения того или иного объекта зависит от решения ряда проблем. В первую очередь это относится к необходимости создания аналитического описания механизма влияния электрокатализа на рабочие характеристики ЭХГ, отсутствие математических моделей топливного элемента (ТЭ) и ЭХГ, позволяющих с достаточной для практики точностью прогнозировать изменение рабочих характеристик ТЭ в процессе их эксплуатации; отсутствие общего аналитического описания ЭХГ как электротехнического устройства сложной технической системы.

Обеспечение требуемых характеристик систем энергообеспечения с ЭХГ возможно при

включении между нагрузкой и ЭХГ полупроводниковых преобразователей, управление которыми должно осуществляться при использовании обратных связей по регулируемым параметрам.

Рассмотрим работу системы энергообеспечения с ЭХГ на примере системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА).

На рис. 1 приведена структурная схема системы энергообеспечения АНПА, содержащая в своем составе два канала малогабаритной энергетической установки (МЭУ), МЭУ1 и МЭУ2.

Каждый канал МЭУ включает в себя последовательно соединенные ЭХГ и блок аппаратуры управления (АУ). Выходы МЭУ1 и МЭУ2 подключены параллельно к силовой шине, к которой подключены батарейный модуль (БМ) и нагрузка (на рис. 1 нагрузка не обозначена). АУ, содержащая в своем составе преобразователь постоянного напряжения (ППН), систему управления (СУ), аппараты пуска и защиты, предназначена для преобразования и регулирования электрической энергии постоянного тока, вырабатываемой ЭХГ, в электрическую энергию постоянного тока, передаваемую на силовую шину для питания нагрузки и зарядки БМ.

Цель исследования заключается в установлении характера протекания электромагнитных процессов в МЭУ, влияния параметров ППН, БМ и нагрузки на работу каждого МЭУ и системы в целом, выработке рекомендаций по оптимизации параметров исследуемой системы на основе результатов выполненных исследований.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики ЭХГ. Ряд 1 (верхняя кривая) – в начале ресурса ЭХГ, ряд 2 (нижняя кривая) – в конце ресурса ЭХГ.

Как видно из рис. 2, выходные напряжения ЭХГ при изменении тока в пределах от 0 до 110 А могут изменяться в пределах от 38 до 48 В. Выходные напряжения ППН равны напряжению силовой шины АНПА и должны быть в диапазоне от 42 до 59 В. Регулирование выходного напряжения ППН в заданных пределах должно осуществляться методом ШИМ [8, 9]. При указанных диапазонах изменения входных и выходных напряжений требуемые параметры

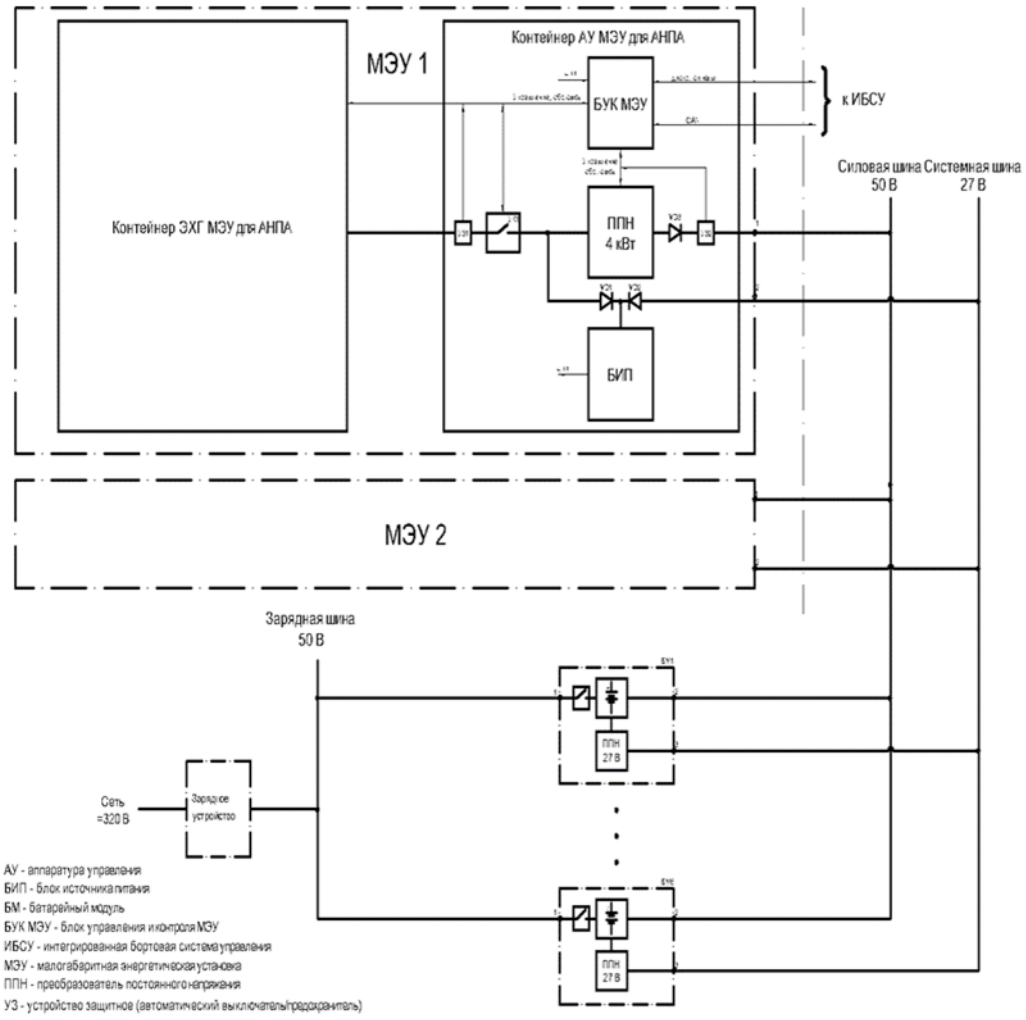


Рис. 1. Структурная схема системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата

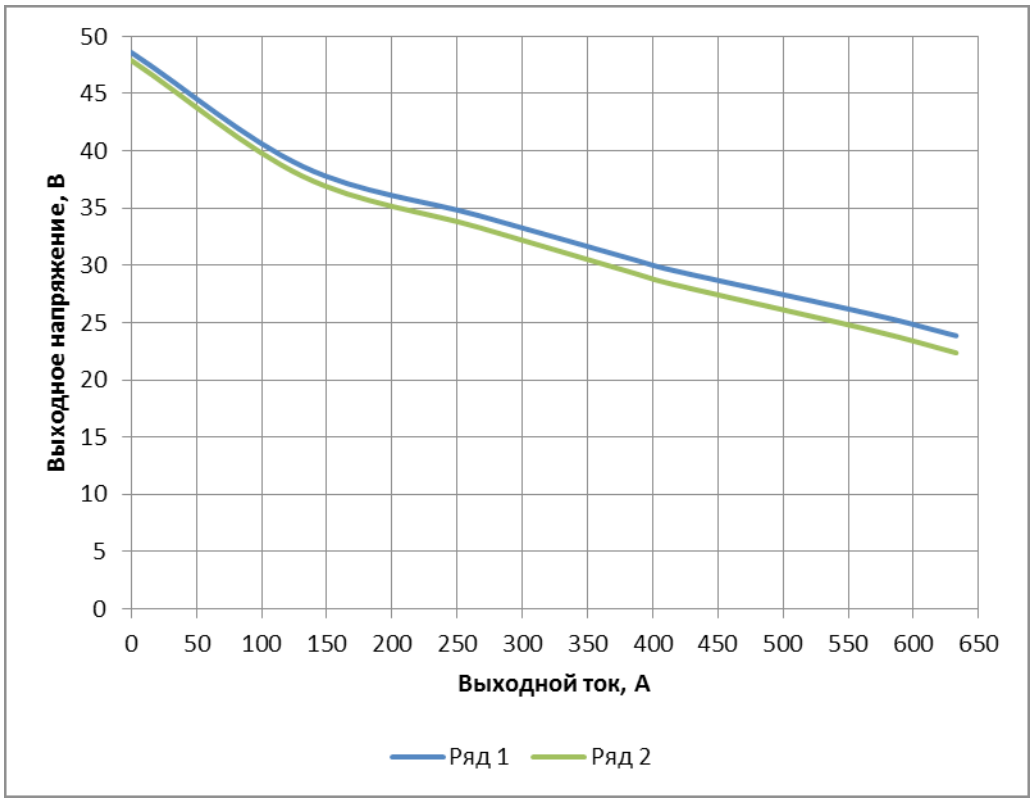


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ЭХГ: ряд 1 – в начале ресурса ЭХГ; ряд 2 – в конце ресурса ЭХГ

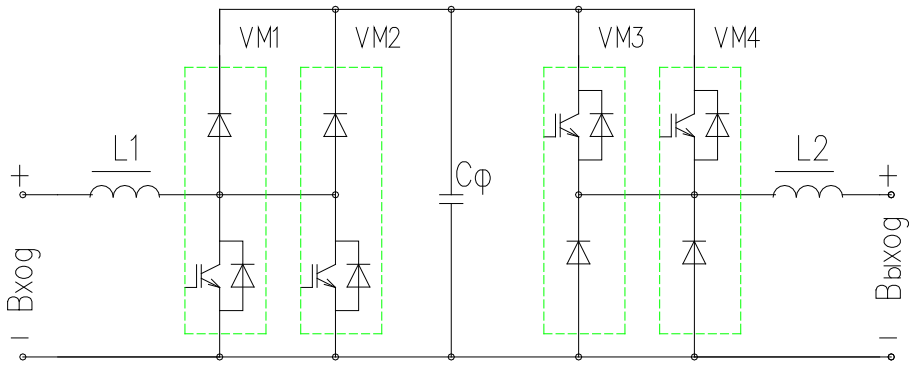


Рис. 3. Двухкаскадный преобразователь постоянного напряжения, выполненный по схеме $П_в$+$П_н$

ППН могут быть выполнены только при использовании каскадного принципа построения канала. Варианты структур ППН, отвечающие заданным условиям, следующие [8]:

– структура ($П_в$ + $П_н$) содержит последовательно соединенные повышающий ($П_в$) и понижающий ($П_н$) каскады (рис. 3);

– структура ($П_н$ + $П_в$) содержит последовательно соединенные понижающий и повышающий каскады.

Исследования, выполненные в [8], показали, что структура ($П_в$+$П_н$) и ($П_и$+$П_в$) имеют примерно равные КПД, но структура ($П_в$+$П_н$) является более предпочтительной, поскольку содержит реакторы на входе и выходе, которые ограничивают скорость нарастания тока короткого замыкания. Благодаря этому электронная защита системы энергообеспечения АНПА имеет возможность (по запасу времени) отключить ток короткого замыкания на уровне, не приво-

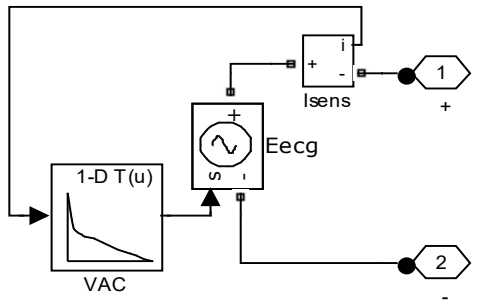


Рис. 4. Компьютерная модель ЭХГ

На рис. 5 представлена модель АУ с ППН, выполненном по схеме *Пв + Пн*.

Модель на рис. 6 включает в себя следующие элементы:

TM1 – TM4 – четыре транзисторных модуля;

L1 и *L2* – дроссели (*L1* = 7 мкГн, *L2* = 10 мкГн);

C2 – конденсатор (*C* = 72 мкФ);

C1 и *C3* – входной и выходной конденсаторы (*C1* = 24 мкФ, *C3* = 4 мФ);

Local control – система управления АУ;

U_{dc1}, U_{dc2}, I_{dc1}, I_{dc2} – датчики входных и выходных напряжений и токов;

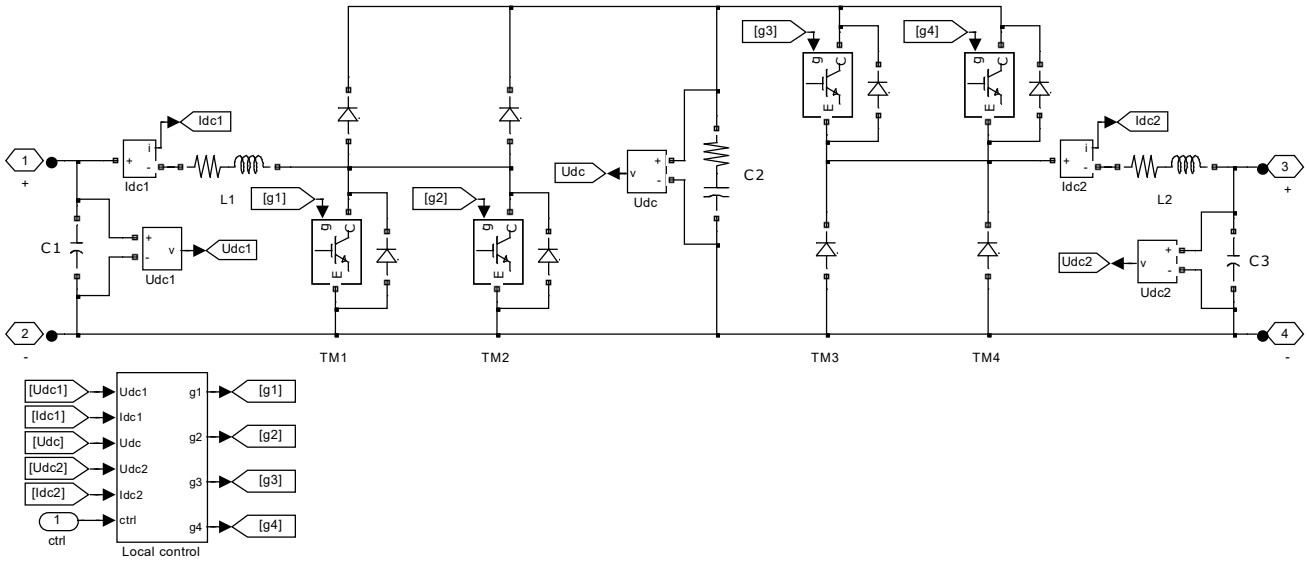


Рис. 5. Компьютерная модель АУ с ППН, выполненном по схеме $П_в$+$П_н$

дящем к выходу элементной базы системы энергообеспечения АНПА.

Методики, выбранные для проведения исследований

С использованием блоков библиотеки электротехнических элементов SimPowerSystems, интегрированной в пакет MATLAB – Simulink, была разработана компьютерная модель:

– структурной схемы алгоритма управления ППН, выполненного по схеме $П_в$+$П_н$;

– электрохимического генератора;

– вольт-амперной характеристики ЭХГ (ВАХ ЭХГ);

– АУ с ППН, выполненном по схеме $П_в$+$П_н$;

– аккумуляторной батареи и нагрузки.

Компьютерная модель ЭХГ приведена на рис. 4.

Модель включает в себя следующие элементы:

Eecg – управляемый источник напряжения;

Isens – датчик тока;

VAC – блок, определяющий напряжение ЭХГ по току нагрузки в соответствии с вольтамперной характеристикой ЭХГ.

U_{dc} – датчик напряжения на конденсаторе *C2*.

На рис. 6 представлена модель аккумуляторной батареи (АБ) и нагрузки.

Модель включает в себя следующие элементы:

SB – аккумуляторная батарея (С = 40 Ф);

Breaker – контактор для подключения и отключения нагрузки;

Load – активная нагрузка.

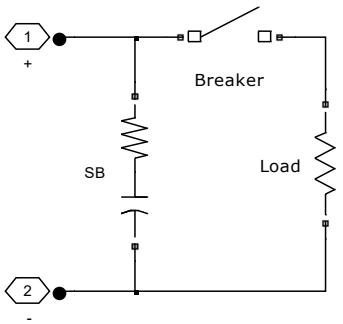


Рис. 6. Компьютерная модель АБ и нагрузки

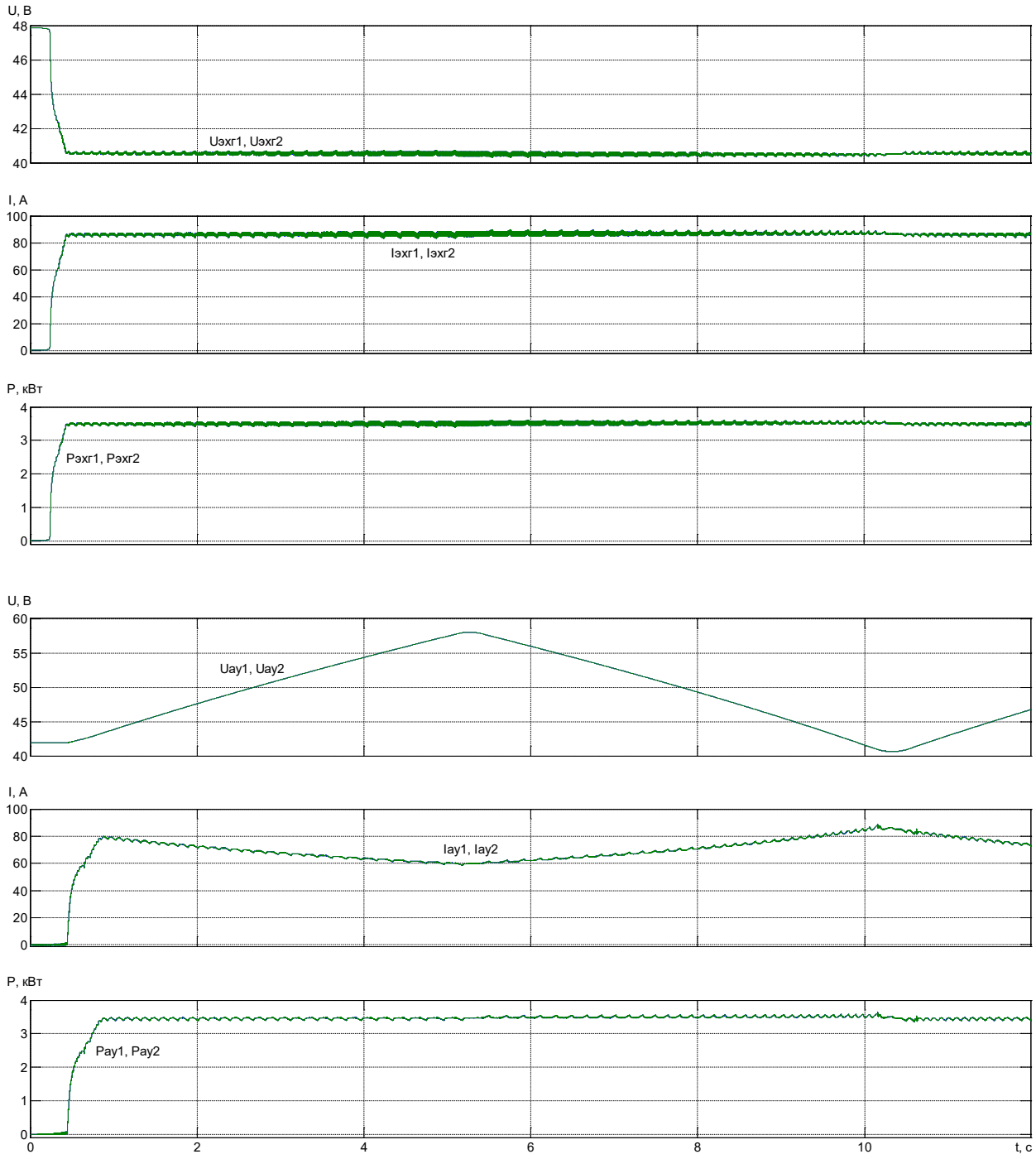


Рис. 7. Токи, напряжения и мощности на выходе ЭХГ1, ЭХГ2 и АУ1, АУ2

Результаты компьютерного моделирования электромагнитных процессов МЭУ

На рис. 7 представлены результаты моделирования электромагнитных процессов МЭУ при параллельном включении МЭУ1 и МЭУ2 по выходу на этапе начала ресурса ЭХГ и при поддержании заданной входной мощности и увеличении напряжения АБ с 42 до 59 В и его последующем снижении (вследствие подключения нагрузки) до 42 В.

На рисунках используются следующие обозначения:

$U_{эхг1}$, $U_{эхг2}$ – напряжения ЭХГ1 и ЭХГ2;

$I_{эхг1}$, $I_{эхг2}$ – токи ЭХГ1 и ЭХГ2;

$P_{эхг1}$, $P_{эхг2}$ – мгновенная мощность ЭХГ1 и ЭХГ2;

$U_{ау1}$, $U_{ау2}$ – напряжения на выходе АУ1 и АУ2;

$I_{ау1}$, $I_{ау2}$ – токи на выходе АУ1 и АУ2;

$P_{ау1}$, $P_{ау2}$ – мгновенная мощность на выходе АУ1 и АУ2.

Анализ результатов компьютерного моделирования электромагнитных процессов системы энергообеспечения АНПА

Компьютерное моделирование системы энергообеспечения АНПА показало:

– работоспособность системы в заданных пределах изменения напряжения АБ;

– равное распределение мощности цепи постоянного тока между двумя МЭУ как при установившемся режиме работы, так и в переходных режимах;

– возможность реализации режима плавного пуска МЭУ с заданной скоростью нарастания мощности;

Заключение

Выполненные исследования разработанной системы энергообеспечения АНПА показали, что характеристики системы полностью соответствуют заданным при разработке требованиям. Дальнейшее направление работ следует вести в направлении улучшения масса-габаритных характеристик АУ. Для решение этой задачи следует:

1. Использовать схему ППН только с одним каскадом, понижающим напряжение ($П_н$). В этом случае каскад, повышающий напряжение ($П_в$), исключается из состава каждого АУ. Благодаря этому уменьшается вес и габариты МЭУ, а также потери мощности и повышается КПД. Выполнить такое схемотехническое решение возможно путем предварительного согласования задания на разработку ЭХГ с заданием на выходные параметры МЭУ, а именно с выходным напряжением ППН. Выходное напряжение ЭХГ во всех режимах работы МЭУ должно быть достаточным для того, чтобы согласование величины выходного напряжения ЭХГ, напряжения АБ и нагрузки выполнялось бы только посредством понижения напряжения ЭХГ. Для реализации этого предложения необходимо использовать ЭХГ, ВАХ которого располагались бы выше примерно в 1,5 раза по сравнению с ВАХ ЭХГ, приведенной на рис. 2 для всех режимов работы ЭХГ.

2. Уменьшать массу и габариты дросселей и конденсаторов путем повышения рабочей частоты ППН. Однако увеличение рабочей частоты ППН приводит к увеличению потерь мощности в транзисторах и диодах силовой схемы и, следовательно, к уменьшению КПД МЭУ. Уменьшение потерь мощности в транзисторах и диодах можно достичь при использовании высокочастотных сильноточных транзисторов на кристаллах карбида кремния, обладающих сравнительно малыми значениями энергии включения и выключения транзистора. Необходимо, чтобы отечественная промышленность освоила производство таких транзисторов в комплекте с драйверами в возможно короткие сроки.

3. Уменьшать потери мощности на включение и выключение транзисторов, используя преобразователи постоянного напряжения с промежуточным резонансным высокочастотным инвертором. Обнадеживающие результаты такого решения приведены в работе [9].

Библиографический список

1. *Аваков В. Б., Ландграф И. К., Ковалевский В. П.* Экспериментальная стендовая доводка конструкции и эксплуатационных режимов твердооксидного электрохимического генератора мощностью около 1000 Вт // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 81 (365). С. 5–25.

2. Источники бесперебойного питания морского исполнения. URL: liveinternet. ru›users/enkom/post350001011 (дата обращения: 12.09.2018).

3. Источники бесперебойного питания (ИБП) морского исполнения. URL: Spectr-rs. ru. (дата обращения: 12.09.2018).

4. Источники бесперебойного питания. URL: a-energy. ru/ИБП (дата обращения: 12.09.2018).

5. Морские ИБП JOVYATLAS. URL: Jatlas. ru>node/353 (дата обращения: 12.09.2018).

6. *Скачков Ю. В., Белоусов О. А.* Перспективы применения электрохимического генератора в составе судовой ЭЭС // Судостроение. 2003. № 1 (746). С. 43–45.

7. От энергетики орбитального корабля «Буран» к энергетике космических кораблей и станций / В. И. Матренин, А. Т. Овчинников, Б. С. Поспелов и др. // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 57–65.

8. К выбору схемы полупроводникового преобразователя для согласования напряжений электрохимического генератора и нагрузки / А. А Мартынов, Е. А. Крутяков, В. К. Самсыгин и др. // Тр. Крыловского государственного научного центра. СПб., 2015. С. 209–227.

9. Расчет и моделирование преобразователя постоянного напряжения с промежуточным резонансным высокочастотным инвертором / А. А. Мартынов, В. К. Самсыгин, Д. В. Соколов и др. // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2018. Т. 4 (386). С. 139–148.

УДК 621.311.001.63-52(075.8)

В. А. Павлюков*
кандидат технических наук, доцент
С. Н. Ткаченко*
кандидат технических наук, доцент
А. В. Коваленко*
ассистент
**ГОУВПО Донецкий национальный технический университет*

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ПАНЕЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СХЕМ ВТОРИЧНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Предложен альтернативный графическому табличный способ идентификации кабельных связей панелей при проектировании схем вторичных коммуникаций с большим количеством кабелей и панелей. Выполнена его программная реализация в виде проектной процедуры САПР вторичных коммуникаций и апробация на примере проекта РЗА энергоблока мощностью 1000 МВт АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Ключевые слова: *схема вторичных коммуникаций с большим количеством кабелей и панелей, кабельные связи панелей, способ формирования связей панелей, САПР.*

V. A. Pavlukov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. N. Tkachenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. V. Kovalenko*
Assistant
**Donetsk National Technical University*

METHOD OF CABLE CONNECTIONS PANELS FORMING AT AUTOMATED DESIGN OF SECONDARY COMMUTATION SCHEMES

An alternative graphical tabular identification method of panels cable connections in the design of secondary commutations schemes with a large number of cables and panels are proposed. Its software implementation was carrying out in form of design procedure for CAD of secondary commutationand approbation on the example of the design of relay protection and automation system for a 1000 MW power unit of a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor.

Keywords: *secondary communications scheme with big quantities of cable and panels, cable connections of panels, method of links connections forming, CAD.*

Постановка задачи

При проектировании схем вторичных коммуникаций одним из выходных документов является схема кабельных связей панелей. Она включает обозначения панелей и связывающих их кабелей. Пример такой схемы для проекта линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 150 кВ приведен на рис. 1. На этой схеме 24 кабельные связи с 32 кабелями соединяют 23 панели.

Однако в случае проектирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) основных элементов электроустановок, таких как ЛЭП напряжением 330 кВ и более, энергоблоков большой единичной мощности и др. количество взаимосвязанных панелей и кабельных связей между ними становится настолько большим, что графическое их представление становится затруднительным. Так, например, в одном из проектов РЗА энергоблока мощностью 1000 МВт количество панелей составило 146, кабелей 401 в 304 связях между панелями, что не позволило сформировать традиционную схему взаимосвязей панелей.

Цель статьи

Описание альтернативного графическому нового табличного способа формирования кабельных связей панелей при проектировании схем вторичных коммуникаций с большим количеством кабелей и панелей.

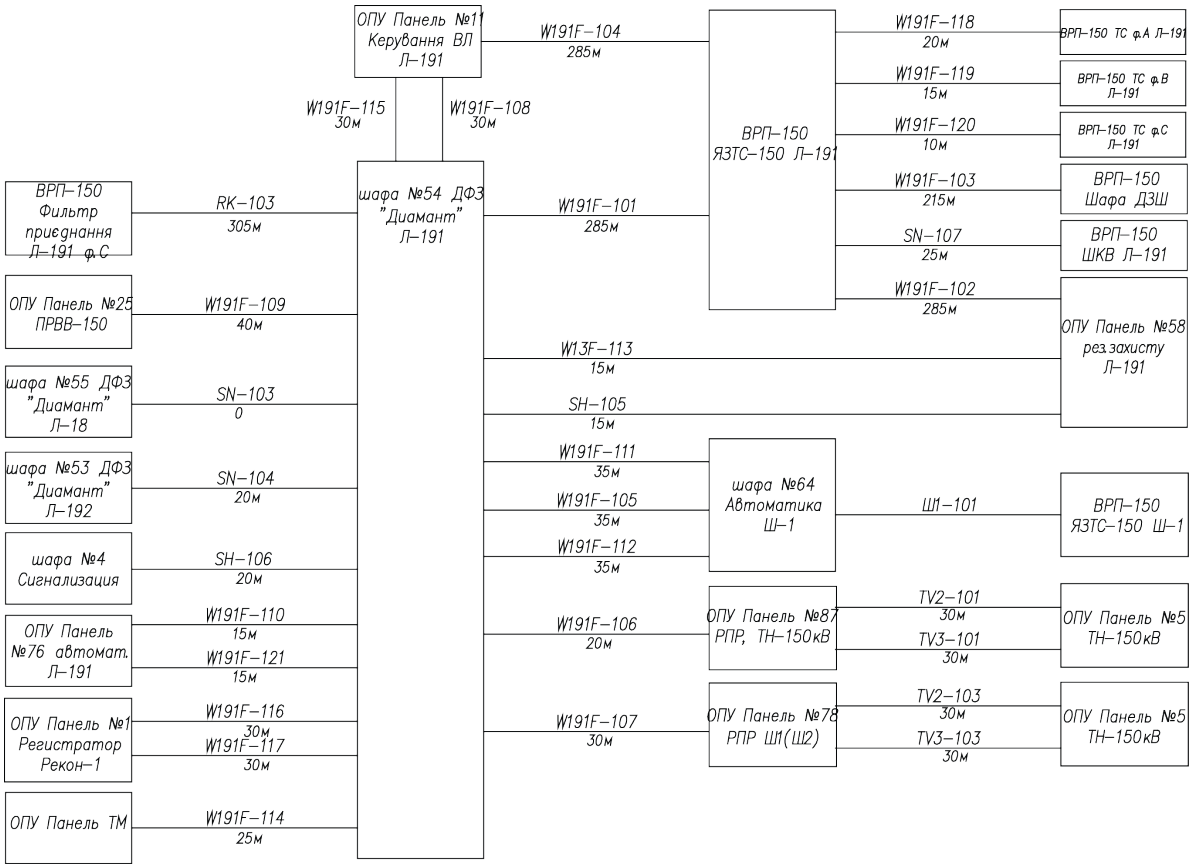


Рис. 1. Пример проектного документа схемы кабельных связей панелей

Изложение основного материала

Для такого рода проектов авторами предлагается альтернативный табличный способ идентификации кабельных связей. Он реализован в виде отдельной проектной процедуры САПР схем вторичных коммуникаций. Последнее создано в среде стандартного пакета автоматизации AutoCAD с использованием его внутренних алгоритмических языков [1–3]. Рассматриваемая система автоматизации реализована в среде стандартного пакета автоматизации AutoCAD. В пространстве модели AutoCAD создается схема электрическая принципиальная, расширенная изображениями клемм панелей (СЭПР) [4]. В этих схемах жилы кабелей связи панелей изображаются ортогональными отрезками прямой или полилиниями с ортогональными прямолинейными участками. Идентификация жил кабелей выполняется установкой на изображающие их линии графических блоков (ГБ) с именем «birka». Блок выполнен в виде точки с видимыми атрибутами марок жилы и кабеля, в который входит жила. Пример изображения жил кабельных связей показан на рис. 2.

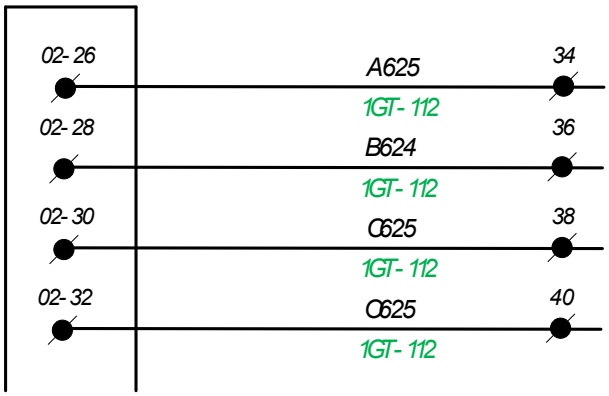


Рис. 2. Фрагмент СЭПР с жилами кабелей и идентифицирующими их графическими блоками

Атрибут марки жилы расположен выше точки ГБ. Его текстовое значение вводится при формировании СЭПР и является обязательным параметром ГБ. Марка кабеля вставляется программно во второй атрибут, расположенный ниже точки, в результате выполнения пользователем проектной процедуры распределения жил по кабелям.

Все элементы панелей и их внутри панельные гальванические связи размещаются на отдельных слоях рисунка СЭПР. По своим концам линии, изображающие жилы кабелей, соединяют клеммы смежных панелей. По слоям размещения этих клемм программно определяются панели, связываемые данной жилой кабеля.

Все панели проекта разбиваются на две группы: создаваемые и существующие. Все элементы

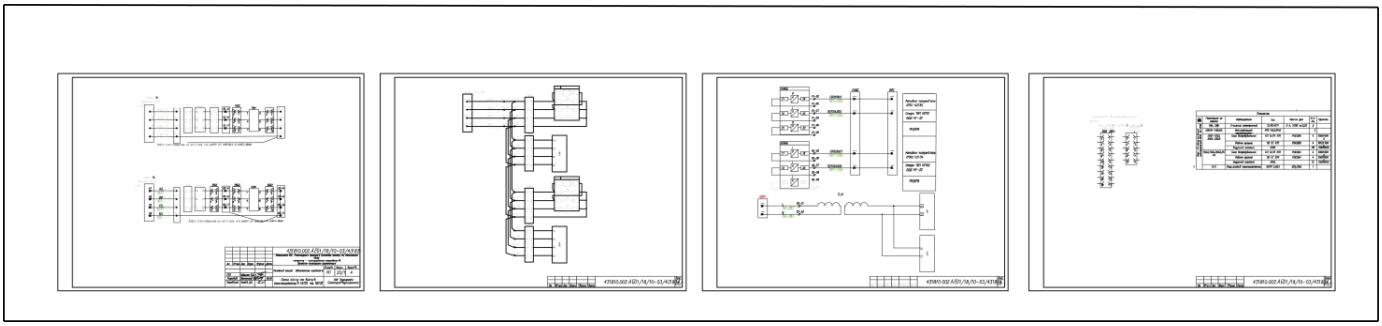


Рис. 3. Пример СЭПР создаваемой панели

СЭПР создаваемых панелей группируются обособленно и заключаются в идентифицирующий их прямоугольник, как это показано на рис. 3. Кроме того, более мелкие фрагменты СЭПР помещаются в форматы А3. СЭПР, созданная таким образом, начинает выполнять две функции: математической модели и выходного проектного документа.

Общая структурная схема алгоритма формирования таблицы кабельных связей приведена на рис. 4. В соответствии с ней вначале с предварительно сформированной СЭПР производится считывание данных ГБ клемм, а затем бирок жил кабелей. По этим данным формируются списки обозначений панелей (Pnl), клемм (Klm) с обозначениями клеммы, ее панели и точки вставки ее ГБ, а также бирок жил кабелей (brk) с обозначениями жилы, ее кабеля и точки вставки ее ГБ.

В цикле по всем элементам списка brk по точке вставки ГБ «birka» с помощью вспомогательного уголка выбора (рис. 5) находится связанный с ГБ ортогональный отрезок прямой (полилинии).

По координатам конечных точек отобранного отрезка прямой (полилинии) из списка Klm выбираются клеммы с ближайшими к этим точкам координатами точек вставки их ГБ. По слоям размещения отобранных клемм определяются панели, связываемые рассматриваемой жилой кабеля. По этим данным формируется список связей панелей для всех кабелей СЭПР с именем Kc.

С помощью полученного списка Kc в цикле по всем p-тым панелям списка Pnl определяются панели, связанные с рассматриваемой p-той. Найденные панели, объединенные в отдельные подсписки, вместе с обозначением p-той панели и длиной подсписка заносятся в новый список связей панелей ssv. Список ssv сортируется по убыванию количества взаимосвязанных панелей. На следующем этапе из списка ssv исключаются дублирующие связи панелей, и он преобразуется в новый список ssvp. Список ssvp содержит информацию о дереве связей панелей.

На заключительном этапе по данным спискам ssvp и Pnl во вложенном цикле вначале по

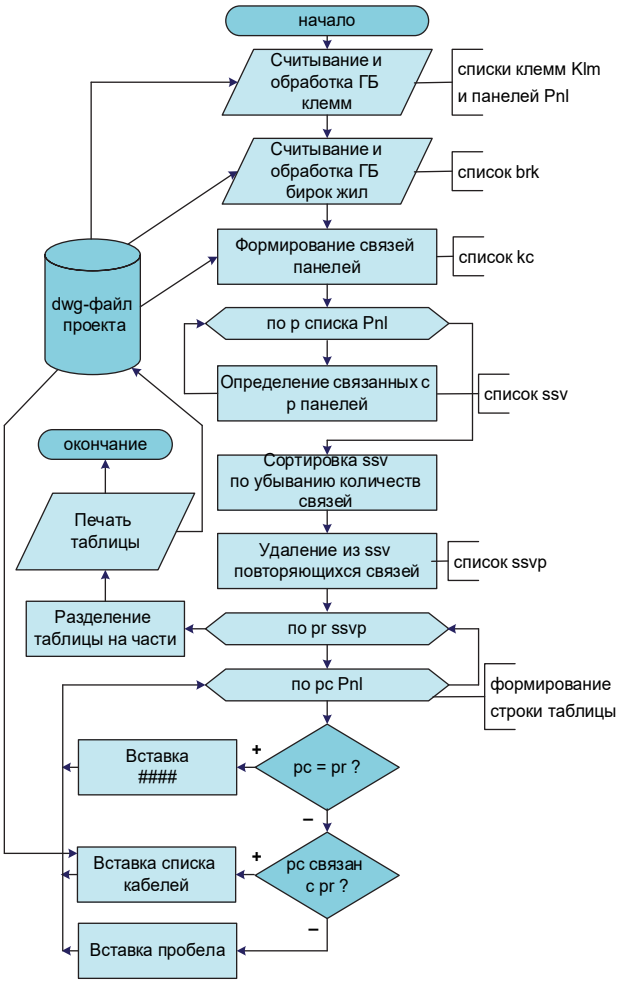


Рис. 4. Блок-схема формирования таблицы кабельных связей панелей

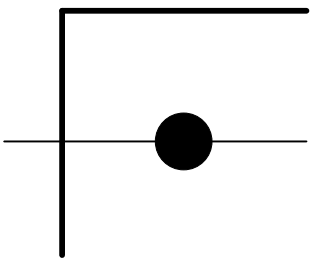


Рис. 5. Пример вспомогательного уголка для выбора ортогональной линии, связанной с блоком «birka»

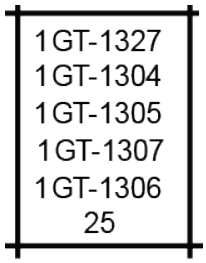


Рис. 6. Пример заполнения ячейки таблицы кабельных связей панелей

элементам списка ssvp, а затем Pnl последовательно формируются строки итоговой таблицы кабельных связей панелей. При этом в случае совпадения панелей по горизонтали и вертикали в ячейку таблицы устанавливается символьное выражение «####», идентифицирующее диагональный элемент таблицы. При наличии связи между панелями по горизонтали и вертикали в ячейку таблицы устанавливается список кабелей этой связи и длина кабельной трассы в метрах. На рис. 6 приведен пример заполнения ячейки таблицы со связью, содержащей 5 кабелей, и длиной трассы в 25 м.

Информация о длинах кабельных трасс программно извлекается из внутренней библиотеки рисунка AutoCAD с именем «LCnct». Данные о длинах кабельных трасс в указанную библиотеку заносит пользователь на начальном этапе формирования СЭПР.

В заголовках столбцов таблицы размещаются обозначения всех панелей, размещенных в порядке убывания количества связей с другими панелями. Первый столбец таблицы содержит обозначения панелей из их дерева графа (список ssvp).

Таблица по ширине программно разбивается на части по 50 колонок в каждой исходя из необходимости последующего их размещения на форматы А1. Отдельные части таблицы формируются с помощью табличного графического примитива ACAD_TABLE. Это позволяет пользователю выполнять итоговое редактирование таблиц (изменять ширину отдельных столбцов, изменять стиль и цвет текста и др.).

Ниже на рис. 7 приведен фрагмент таблицы кабельных связей панелей в проекте РЗА энергоблока мощностью 1000 МВт АЭС. Вся таблица имеет 146 (по количеству панелей) колонок и только 32 строки. По ширине она программно разбита на три части. В первой и частично во второй ее частях размещается информация о дереве связей панелей (первая часть содержит 192 связи, вторая – 64). Третья часть таблицы содержит данные о листьях дерева графа. В нее помещены только 46 связей.

Кабельные связи панелей													
	ПКБ1	ПКБ2	ПК1ТТ	ПКТН	Пн1	Пн3	Пн8	Пн6	Пн14	ШРП	Пн10	Пн7	ПК2ТТ
ПКБ1	#####	1GT-1316 10			1GT-179 25	1GT-1083 1GT-1082 1GT-1081 25	1GT-1094 1GT-1093 1GT-1092 25	1GT-183 25	1GT-1328 1GT-1061 25	1GT-1160 120	1GT-1310 1GT-1308 1GT-1309 25	1GT-1023 1GT-1022 30	
ПКБ2		#####		1GT-1156 125	1GT-1072 10	1GT-1086 1GT-1084 1GT-1085 20	1GT-1089 1GT-1091 1GT-1090 25	1GT-1073 25	1GT-1060 25		1GT-1312 1GT-1311 25	1GT-1075 25	
ПК1ТТ			#####	1GT-263 25	1GT-101 120			1GT-120 110	1GT-139 110				
ПКТН				#####	1GT-112 1GT-113 110			1GT-116 1GT-117 105	1GT-1107 1GT-1105 1GT-1106 120			1GT-130 1GT-131 110	
Пн1					#####			1GT-172 1GT-173 20	1GT-176 25			1GT-171 1GT-170 20	1GT-111 1GT-110 110
Пн3						#####		1GT-1319 40			1GT-1078 1GT-1077 30	1GT-1031 1GT-1030 25	
Пн8							#####				1GT-1012 1GT-1088 1GT-1087 30	1GT-1321 1GT-1007 10	
Пн6								#####	1GT-189 25		1GT-184 25	1GT-1320 1GT-1006 1GT-188 10	1GT-121 110
Пн14									#####	1GT-1103 1GT-1104 1GT-1102 1GT-1101 110	1GT-1063 20		
ШРП										#####			

Рис. 7. Пример фрагмента таблицы кабельных связей панелей

Пн 11	1EZ02	1EZ04	ПКТН6
1GT-1314 1GT-1313 20			1GT-1157 120
1GT-107 1GT-108 130			1GT-262 25
1GT-1154 1GT-1153 110			
	0	0	1GT-114 1GT-115 110

Рис. 8. Пример ячеек таблицы кабельных связей панелей с отсутствующими марками кабелей

Для получения данных о кабелях связи, например панели № 1, необходимо стать на символ «####» в пересечении горизонтали и вертикали этой панели и затем выбрать данные кабелей вверх по столбцу и вправо по строке от указанного символа.

Следует отметить, что такая форма представления информации о кабельных связях панелей не содержит избыточной информации, так как данные о кабелях связи двух панелей находятся только в одной ячейке таблицы.

Кроме того, с помощью таблицы кабельных связей может быть выполнена диагностика правильности формирования СЭПР. Так, если в какой-либо ячейке отсутствуют обозначения кабелей, а приведена только их длина, это указывает на то, что при предшествующей обработке схемы пользователь не выбрал кабель и не выполнил распределение в него жил для этой связи. Пример таких ячеек приведен на рис. 8. По ячейкам с отсутствующими марками кабелей (последняя строка фрагмента таблицы, соответствующая панели «Пн 1») было определено отсутствие выбора кабеля между панелью «Пн 1» и панелями «1EZ02», «1EZ04».

В заключение отметим, что предложенный табличный способ формирования кабельных связей может применяться как для всей совокупности устройств РЗА проекта, так и наряду с традиционными схемами для отдельных создаваемых его панелей. Пример таблицы кабельных связей для наиболее сложной схемы РЗА (создаваемой панели Пн 14 с 29 панелями) рассматриваемого проекта приведен на рис. 9.

Таблица связей на рис. 9 при 30 столбцах имеет только 6 строк. Дерево графа размещено в первых 11 столбцах (часть а), а в 18 последующих – листья дерева графа (часть б). Последние характеризуются только одной кабельной свя-

а)

	Пн 14	ШРП	фВ КАГ Р	фВ КАГ В	фА КАГ В	ПКБ 1	НУ39	НУ32	ЗН 2С	фС КАГ Р	фА КАГ Р	фС КАГ В
Пн 14	#####	1GT-1103 1GT-1104 1GT-1102 1GT-1101 110				1GT-1328 1GT-1061 25	1GT-305 145	1GT-303 1GT-304 140				
ШРП		#####	1GT-246 20	1GT-247 10	1GT-238 20	1GT-1160 120			1GT-239 20	1GT-245 20	1GT-231 25	1GT-241 20
фВ КАГ Р			#####							1GT-232 5	1GT-233 5	
фВ КАГ В				#####	1GT-236 5							1GT-235 5
фА КАГ В					#####				1GT-265 25			
НУ39							#####	1GT-270 25				

б)

1EZ04	1EZ02	Пн 16	Пн 10	Пн 6	Пн 1	ПКБ 2	ЗН 3	Пн 350	ЗН 2В	ЗН 2А	ЗН 1С	ЗН 1В	ЗН 1А	ПК1ТТ	Пн 13	Пн 5	ПКТН
1EZ04-060	1EZ02-060	1GT-1011 1GT-1062 10	1GT-1063 20	1GT-189 25	1GT-176 25	1GT-1060 25		1GT-138 860						1GT-139 110	1GT-1323 1GT-1010 1GT-1065 10	1GT-1064 25	1GT-1107 1GT-1105 1GT-1106 120
							1GT-242 20		1GT-237 20	1GT-234 20	1GT-243 20	1GT-244 20	1GT-240 20				

Рис. 9. Пример таблицы кабельных связей панелей для отдельной создаваемой панели: а) связи панелей дерева графа; б) связи панелей листьев дерева графа

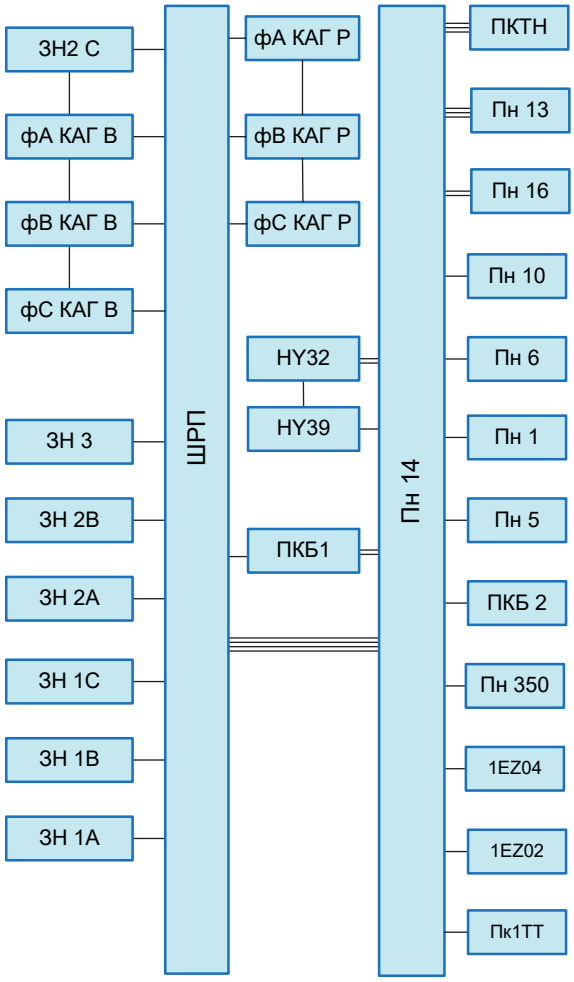


Рис. 10. Схема кабельных связей создаваемой панели Пн14

зью с другой панелью. Для сопоставления двух способов идентификации взаимосвязей панелей на рис. 10 приведена соответствующая таблице рис. 9 схема кабельных связей этой же создаваемой панели.

На рис. 10 каждой линии в связях панелей соответствует один кабель.

Выводы

1. Предложен альтернативный графическому табличный способ формирования кабельных связей панелей при проектировании схем вторичных коммуникаций с большим количеством кабелей и панелей.

2. Из таблицы исключена дублирующая информация о кабельных связях, что делает ее читабельной при большом количестве столбцов и строк.

3. Таблица кабельных связей может применятся для диагностирования ошибок при формировании СЭПР вторичных коммуникаций.

4. Выполнена программная реализация предложенного табличного способа формирования кабельных связей панелей в виде отдельной проектной процедуры САПР схем вторичных коммуникаций.

5. Выполнена апробация предложенного способа идентификации кабельных связей панелей на примере проекта РЗА энергоблока мощностью 1000 МВт АЭС, содержащего 146 панелей и 401 кабель в 304 кабельных связях между панелями.

Библиографический список

1. *Павлюков В. А.* Учебная САПР электрической части станций и подстанций: уч. пособие. Харьков: ФЛП Панов А. Н., 2016. 124 с.

2. *Павлюков В. А.* Разработка САПР электрической части станций и подстанций для учебного процесса / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко, А. В. Коваленко // Завалишинские чтения'2018. СПб.: ГУАП, 2018. 145–153 с.

3. *Павлюков В. А.* Применение САПР для учебного проектирования распредустройств электростанций и подстанций / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко, А. В. Коваленко // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-техн. статей / Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; Образовательно-научный институт электроэнергетики, 2018. С. 273–278.

4. *Беляев А. В.* Вторичная коммутация в распределительных устройствах, оснащенных цифровыми РЗА Ч. 1. М.: НТФ Энергопрогресс, 2009. 80 с.

УДК 621.311.2

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
Н. И. Пруссак*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕГРАЦИИ ORC-МОДУЛЕЙ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Энергетика всего мира в данный момент переживает масштабные изменения, связанные с интеграцией высокоэффективных решений, в том числе в области генерации энергии. Наиболее перспективной технологией в данной области обладают ORC-установки. В работе рассмотрена актуальность проблемы, описана сама технология и приведен пример интеграции решения на существующий энергообъект.

Ключевые слова: *органический цикл Ренкина, энергетика, когенерация, высокоэффективные способы производства энергии.*

O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
N. I. Prussak*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF THE FEATURES OF ORC-MODULES INTEGRATION INTO EXISTING ELECTRIC POWER SYSTEMS

The energy industry of the whole world is currently undergoing large-scale changes related to the integration of highly efficient solutions, including the area of energy generation. The most promising technology in this area are ORC modules. The paper discusses the relevance of the problem, describes the technology itself and provides an example of integrating the solution into an existing power facility.

Keywords: *organic Rankine cycle, energy, cogeneration, highly efficient methods of energy production.*

Мировая энергетика сегодняшнего дня формирует особые тенденции и направления, которые невозможно было представить еще некоторое время назад. Ставка на переход от централизованной к распределенной генерации, особенные требования к экологичности при производстве энергии, максимально полное и эффективное использование энергоресурсов, в том числе вторичных, а также положительный экономический эффект от инвестиций в проекты – все это является основными векторами, которым следует отрасль сегодня.

Существует колоссальное число решений для генерации энергии в настоящий момент, но лишь малая их часть удовлетворяет вышеназванным условиям. Лидером и наиболее перспективным направлением развития в этой области по праву считается когенерация, позволяющая получать несколько видов энергии из одного первичного энергоресурса.

Специфика энергетического сектора экономики нашей страны до недавнего времени не позволяла дать существенный толчок развитию технологий когенерации, которая в своем большинстве представлена лишь теплофикационными установками на крупных энергообъектах. Однако в последние несколько лет в России на государственном уровне стали появляться нормативные акты, документы, стратегии и программы, однозначно формирующие требования к генерации энергии сегодня. Это обстоятельство, а также достаточно внушительный положительный опыт эксплуатации различных когенерационных проектных решений за рубежом является определяющим фактором формирования направления широкой интеграции когенерационных установок на энерго- и иные объекты нашей страны.

Говоря более детально, энергетика России в ближайшем будущем должна отвечать принципам, целям и задачам, указанным в четырех основополагающих нормативных документах, которыми являются:

1. План деятельности Минэнерго России.

2. Доктрина энергетической безопасности РФ.

3. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики».

4. Энергетическая стратегия России.

Несмотря на кажущуюся разнородность этих нормативных документов, в каждом из них сформированы единообразные векторы развития энергетики нашей страны. Приводя их к общему виду, можно выделить три основных принципа, которые призваны регулировать и формировать энергетический сектор России в ближайшем будущем:

1. Высокая эффективность, инновационность и технологичность.

2. Экологичность. Однозначное снижение воздействия человека на окружающую среду при реализации мероприятий топливно-энергетического комплекса.

3. Экономическая эффективность и снижение уровня энергоемкости ВВП.

Данные принципы в очередной раз подтверждают колоссальную значимость когенерации в энергетике ближайшего будущего нашей страны.

Когенерация – это термодинамическое производство двух форм полезной энергии из единственного первичного энергоресурса. Наиболее часто встречающиеся виды комбинированной генерации – это когенерация в традиционном понимании, при которой реализуется совместная выработка электроэнергии и тепла, а также тригенерация, позволяющая в дополнение производить холод в абсорбционных чиллерах. В основе когенерации лежит принцип максимального использования энергии первичного топлива, благодаря чему существенно вырастает коэффициент полезного действия, коэффициент использования теплоты топлива, обеспечивается существенная его экономия, а также повышается уровень экологичности процесса производства энергии.

В состав когенерационной установки, как правило, входит следующее основное оборудование:

1. Первичный двигатель, в качестве которого может выступать паровая турбина, газовая турбина, двигатель внутреннего сгорания, а в перспективе могут использоваться и новые виды двигателей.

2. Электрический генератор.

3. Система утилизации тепла, в которую входит оборудование для дополнительной выработки тепла и/или электроэнергии.

4. Система контроля и управления.

Когенерация (ранее использовали термин «теплофикация») известна достаточно давно в централизованном энергообеспечении. Дело в том, что существует достаточное количество ТЭЦ, работающих на производство как электрической, так и тепловой энергии, при этом в качестве установок используются, как правило, широко известные парогазовые установки – ПГУ, а также паровые турбины с теплофикационным отбором.

Однако в настоящий момент все более значимым и популярным явлением становится распределенная энергетика. Особую популярность набирают блочные мини-ТЭЦ, обладающие огромным количеством преимуществ перед централизованными системами. Когенерационная установка в таком случае может работать как используя энергию первичного энергоресурса, так и в режиме, когда источником энергии является тепловая энергия выхлопа двигателей внутреннего сгорания, газовых и паровых турбин, тепловая энергия технологических процессов, а также тепловая энергия установок альтернативной энергетики. Спрос на развитие распределенной энергетики и увеличение ее доли в общей генерации электрической и тепловой энергии подтверждается тем, что это является одной из приоритетных задач согласно Энергетической стратегии России [1].

Среди всех существующих сегодня решений в области когенерации наиболее перспективны, поэтому представляют огромный интерес установки, работающие по органическому циклу Ренкина – ОРЦ. Он представляет собой классический цикл Ренкина, основанный на использовании органического рабочего тела, в качестве которого может выступать пентан (переходит в газообразное состояние при температуре +36°С при атмосферном давлении), бутан, пропан и т. д., имеющего более низкую, чем у воды, температуру кипения. Таким образом, появляется возможность использования низкопотенциального и иного тепла, источник которого имеется почти на всех производствах, энергообъектах и т. д., для совершения полезной работы в данных установках, а именно для выработки электрической и тепловой энергии. Использование органического рабочего тела имеет следующие преимущества:

1. Более низкая, чем у воды, температура кипения.

2. Отсутствие сложного водоподготовительного оборудования.

3. Отсутствие проблемы коррозии механических частей турбины.

4. Возможность работы при крайне низких температурах.

Области применения ORC-установок отличаются широким разнообразием (рис. 1). При этом турбины, работающие по органическому циклу Ренкина, не только закрывают нишу, в которой невозможно и неэффективно использовать дру-



Рис. 1. Преобразование энергии в когенерационной установке ОРЦ

гие тепловые машины, но и зачастую являются их конкурентами с явным преимуществом. Одним из примеров может служить применение ORC-установок вместо паровых турбин в нефтегазовом секторе на УППН [2] и компрессорных станциях для обеспечения, к примеру, собственных нужд в электроэнергии и тепле.

Принцип работы простейшей ORC-установки (рис. 2) заключается в следующем: источник тепловой энергии (ИТЭ), виды которого были приведены выше, поступает в теплообменник (котел-утилизатор), в котором происходит парообразование низкокипящего рабочего тела (НРТ), при этом в зависимости от параметров ИТЭ может использоваться также промежуточный теплоноситель – термическое масло, которое более устойчиво при достаточно высоких температурах (например, выхлоп газотурбинной установки имеет температуру около 500 °С). Затем НРТ в газообразном состоянии по трубопроводу поступает в турбину, где, расширяясь, совершает механическую работу. Вал турбины жестко соединен с валом электрогенератора – вырабатывается электрическая энергия. Отработавший пар поступает в конденсатор, где передает тепловую энергию охлаждающей жидкости, например воде. Далее насосом, поддерживающим рабочее давление в контуре, НРТ снова направляется в теплообменник. Цикл замкнут.

Бес сомнения, ORC-установки обладают рядом преимуществ, такими как:

1. Возможность использования низкопотенциальной тепловой энергии для дополнительной выработки электроэнергии и тепла.
2. Полностью автономная работа.
3. Отсутствие сложной системы подготовки и прогрева.
4. Широкая сфера применения.
5. Относительная дешевизна и малые сроки внедрения установки.
6. Блочно-модульное исполнение.
7. Экологически чистое производство энергии.
8. Длительный срок службы и высокая эксплуатационная надежность.

Интеграция ОРЦ-модулей на существующие энергообъекты не представляется сложной задачей. Благодаря огромному мировому опыту внедрения данных установок на совершенно различные объекты – от промышленных предприятий, где утилизируется тепло производственных процессов, до использования тепловой энергии выхлопа первичных двигателей, а также широкой линейке модулей ОРЦ, которые могут удовлетворить любые требования по электро- и теплогенерации, конечный проект пред-

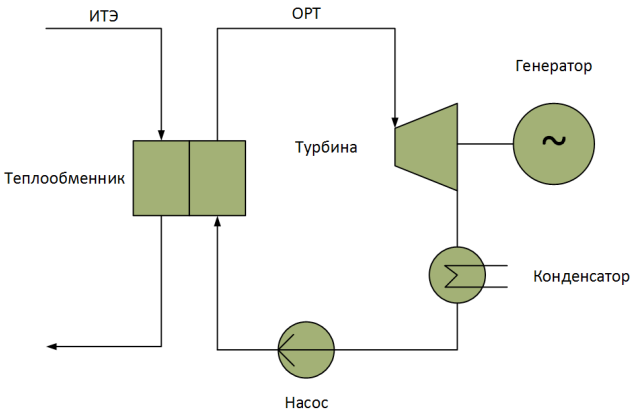


Рис. 2. Принцип работы простейшей ОРЦ-установки



Рис. 3. Внешний вид выбранной ОРЦ-установки

Таблица 1

Параметры газопоршневой установки

Входные параметры	
Значения температур высокотемпературного контура промежуточного теплоносителя (вход/выход), °С	310/250
Значения температур низкотемпературного контура промежуточного теплоносителя (вход/выход), °С	250/130
Суммарная подводимая тепловая мощность, кВт	5135
Выходные параметры	
Температура горячей воды в выходном контуре (вход/выход), °С	60/80
Тепловая мощность, подводимая к контуру горячей воды, кВт	4095
Электрическая мощность нетто, кВт	949
Электрический КПД нетто, %	18,5
Электрический генератор	Трехфазный синхронный, 50 Гц, 400 В

ставляет собой высокоэффективное решение, соответствующее всем современным требованиям.

В качестве примера реализации интеграционного проекта рассмотрим установку модулей ОРЦ на мини-ТЭЦ одного из российских заводов [3]. Завод планирует увеличение производственных мощностей, однако существующие городские сети не могут обеспечить эти потребности. Таким образом, было принято решение о введении четырех газопоршневых установок, каждая мощностью около 1 МВт (954 кВт). Но с учетом дальнейшего расширения предприятия, а также его потребности в надежном и эффективном теплоснабжении совершенно рационально и экономически оправдано использование модулей ОРЦ для утилизации тепловой энергии выхлопа газопоршневых установок и генерирования дополнительной электро- и теплоэнергии для собственных нужд завода.

На рассмотрение возьмем одну из газопоршневых установок. Ею является Siemens SGE-56SL. Основными параметрами для выбора модуля ОРЦ будут являться температура выхлопа, составляющая для данной модели 357 °С, и полная тепловая мощность – 1357 кВт. Получается, что четыре газопоршневые установки обеспечат около 5428 кВт тепловой мощности. Исходя из данных величин выбирается установка компании TURBODEN (Италия), являющаяся мировым лидером в области проектов с ОРЦ, модель – 10 CHP (когенерационная), внешний вид которой изображен на рис. 3.

Основные параметры выбранной установки приведены в табл. 1 [4].

Выбор рабочего тела установки ОРЦ определяется индивидуально с учетом набора критериев. Очень часто такие установки используют для работы параллельно с сетью, к примеру, для питания близлежащих небольших населенных пунктов, жилых зданий и объектов промзон [5]. В таком случае для передачи электроэнергии с минимальными потерями необходимо использовать повышающий трансформатор. Допустим, мощность, необходимая для передачи потребителям, составляет 800 кВА. Тогда мощность трансформатора должна составлять:

$$S_{тр} = \frac{S_{нг}}{(0{,}5-0{,}75)} = \frac{800}{(0{,}5-0{,}75)} = 1066-1600 \text{ кВА}.$$

Таблица 2

Параметры силового трансформатора

Параметр	Величина
Номинальная мощность, кВА	1250
Номинальное напряжение НН/ВН, кВ	0,4/10
Потери холостого хода, Вт	1350
Потери короткого замыкания, Вт	13250
Напряжение короткого замыкания, %	6
Ток холостого хода, %	1,2

Таким образом, выбирается трансформатор ТМ-1250/10-12 производства завода «Электрощит-Самара» со сниженными значениями потерь холостого хода и короткого замыкания. Его основные параметры представлены в табл. 2 [6].

Следующий шаг – выбор автоматического выключателя для распределительного устройства 10 кВ. Для этого необходимо рассчитать токи короткого замыкания в проектируемой системе в заданной точке. Удобнее всего это сделать в программном комплексе EnergyCS – EnergyTKZ [7]. Результаты расчета токов короткого замыкания представлены на рис. 4 и в табл. 3.

Выбирается вакуумный выключатель ВБЭ-10-20/630 УХЛ2, который удовлетворяет критериям, определяющим его отключающую способность, со следующими основными характеристиками (табл. 4) [8].

Реализация системы защиты требует также выбора установок релейной защиты. В качестве устройств релейной защиты выберем устройства

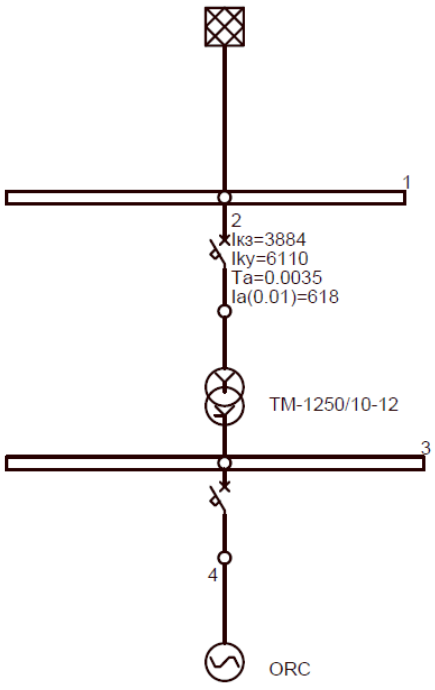


Рис. 4. Результаты расчета токов КЗ в программе EnergyTKZ

Таблица 3

Результаты расчета токов короткого замыкания

Параметр	Величина
Ток трехфазного КЗ, А	3884
Ударный ток КЗ, А	6110
Апериодическая составляющая тока КЗ (0,01 с), А	618

Таблица 4

Параметры вакуумного выключателя

Параметр	Величина
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальный ток, А	630
Номинальный ток отключения, кА	20
Ток электродинамической стойкости, кА	51
Ток термической стойкости, кА	20
Время протекания тока термической стойкости, с	3
Собственное время отключения, не более, мс	40

с относительной селективностью и токовой защитой (максимальной токовой защитой (МТЗ) и токовой отсечкой (ТО)).

Расчетные установки с учетом принятых коэффициентов самозапуска, возврата реле и надежности будут равны:

для МТЗ:

$$I_{МТЗ} = \frac{k_н \cdot k_{ср} \cdot 2I_{рл}}{k_в} = \frac{1{,}2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 60}{0{,}8} = 360 \text{ А},$$

выдержка времени t = 0,5 с;

для ТО:

$$I_{МТЗ} = k_н \cdot I_{кз} = 1{,}2 \cdot 3884 = 4660 \text{ А},$$

время срабатывания – мгновенное.

Подводя общий итог, можно с уверенностью сказать, что реализация когенерационных проектов, особенно с применением современных решений, в числе которых самыми перспективными и имеющими наиболее широкую область интеграции являются установки ОРЦ, поможет добиться всех целей и задач, поставленных в области генерации энергии не только нашей страны, но и всего мира. Высокая эффективность, простота интеграции (что доказал приведенный пример), экологичность, экономическая оправданность – те основополагающие факторы, которые позволяют выделить когенерацию, и более всего ОРЦ-модули как ее основные компоненты в разряд будущего мировой энергетики.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. URL: https://minenergo.gov.ru/node/1026 (дата обращения: 05.01.2019).

2. Официальный сайт компании TURBODEN. URL: https://www.turboden.com/case-histories/1749/lukoil (дата обращения: 06.01.2019).

3. Турбины и Дизели. Специализированный информационно-технический журнал. URL: http://www.turbine-diesel.ru/sites/default/files/n6-2018/Siemens.pdf (дата обращения: 06.01.2019).

4. Официальный сайт компании TTS. URL: http://oldwww.tts.cz/cz/boilers/downld/7.pdf (дата обращения: 07.01.2019).

5. Официальный сайт компании CHP Technical Assistance Partnerships. URL: http://www.chptap.org/Data/projects/Trailblazer-Project_Profile1.pdf (дата обращения: 08.01.2019).

6. Официальный сайт компании Электрощит Самара. URL: https://electroshield.ru/upload/iblock/ef6/Katalog-Transformatory-silovye-s-maslyanoy-i-sukhoy-izolyatsiey.pdf (дата обращения: 07.01.2019).

7. EnergyCS. Электротехнические расчеты любой сложности. URL: http://www.energycs.ru/programs/energycs-tkz/ (дата обращения: 08.01.2019).

8. Официальный сайт компании Контакт Саратов. URL: http://www.kontakt-saratov.ru/vakuumny_6-10/vikl_vbe_10_20/ (дата обращения: 07.01.2019).

УДК 004.042; 004.047

Е. С. Квас*
аспирант, ассистент
В. П. Кузьменко*
аспирант, ассистент
С. А. Сериков*
доктор технических наук, профессор
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО ДОСТУПА К СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ И IOT СИСТЕМ

В данной статье рассмотрены виды информационных атак на системы автоматизации управления и IoT систем, а также основные методы и цели по информационной безопасности в области промышленных систем управления и автоматизации. Дана классификация и определения видам атак, указаны негативные последствия их реализации. В ходе аналитической работы были выявлены реальные случаи реализации атак с указанием потерь, которые понесла организация.

Ключевые слова: *безопасность информации, базы данных, защитные средства, методы защиты информации, синтез систем защиты информации.*

E. S. Kvas*
PhD Student, Assistant
V. P. Kuzmenko*
PhD Student, Assistant
S. A. Serikov*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. V. Solyony*j*
PhD, Tech., Associate Professor
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ORGANIZING SECURE ACCESS TO THE INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEM AND IOT SYSTEMS

This article describes the types of information attacks on management automation systems and IoT systems. The main methods and objectives for information security in the field of industrial control systems and automation are considered. The classification and definition of types of attacks are given, the negative consequences of their implementation are indicated. In the course of the analytical work, they hit the real cases of the realization of attacks, indicating the losses that the organization suffered.

Keywords: *information security, database, protective equipment, information security methods, synthesis of information security systems.*

В связи с большим ростом автоматизированных промышленных предприятий, а также с развитием большого количества робототехнических комплексов встал вопрос о безопасном доступе к АСУ (автоматическим системам управления). От правильности работы всех устройств зависит конечный продукт предприятия, его жизнеобеспечение в безопасной работе. IoT устройства также стали неотъемлемой частью домашней автоматизации, доступ к которым должен иметь только владелец здания.

На данный момент остро стоит вопрос защиты от:

1) несанкционированного доступа, а также внесения изменений в производственный процесс предприятий;

2) доступа к системе мониторинга процессов автоматизации сбора аналитических данных, что чревато финансовыми потерями предприятия;

3) получения доступа к исполнительным устройствам системы автоматизации, что может привести к негативным последствиям в работе системы автоматизации в целом;

4) DDoS атак на устройства IoT;

5) заражения вирусами при передаче данных с электронных носителей (Flash-памяти, электронной передаче файлов и т. п.).

Системы автоматизации контролируются на дальних расстояниях, процессинговый центр по обеспечению работоспособности АСУ может находиться даже в другом городе. При этом количество данных, передаваемых на большие расстояния, растет. В связи с этим возрастает вероятность их перехвата, изменения, подмены, а также уничтожения, что может привести к катастрофическим последствиям. Это обуславливает необходимость принятия мер по обеспечению безопасности работы системы начиная с этапа ее проектирования.

Обеспечение безопасного доступа к АСУ здания (предприятия) включает в себя достижение целостной передачи данных, без повреждения и критичных изменений в информационном блоке, а также исключение несанкционированного доступа к данным, их копированию и переносу на другой носитель.

Существуют следующие методы обеспечения информационной безопасности:

1) *Организационный*. Разрабатывается самой организацией и заключается в ограничении прав доступа к информации, документировании всех передаваемых файлов. Ограничение выхода в сеть Интернет главных компьютеров организации, а также исключение любого копирования файлов путем физического отключения USB-разъемов и дисководов.

2) *Аппаратный*. Предполагает использование специальных устройств для сохранения конфиденциальности данных. Возможность исключения узла, отказавшего в работе из общей схемы автоматизации.

3) *Программный*. Подразумевает использование антивирусов, фаерволов, аутентификации пользователей и ведение логирования всех произведенных действий. Установка многоранговых уровней защит. Сетевое разграничение уровня доступа к различным устройствам. Если удаленный доступ не требуется, то лучше отключить все возможные порты, отвечающие за удаленное подключение к системе.

4) *Комбинированный*. Предполагает применение одного или несколько уровней защиты, аппаратно-программный, программно-организационный. Совмещение нескольких методов защиты многократно увеличивают стойкость к хакерским атакам.

Все вышеперечисленные методы должны защитить от атак – вредоносных действий, производимых как удаленно через информационную инфраструктуру, там и локально через действия сотрудников (не преднамеренные ошибочные действия и преднамеренные – действия, заранее обдуманные и специально направленные на вывод из строя АСУ) на информационную инфраструктуру предприятия [1].

Атаки бывают следующих видов:

1) локальные (требуют локального доступа к АСУ);

2) удаленные (не требуют прямого подключения к компьютеру, а возможны через удаленную сеть – Интернет и вычислительная сеть организации).

3) на поток данных (производится перехват данных, их тиражирование, изменение или полное уничтожение. Даная атака по своей критичности самая вредоносная, поскольку теряется полный контроль над объектом).

Локальные атаки в основном происходят по вине непреднамеренных действий пользователей, которые могут внести корректировки в работу системы, в ход производственного цикла, ошибочно интерпретировав данные. Возможно также преднамеренное внесение критических изменений, направленных на вывод из строя всей системы. Этого можно избежать путем ограничения доступа на программном уровне, проведения профилактики по выявлению настроений работников предприятия. Производить обучение персонала, направленное на повышение уровня реагирования и исключение побочных действий при авариях, а также своевременное повышение квалификации персонала на рабочих местах.

Также данному виду атак подвержены IoT устройства, поскольку протоколы передачи данных стандартны для большинства вида устройств (протоколы KNX, ModBus, BACnet) [2]. Если злоумышленник имеет прямой доступ к шине, то он может запустить мониторинг шины передачи данных. Данная операция позволит собрать логи, определить управляющие устройства, а также составить топологию шины. Чтобы повысить уровень безопасности системы, необходимо грамотно на сетевом уровне прописать каждый уровень доступа. В домашней автоматизации, построенной на протоколе KNX, необходимо произвести настройки линейного коплера (устройство объединения шин KNX) таким образом, чтобы за пределы одной «ветки дерева» топологии передавались пакеты, только относящиеся к другой «ветке дерева». Эти рекомендации касаются и

других видов протоколов. Если пренебрегать данным способом защиты, то злоумышленник может получить доступ ко всем исполнительным устройствам и производить управление ими.

В нынешнее время набирают популярность беспроводные устройства автоматизации, поскольку они не требуют производства работ по прокладке кабельных трасс, просты в установке и программировании. Данные устройства являются полностью автономными с местным источником питания (Li-ion батарейка, комбинация из аккумулятора и солнечной батареи для его подзарядки). Однако такие устройства наиболее подвержены «хакерским» атакам с целью причинить неудобства конечному пользователю. Данные с датчиков исполнительных устройств легко перехватываются на расстоянии. Каждое устройство является ретранслятором сигнала, поэтому, получив доступ к одному устройству, злоумышленник получает доступ ко всей системе в целом. Основной недостаток этих систем, как бы не казалось это странным, – отсутствие проводных линий связи, которые могли бы повысить устойчивость к помехам и перехватам данных.

Удаленные атаки чаще всего направлены на вредоносные действия, блокирование доступа к управляющим программам, копирование и сбор аналитических данных. Самое главное в данной атаке – получить доступ к локальному компьютеру и под видом авторизованного юзера производить противоправные действия. Самые распространенные – это DDoS-атаки (многократно повторяющийся запрос к ресурсу, в процессе которого запрашиваемому узлу не хватает вычислительных мощностей на обработку всех запросов, и конечный узел перестает отвечать на команды). Основной способ противостояния такому виду атак – комбинированный метод защиты. Основная идея в данном случае – это иметь как можно меньше портов удаленного доступа, на сетевом уровне разграничить доступ к оборудованию и компьютерам. В одну локальную сеть не объединяют различные системы автоматизации. Также используют разные автоматизированные рабочие места пользователей (АРМ). Пожарную сигнализацию (ПС) никогда не совмещают в одну локальную сеть со сторонними системами автоматизации здания, такими как вентиляция, тепловой пункт, хладоснабжение, хотя последние напрямую зависят от корректной работы ПС, поскольку все это – отключаемые системы при пожаре. Интеграция одной системы в другую происходит только на аппаратном уровне путем сбора сигналов и присвоения им критических уровней срабатывания.

Если данные системы объединить, то при успешной атаке злоумышленник получает полный доступ к критическим системам здания. Основная цель защиты против удаленных атак [3]:

1) противостоять неавторизованному пользованию системой;

2) увеличить время противостояния для обнаружения угрозы и ее «отражения»;

3) сохранить работоспособность системы даже при поражении некоторых ее участков.

В системе интернет-вещей стараются скрыть все «засвеченные» локальные сети, такие как Wi-Fi, используют скрытые Wi-Fi сети, разграничивают на сетевом уровне доступ к оборудованию, подключенному в локальную сеть, используют разные телекоммуникационные стойки (ЛВС, АСУД, CCTV, PTV). Данное разграничение позволяет «спрятать» от стороннего пользователя (гостевая сеть Интернет, офисная локальная сеть, различные подразделения организации) активное оборудование системы автоматизации. При отсутствии стыковки различных сетей на физическом уровне повышается информационная безопасность системы. В процессе проектирования и прогнозирования уязвимостей определяются со списком систем, которые нуждаются в удаленном доступе. Например, на крупных предприятиях используются свои вычислительные мощности для автоматизирования систем, обработки и хранения данных. Автоматическая система удаленной диспетчеризации (АСУД), чтобы генеральный директор предприятия, главный инженер и руководители подразделений могли видеть статистику, производить удаленный контроль работоспособности всех систем, настроена таким образом, чтобы она могла производить только отправку данных, никаких команд на изменение параметров и управление оконечного оборудования системой не принимаются, также устанавливается фильтр входных команд. Управление производится только на объекте.

Данный способ контроля входного трафика минимизирует возможность взлома системы. Если предприятия не оснащены своими вычислительными центрами или данные центры вынесены за пределы предприятия, возможно даже в другой город, то в сеть направляются все данные, включая операционные команды для управления узлами автоматизации. Чем больше мы открываем доступ в сеть, тем выше вероятность удаленного взлома системы.

Устройства IoT в основном передают в сеть все данные о положении системы. Это связано с тем, что конечный пользователь желает в реальном времени наблюдать за всем, что происходит в здании (доме, офисе, квартире). В одну сеть объединены все системы, включая пожарную сигнализацию, охранную систему, видеонаблюдение, системы автоматизации всех систем здания. Основной риск в реализации проекта возложен непосредственно на исполнителя, поскольку обслуживанием IoT систем остаются

интеграторы, занимающиеся выполнением всех работ. После расторжения контакта на обслуживание с «Умным Домом» начинают творится непредвиденные вещи. Дело в том, что конечный пользователь не считает нужным своевременно произвести замену всех паролей доступа. Основной уровень защиты в данном вопросе – это предоставление временного удаленного доступа к системам IoT только на время производства работ по обслуживанию и настройке.

Атака на поток данных – самая сложная по обнаружению, поскольку система не может самостоятельно определить, кто является источником данных. Ее можно реализовать как удаленно, так и локально на объекте. Для удаленного доступа злоумышленнику необходимо получить доступ к порту передачи данных и начать сканирование всего исходящего трафика. Для локальной реализации атаки необходимо получить доступ к шине передачи данных.

Основной способ защиты от подобного вида атак – шифрование всех передаваемых данных. Использование подключения точка-точка, когда данные передаются напрямую от источника данных к приемнику. Реализация защиты на сетевом уровне.

Основная задача в процессе проектирования системы автоматизации и IoT систем – это определение количества передаваемых данных. От этого будет зависеть стоимость конечного проекта по информационной безопасности.

Информационная безопасность – это одна из основных видов затрат на предприятии. Стоимость простоя одной минуты всего завода из-за проблем с безопасностью может исчисляться миллионами.

Своевременный анализ системы на уязвимости, обновление программного обеспечения, выявление негативного настроения среди персонала, обдуманный и полностью проанализированный план по обеспечению информационной безопасности – все это может повысить взломостойкость.

В 2018 году согласно статистике, указанной антивирусной компанией «Лабораторией Касперского» [4], было атаковано 41% компьютеров АСУ. Россия занимает первое место в рейтинге атакованных стран.

Чтобы снизить данный показатель, необходимо следовать правилам обеспечения информационной безопасности, своевременно проводить ее аттестацию. Эти меры позволят повысить стойкость информационной системы.

Библиографический список

1. *Бондарев В. В.* Введение в информационную безопасность автоматизированных систем. М.: МГТУ, 2016. С. 29–45.

2. *Михайлов С. Ф., Петров В. А., Тимофеев Ю. А.* Информационная безопасность. Защита информации в автоматизированных системах. Основные концепции. М.: МИФИ, 1995. С. 154–167.

3. *Ухлинов Л. М.* Управление безопасностью информации в автоматизированных системах. М.: МИФИ, 1996. С. 83–92.

4. Kaspersky Lab. Отчет об угрозах информационной безопасности промышленных предприятий. 2018. С. 10–15.

УДК 004.5

С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
С. А. Сериков*
доктор технических наук, профессор
С. Ю. Лач, А. В. Рысин, М. И. Дедик, А. Д. Очередин*
студенты
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОТКРЫТОЙ АРХИТЕКТУРЫ

В работе представлен проект по разработке измерительной части электроэнергетического комплекса с возможностью удаленного мониторинга и управления его узлами и блоками. Раскрыты особенности конструкции, компоновки и монтажа измерительной системы. Также приведена принципиальная схема всей системы и алгоритм функционирования человеко-машинного интерфейса.

Ключевые слова: *измерительная система, big data, интернет вещей, электроэнергетика, киберфизические системы, мобильные устройства.*

S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. A. Serikov*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. Y. Lach, A. V. Rysin, M. I. Dedik, A. D. Ocheredin*
Students
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE MEASURING PART OF THE ELECTRIC POWER COMPLEX OF OPEN ARCHITECTURE

The paper presents a project for the development of the measuring part of the electric power complex with the ability to remotely monitor and control its units and blocks. Revealed the features of the design, layout and installation of the measuring system. Also shown is a schematic diagram of the entire system and an algorithm for the functioning of a human-machine interface.

Keywords: *measuring system, big data, Internet of things, electric power industry, cyber-physical systems, mobile devices.*

Разрабатываемая измерительная система электроэнергетического комплекса открытой архитектуры предназначена к интеграции в комбинированную солнечно- и ветроэнергетическую установку со сверхпроводниковым оборудованием [1] (далее – электроэнергетический комплекс).

Электроэнергетический комплекс состоит из трех основных модулей: сверхпроводникового ветрогенератора (рис. 1, а), солнечной батареи (рис. 1, б) и блока контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) (рис. 2).

Разрабатываемая измерительная система будет интегрирована в основном в элементы и узлы блока КИПиА, однако некоторые датчики и сенсоры будут установлены непосредственно на сверхпроводниковом ветрогенераторе и солнечной батарее, а также за пределами гибрид-

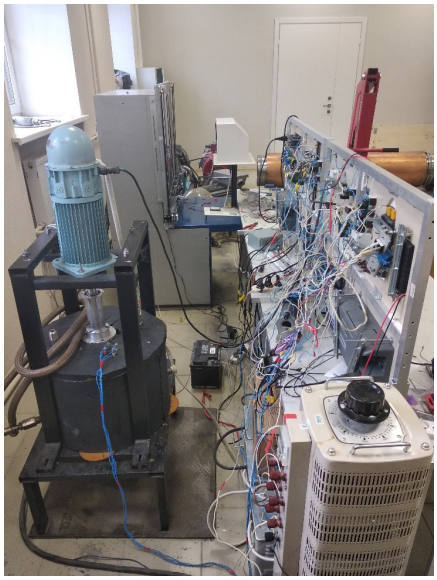
а)  б) 

Рис. 1. Внешний вид: а) сверхпроводниковый ветрогенератор; б) солнечная батарея

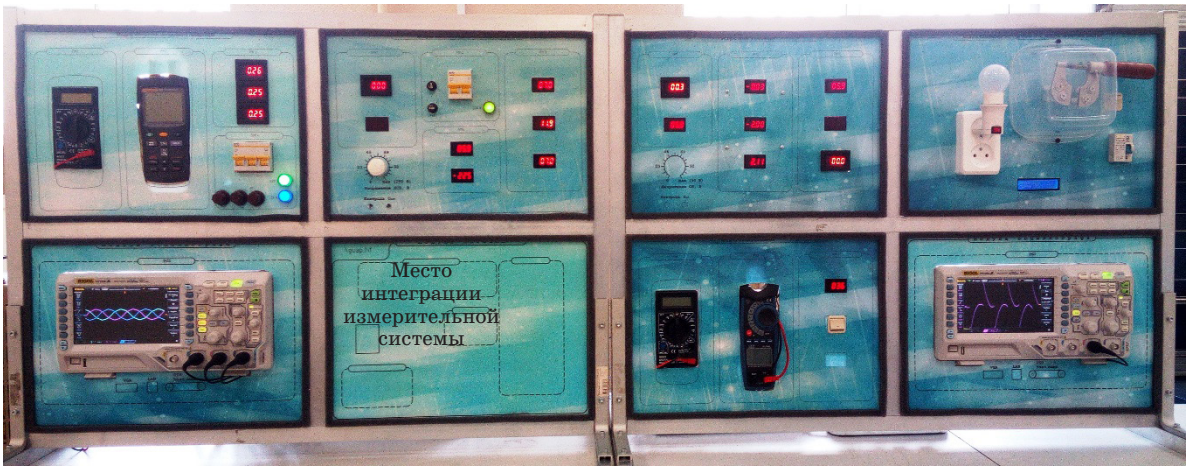


Рис. 2. Блок контрольно-измерительных приборов и автоматики

ной электростанции для контроля параметров окружающей среды.

Измерительная система будет контролировать следующие параметры электроэнергетического комплекса: переменное напряжение фаз А, В и С ветрогенератора; *постоянное напряжение* на нагрузке, солнечной батареи, аккумуляторной батареи; постоянный ток аккумуляторной батареи, солнечной батареи, нагрузки; температура и влажности окружающей среды; освещенность солнечной батареи на солнце; освещенность электроэнергетического комплекса в тени. Помимо указанных характеристик измерительная система обязательно должна осуществлять защитно-коммутационные функции основных блоков электроэнергетического комплекса: *включение или отключение* ветрогенератора по цепи переменного тока, ветрогенератора по цепи постоянного тока, имитации освещения солнечной батареи, аккумуляторной батареи, солнечной батареи. Сведения о режимах работы электроэнергетического комплекса накапливаются на сервере измерительной системы, который состоит из оперативной и постоянной памяти Android; Wi-Fi роутера; Ethernet модуля для связи микроконтроллера и Wi-Fi роутера.

Аппратная часть измерительной системы строится на базе микроконтроллера. Ниже представлен анализ микроконтроллеров, которые способны удовлетворить предъявляемые к системе требования.

Микроконтроллеры серии Raspberry Pi [2] являются миниатюрными персональными компьютерами с низким энергопотреблением и различными возможностями для обучения, прототипирования и тестирования интерфейсов различных устройств. Они могут работать не только с полноценной операционной системой на базе Linux, но и напрямую с GPIO-выводам самого микроконтроллера с возможностью расширения ее возможностей по работе с внешними электронными устройствами, исполнительными органами и датчиками. Микроконтроллер

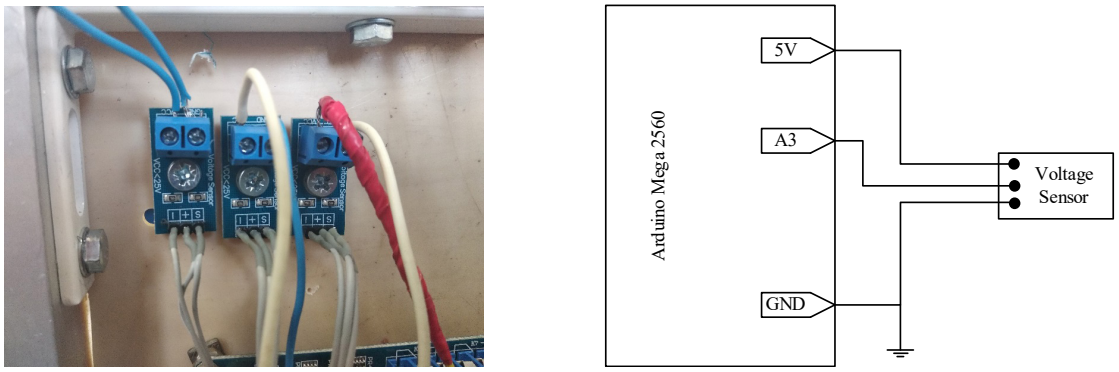


Рис. 3. Внешний вид и схема подключения модуля Voltage Sensor

обладает следующим набором характеристик: работает на базе Linux; воспроизводит Full HD-видео 1080; процессор ARM1176JZF-S частотой 700 МГц; объем ОЗУ составляет 512 МБ; размер платы 85,6 × 54,0 × 17 мм; оснащен композитным видеовыходом RCA и HDMI для подключения к монитору, а также 3,5-миллиметровым разъемом для подключения настольной аудиосистемы; системным накопителем являются карты памяти SD/MMC; потребляемая мощность составляет около 3,5 Вт.

Микроконтроллер серии Atmel ATmega 2560 [2] – это 8-разрядный микроконтроллер, выполненный на основе AVR-ядра с RISC-архитектурой. За счет выполнения большинства инструкций за один машинный цикл достигает производительности 1 млн операций в секунду при тактовой частоте 1 МГц. AVR ядро объединяет богатый набор инструкций с 32 рабочими регистрами общего назначения, которые непосредственно подключены к арифметико-логическому устройству, что позволяет указывать два регистра в одной инструкции и выполнить ее за один цикл. Данная архитектура обладает большей эффективностью кода и в 10 раз большей производительностью по сравнению с CISC микроконтроллерами.

Микроконтроллер обладает следующим набором характеристик: флэш-память объемом 64/128/256 Кбайт с возможностью чтения во время записи; постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) объемом 4 Кбайт; статическое оперативно-запоминающее устройство (ОЗУ) объемом 8 Кбайт; шесть гибких таймеров-счетчиков с режимами сравнения и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ); 2-проводной последовательный интерфейс с побайтной передачей; 16-канальный 10-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) с опциональным дифференциальным входным каскадом и программируемым усилением.

Микроконтроллеры серии Intel Edison Board Atmel содержат: 20 цифровых input/output контактов, включая 4 контакта вывода ШИМ; 6 аналоговых контактов input; 1 UART(RX/TX) порт; 1 I2C шина; 1 ICSP; 6-pin header (SPI); micro USB разъем; слот для SD Card памяти. Данный тип микроконтроллера очень распространен в связи со своей простотой и надежность.

Опираясь на проведенный анализ, было принято решение применить для разработки измерительной системы электроэнергетического комплекса микроконтроллер Arduino Mega2560, так как он обладает необходимым количеством функций и способен выполнить поставленные задачи при программировании системы, а также имеет хороший потенциал для будущих технических дооснащений и развития системы как в аппаратной, так и в информационной сфере [3].

На сегодняшний день промышленностью выпускается очень большое количество датчиков, сенсоров и другого периферийного оборудования, в связи с чем необходимо проработать принципиальные схемы подключения и особенности программирования датчиков, применяемых в системы.

Для измерения переменного напряжения фаз А, В и С сверхпроводникового генератора будем использовать модули Voltage Sensor (рис. 3). Необходимость их использования обусловлена тем, что предел входного напряжения (одна логическая единица) для платы Arduino Mega2560 составляет 5 В. На данном модуле реализован резистивный делитель напряжения, который имеет коэффициент 1 к 5 (коэффициент 0,2). Это значит, что на входе модуля напряжение может изменяться от 0 до 25 В, а на выходе оно будет пропорционально распределено в диапазоне от 0 до 5 В. Такие же датчики установлены для измерения постоянного напряжение солнечной батареи и постоянного напряжения аккумуляторной батареи.

Данные датчики программируются при помощи следующего кода:

```
void setup(){ Serial.begin(9600); }
void loop(){ delay(1000);
float volt=analogRead(A3)/40.6;
Serial.print(“Volt: “);
Serial.print(volt); Serial.println(“ U”); }
```



Рис. 4. Внешний вид и схема подключения датчика ACS712

Для измерения переменных токов фаз сверхпроводникового ветрогенератора используются датчики измерения силы тока на базе микросхемы ACS712, включающей в себя датчик Холла (рис. 4). Для корректной работы датчика тока номиналом 30 А, рядом с датчиком размещен медный проводник. Сам датчик Холла располагается непосредственно на кристалле микросхемы. Также данным датчиком в представленном комплексе измеряется и выпрямленный постоянный ток сверхпроводникового ветрогенератора или ток нагрузки, тока солнечной батареи и постоянный ток аккумуляторной батареи. Для измерения переменного тока фаз A, B и C он дополнительно снабжается двухполупериодным выпрямителем и конденсаторным фильтром.

Данные датчики программируются с помощью следующего кода:

```
#include <math.h> void setup(){
Serial.begin(9600); }void loop(){
delay(1000); loat sss=analogRead(A1);
float ddd=512.0-sss; float fff=ddd*0.0705;
Serial.print("I: "); Serial.print(fff);
Serial.println(« A»); }
```

Температура и влажность окружающей среды измеряется цифровым датчиком температуры и влажности высокой точности DHT22 (рис. 5). Минимальное время между считываниями показаний данного датчика составляет 2 с. Максимальная погрешность измерения температуры составляет +/- 1 °C. Погрешность измерения относительной влажности находится в пределах от +/-2 до +/-4 %.

Данный датчик программируется с помощью следующего кода:

```
#include «DHT.h»
#define DHTPIN 2 // вывод, к которому подключается датчик
#define DHTTYPE DHT22 DHT
dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup() { Serial.begin(9600);
dht.begin(); } void loop() {
delay(250); // считывание температуры или влажности занимает 250 мс
float h = dht.readHumidity(); // считывание температуры в градусах Цельсия
float t = dht.readTemperature(); // проверяем, были ли ошибки при считывании и, если были, начинаем заново
if (isnan(h) ‖ isnan(t)) { Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
return; } //выводим информацию в Монитор последовательного порта
Serial.print("Humidity: "); Serial.print(h);
Serial.print(" %\t"); Serial.
print("Temperature: ");
Serial.print(t); Serial.println(" *C "); }
```

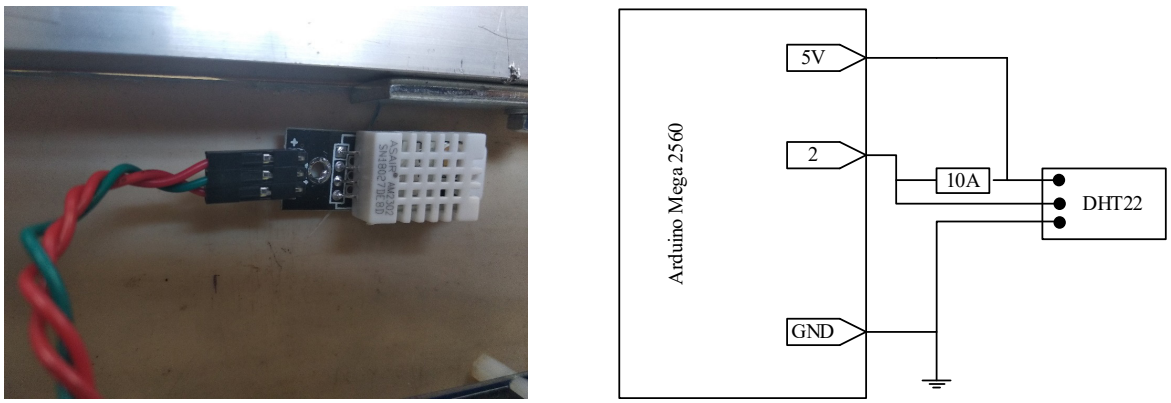


Рис. 5. Внешний вид и схема подключения цифрового датчика температуры и влажности высокой точности DHT22

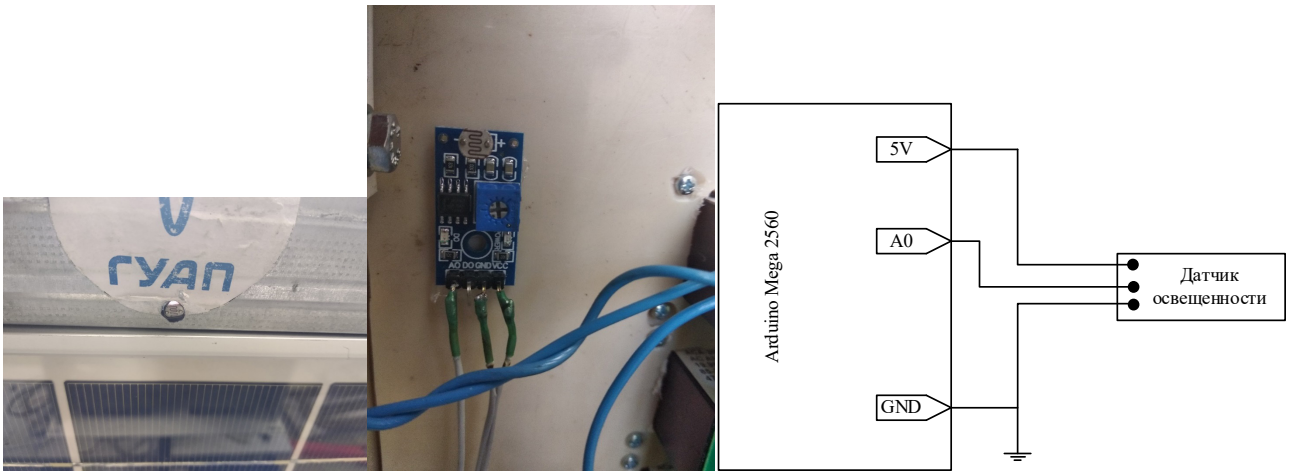


Рис. 6. Внешний вид и схема подключения датчика освещенности

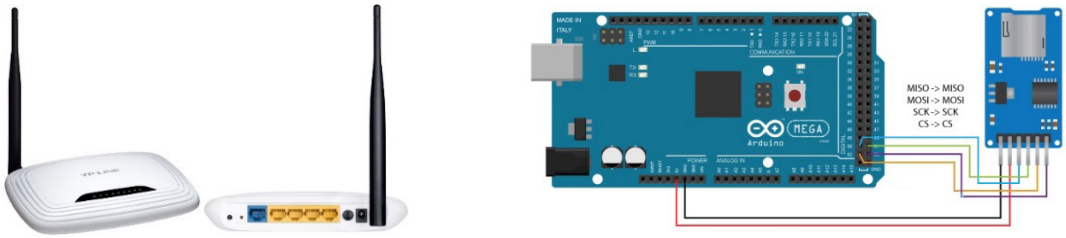


Рис. 7. Схема взаимодействия Wi-Fi роутера и Ethernet модуля Enc28J60

Для определения освещенности поверхности солнечной батареи и поверхности вокруг электроэнергетического комплекса (в тени) используется Trema-модуль датчик освещенности (рис. 6).

Данный датчик программируется с помощью следующего кода:

```
#define light A0 void setup(){
Serial.begin(9600); } void loop(){
delay(1000); float h = dht.readHumidity();
float t = dht.readTemperature();
if (isnan(h) ‖ isnan(t)) { Serial.
println(“Error!”);
return;} Serial.print(“Light: “);
Serial.print(illuminance);
Serial.println(“Lx”);}
```

Все данные с этих датчиков можно отслеживать с помощью разработанного мобильного приложения, что обеспечивает удобство наблюдения за электроэнергетическим комплексом, так как нет необходимости в дополнительном оборудовании, которое не всегда имеет небольшие габариты, в то время как мобильный телефон компактен и всегда находится под рукой, а также позволят посредством мобильного Интернета отслеживать данные из любой точки мира [4].

Для обеспечения связи с мобильным устройством к плате Arduino подключены Wi-Fi роутер [5] и Ethernet модуль Enc28J60 (рис. 7).

Все коммутации, которые осуществляет разрабатываемая измерительная система в узлах и элементах электроэнергетического комплекса, осуществляются при помощи релейного модуля с шестнадцатью электромеханическими реле с коммутационными характеристиками по напряжению 250 В и току 10 А.

Принципиальная схема измерительной системы электроэнергетического комплекса представлена на рис. 8.

Для разработки человеко-машинного интерфейса измерительной системы было выбрано программное обеспечение Unity. Это межплатформенная среда разработки компьютерных приложений, которая позволяет создавать приложения, работающие под более чем двадцатью различными операционными системами, включающими персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и др.

На рис. 9 представлен дизайн и алгоритм функционирования человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) измерительной системы электроэнергетического комплекса. Разработанный ЧМИ представляет собой одиннадцать отдельно всплывающих окон:

– окно основного меню, в котором можно выбрать то, как пользователь войдет в систему: главный сервер (среда разработчика), администратор (полный доступ ко всем режимам системы) и наблюдатель (только мониторинг параметров, которые разрешены администратором). Подобный подход позволяет обеспечить макси-

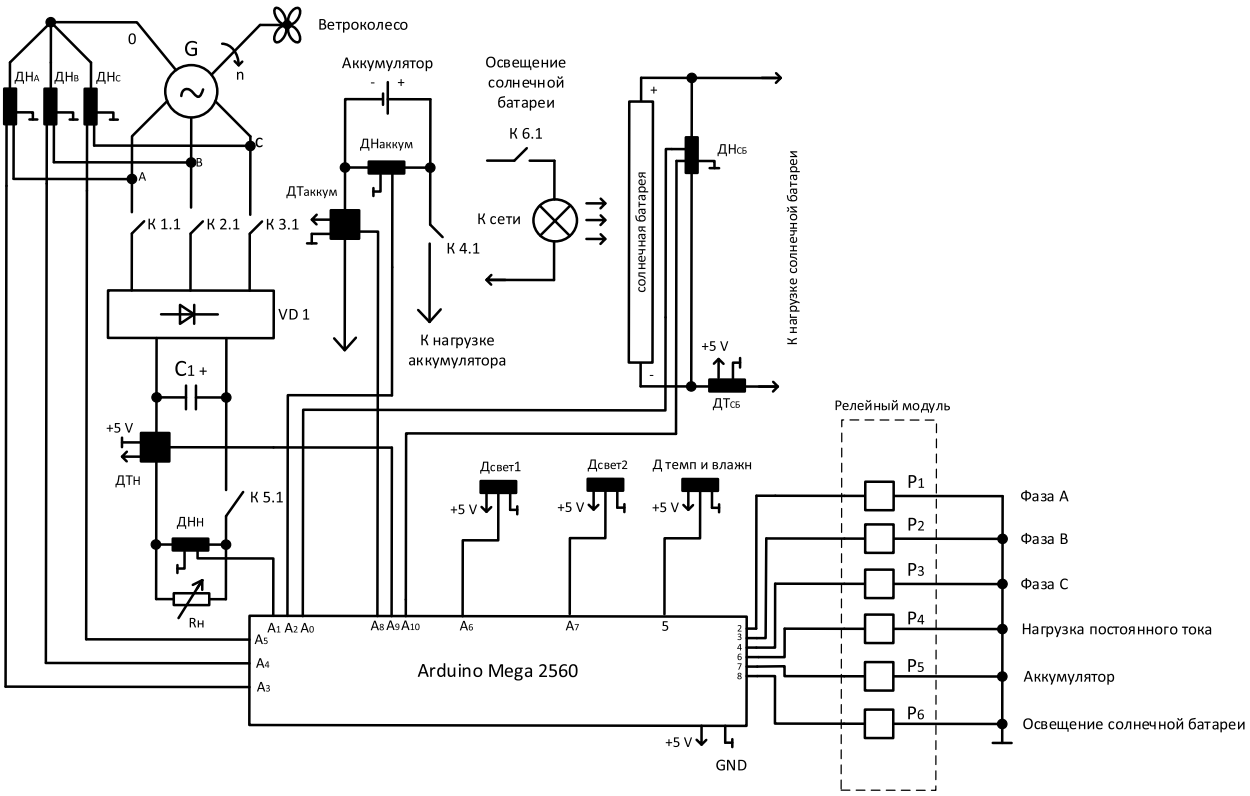


Рис. 8. Принципиальная схема измерительной системы

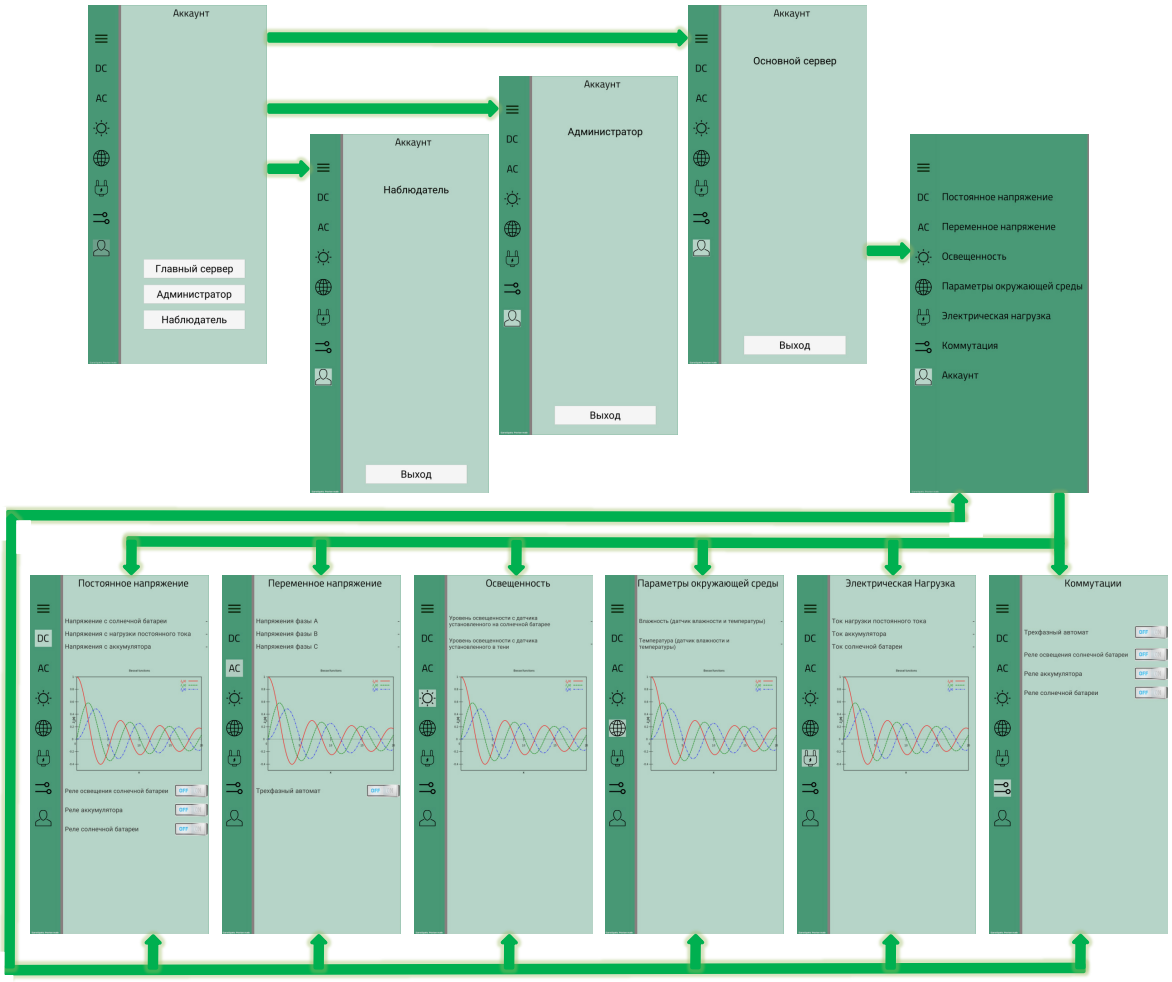


Рис. 9. Дизайн человеко-машинного интерфейса измерительной системы



Рис. 10 Внешний вид измерительной системы электроэнергетического комплекса

мальный уровень информационной безопасности системы;

– окна основного сервера, администратора и наблюдателя соответственно со своими контекстными подменю;

– окно контекстного подменю позволяет переходить в разделы: постоянное напряжение, переменное напряжение, освещенность, параметры окружающей среды, электрическая нагрузка, коммутация и аккаунт;

– окно постоянного напряжения позволяет отслеживать: постоянное напряжение нагрузки, солнечной батареи, аккумуляторной батареи, а также производить коммутации цепей включения или отключения: имитации освещения солнечной батареи, аккумуляторной батареи, солнечной батареи и ветрогенератора по цепи постоянного тока (нагрузки);

– окно переменного напряжения позволяет отслеживать переменное напряжение фаз A, B и C ветрогенератора, а также производить коммутации цепей включения или отключения ветрогенератора по цепи переменного тока;

– окно освещенности позволяет отслеживать освещенность солнечной батареи на солнце и освещенность электроэнергетического комплекса в тени;

– окно параметров окружающей среды позволяет отслеживать температуру и влажности окружающей среды;

– окно электрической нагрузки позволяет отслеживать постоянный ток аккумуляторной батареи, солнечной батареи и нагрузки;

– окно коммутации позволяет производить переключения цепей включения или отключения: ветрогенератора по цепи переменного тока, по цепи постоянного тока (нагрузки), имитации освещения солнечной батареи, аккумуляторной батареи и солнечной батареи.

Также в окнах постоянного напряжения, переменного напряжения, освещенности, параметров окружающей среды и электрической нагрузки есть возможность отслеживать все физические величины в виде графиков, которые строятся в реальном времени.

На рис. 10 представлен внешний вид интегрированной измерительной системы в электроэнергетический комплекс.

На сегодняшний день проходят испытания разработанной измерительной системы электроэнергетического комплекса. Также ведутся активные исследования по применению VR технологий в аппаратной и программной частях системы для вывода на новый уровень возможностей отображения передаваемых через Интернет технических параметров и характеристик системы.

Библиографический список

1. Электроэнергетический комплекс со сверхпроводниковым оборудованием: разработка, создание, исследование: монография / М. В. Бураков, С. В. Солёный, С. С. Тимофеев и др. / Под ред. В. Ф. Шишлакова, Ю. А. Антохиной. СПб.: ГУАП, 2018. 288 с.

2. Raspberry Pi and Arduino boards in control education. Jaroslav Sobota, Roman PiŜl, Pavel Balda, MiloŜ Schlegel / IFAC Proceedings Volumes. Vol. 46, Issue 17, 2013. P. 7–12.

3. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics / F. Candelas, G. García, S. Puente et al. // IFAC-PapersOnLine. Vol. 48, Issue 29, 2015. P. 105–110.

4. Taking Arduino to the Internet of Things: The ASIP programming model. Gianluca Barbon, Michael Margolis, Filippo Palumbo, Franco Raimondi, Nick Weldin // Computer Communications. Vol. 89–90, 1 September 2016. P. 128–140.

5. Arduino Wi-Fi Network Analyzer. Tariq AL-Kadi, Ziyad AL-Tuwaijri, Abdullah AL-Omran // Procedia Computer Science. Vol. 21, 2013. P. 522–529.

УДК 617.57-77

С. А. Сериков*
доктор технических наук, профессор
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
Е. А. Серикова**
кандидат технических наук, доцент
А. А. Михайлов*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

СИСТЕМА ИНЕРЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДЛЯ ВЫСОКИХ УСЕЧЕНИЙ

В статье описан процесс разработки системы инерциального управления. Приведены метод управления, структурная схема, алгоритм работы системы и результаты испытаний.

Ключевые слова: *протез, система управления, программирование.*

S. A. Serikov*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. A. Serikova**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. A. Mikhaylov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

INERTIAL CONTROL SYSTEM FOR ROBOTIC ARM PROTHETIC DEVICE

The article deals with the process of development the inertial control system. Control method, schematic diagram, operation algorithm and experimental results are presented below.

Keywords: *artificial limb, control system, programming.*

В настоящее время в Российской Федерации около двухсот тысяч инвалидов с дефектами как верхних, так и нижних конечностей, которые сталкиваются с неудобствами в повседневной жизни, поэтому значительное количество инвалидов с дефектами конечностей нуждаются в технических средствах реабилитации, которые в определенной степени восстанавливают утраченные функции. Примерно 10% из них – это инвалиды с ампутациями или дефектами верхних конечностей. К техническим средствам реабилитации данной категории инвалидов относятся протезы.

Существующие на данный момент протезы имеют существенный недостаток: пользователь имеет возможность производить манипуляции в узкой области ниже плеча ввиду конструктивных особенностей изделий. Обусловлено это

тем, что протезы для высоких усечений имеют пассивные локтевой и плечевой суставы с фиксирующим механизмом. Для того чтобы согнуть сустав в нужном положении, пользователю приходится «вскидывать» протез или совершить сгибание при помощи здоровой руки.

Решением данной проблемы является использование робототехнического протеза с системой управления, использующей беспроводные инерциальные модули, прикрепляемые к обуви пользователя.

Концепция системы управления заключается в следующем. Протез представляет собой робототехническую руку (манипулятор) с 5 степенями свободы. Контролировать движения руки пользователь будет при помощи пары инерциальных датчиков, прикрепляемых к обуви пользователя. Принцип управления этими датчиками основан на принципе управления двухосевыми джойстиками: отклонение стопы от горизонтального положения приводит к перемещению рабочего органа (кисти) протеза в про-

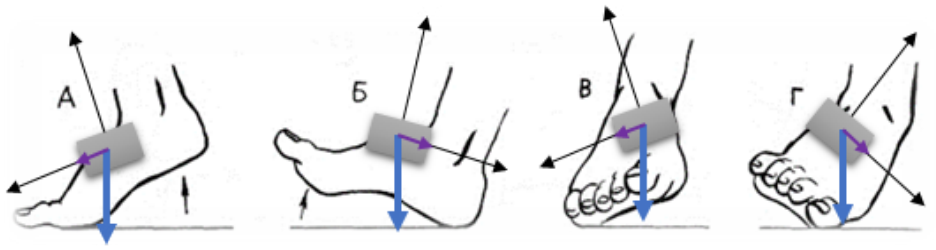


Рис. 1. Движения стопы в голеностопном суставе:
а) – разгибание; б) – сгибание; в) – супинация; г) – пронация

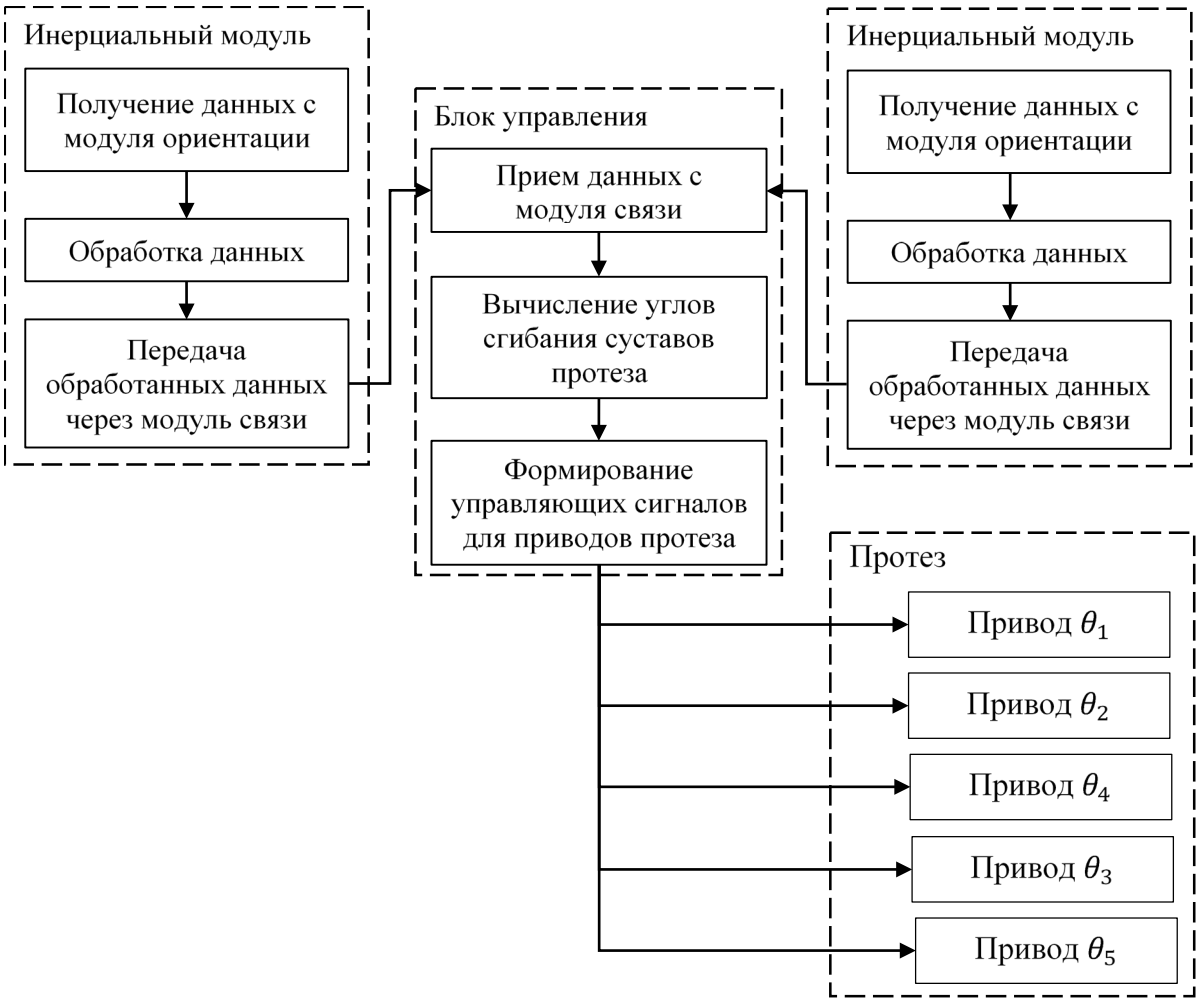


Рис. 2. Упрощенная схема алгоритма работы системы инерциального управления протезом верхних конечностей для высоких усечений



Рис. 3. Упрощенная структурная схема системы управления

странстве. Причем задающими параметрами являются не углы сгибания суставов, а направление и скорость перемещения РО, для которых производится вычисление этих углов. Кинематическая схема протеза представлена на рис. 2, а иллюстрации, представленные на рис. 1, поясняют принцип управления протезом движениями стоп с прикрепленными к ним датчиками.

На рис. 2 и 3 представлены упрощенная структурная схема системы управления и ее алгоритм работы.

Датчики (инерциальные модули – ИМ) на основе направления отклонения и его величины определяют скорость перемещения РО. Этот показатель ИМ передают в блок управления (БУ) по беспроводному каналу связи Bluetooth. БУ на основании полученной величины рассчитывает в каждой итерации новое положение РО в пространстве и вычисляет углы сгибания суставов. Для упрощения решения обратной задачи кинематики используется угловая (ангулярная) система координат, применяемая в большинстве 3-осевых манипуляторов. В такой СК рабочий орган перемещается в координатной плоскости XZ, вращающейся вокруг оси X.

Для системы инерциального управления входными данными с датчиков являются значения скоростей: $\delta\theta_1$, $\delta\theta_4$, $\delta\theta_5$, δX и δZ. Если значения θ_1, $\delta\theta_4$, $\delta\theta_5$ характеризуют скорость поворота суставов θ_1, θ_4, θ_5 напрямую, то параметры δX, δZ – скорость перемещения рабочего органа вдоль осей X и Z, определяемого суставами θ_2 и θ_3 по теореме косинусов.

Пусть координаты X и Z являются длинами катетов прямоугольного треугольника (ΔACB), в котором ось Z совпадает с одним катетом, а ось X параллельна другому катету (рис. 5).

Тогда в первую очередь необходимо вычислить гипотенузу:

$$R = \sqrt{X^2 + Z^2}\,. \qquad (1)$$

Полученная гипотенуза R в прямоугольном треугольнике ΔACB также является большей стороной треугольника ΔADB, в котором двумя другими сторонами являются звенья плеча и предплечья (l_1 и l_2). Теперь расчет углов θ_2 и θ_4 выполняется по формулам (2) и (3).

$$\theta_2 = -\arccos\left(\frac{X}{R}\right) - \arccos\left(\frac{l_1^2 + R^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot R}\right), \qquad (2)$$

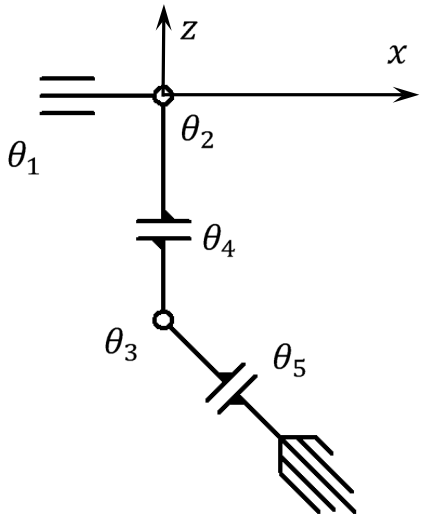


Рис. 4. Кинематическая схема протеза для системы инерциального управления

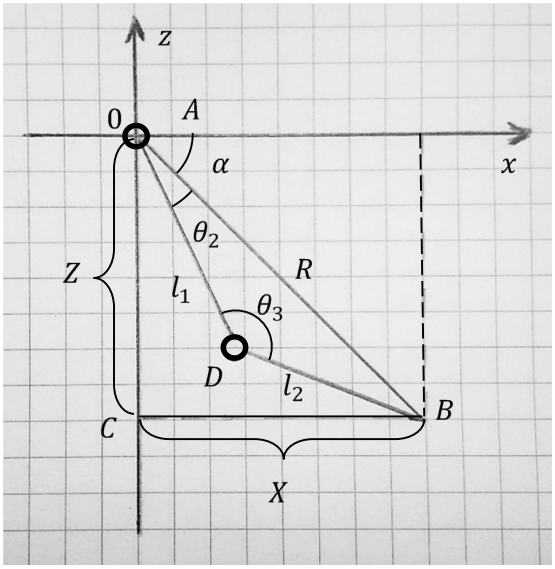


Рис. 5. Вычисление углов поворота суставов θ_2 и θ_4 методом косинусов

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_1^2 - R^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_1}\right). \qquad (3)$$

При расчете угла θ_2 производится его смещение на угол $\alpha = \arccos(X/R)$, являющийся отрицательным, так как расположен в нижней полуплоскости.

В данных расчетах не учтена пронация-супинация плечевого звена на угол θ_4. Поэтому необходимо значение длины предплечья (l_2) заменить его проекцией на плоскость XZ:

$$l_2' = l_2 \cdot \cos(\theta_4). \quad (4)$$

Тогда заменим формулы (2) и (3) формулами (5) и (6).

$$\theta_2 = -\arccos(\frac{X}{R}) - \arccos(\frac{(l_1^2 + R^2 - (l_2 \cdot \cos(\theta_4))^2}{2 \cdot l_1 \cdot R}), \quad (5)$$

$$\theta_3 = \arccos(\frac{(l_2 \cdot \cos(\theta_4))^2 + l_1^2 - R^2}{2 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_4) \cdot l_1}). \quad (6)$$

Основываясь на разработанных методах и алгоритмах управления, был собран испытательный макет робототехнического протеза руки и пара инерциальных модулей. Проектирование корпусных элементов производилось в системе автоматизированного проектирования (САПР) Solidworks, впоследствии детали были выполнены посредством 3D-печати из пластика.

Электронно-механическая часть системы состоит из микроконтроллеров Arduino Nano и Mega, инерциальных датчиков MPU-6050, bluetooth-модулей HC-05 и модельных сервоприводов с крутящим моментом 15 кг/см.

Управление протезом происходит следующим образом. Отклонение правой стопы с ИМ вперед/назад (разгибание/сгибание) перемещает РО вдоль оси X, наклон вправо/влево (супинация/пронация) соответствует отведению/приведению плеча. На левой стопе разгибание/сгибание отвечают за перемещение по вертикали, а супинация/пронация – ротацию плеча или предплечья. Переключение режимов ротации производится специальным жестом: стуком стопы о поверхность.

Разработанный макет с системой инерциального управления (с переработанным дизайном корпуса) был представлен на таких фестивалях, как «VK Fest», «Science fest» и «Безграничные возможности» (рис. 9–11).

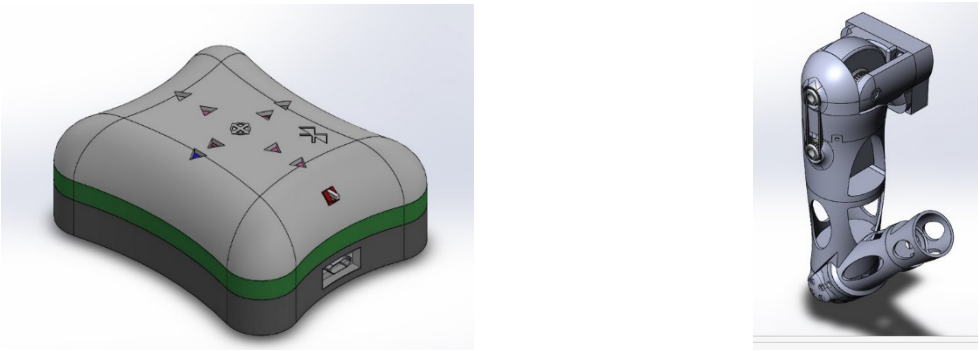


Рис. 6. Проектирование макета протеза в САПР SolidWorks

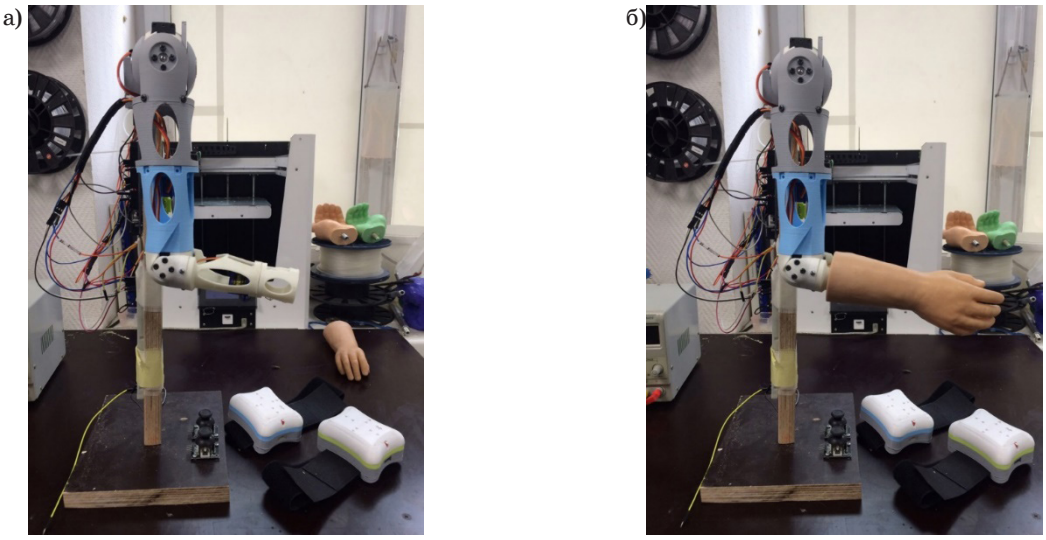


Рис. 7. Собранный макет протеза на сервоприводах:
а) с оболочкой кисти; б) без оболочки



Рис. 8. Первое испытание и тест на управляемость системы управления



Рис. 9. Участие в фестивале «VK Fest 2018»

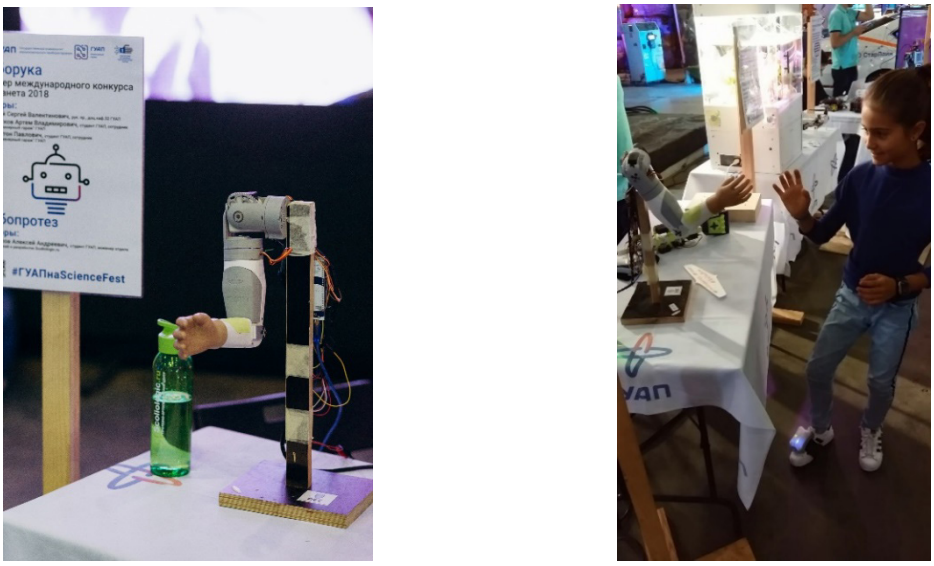


Рис. 10. Участие в фестивале «Science Fest 2018»

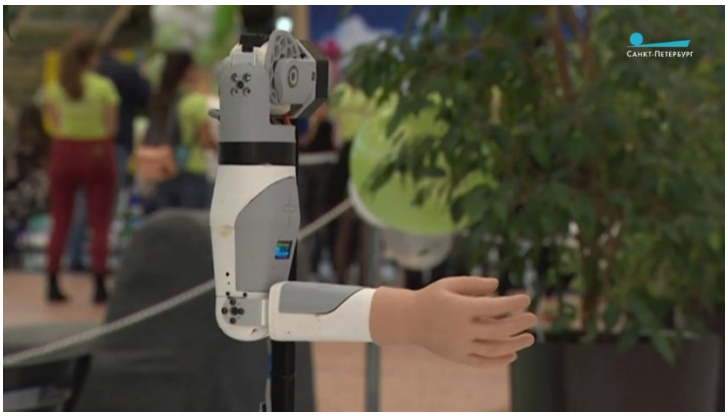


Рис. 11. Участие в фестивале «Безграничные возможности»

По итогам испытаний и экспериментов был выявлен главный недостаток: низкая частота обработки управляющих воздействий, из-за чего движения протеза «дерганые». Это является следствием использования тригонометрических функций для вычисления углов сгибания суставов в основном цикле программы. Одним возможным решением могло бы быть использование более мощного контроллера, что увеличило бы стоимость системы управления. Поэтому вторым путем ускорения работы системы является замена алгоритма цикличного вычисления углов на алгоритм поиска заранее вычисленных значений по таблице (массиву) данных. Обращение к конкретному элементу трехмерного массива занимает не больше половины такта, что значительно сокращает время на выполнения цикла, следовательно, повышает производительность.

Основным преимуществом разработанной системы управления протезом верхних конечностей для высоких усечений перед конкурирующим протезом LUKE Arm является цена: себестоимость всей системы (не учитывая протез), включая электронные комплектующие и расходные материалы, не превышает 20 тыс. руб. (если учитывать максимальную стоимость на комплектующие в Санкт-Петербурге), в то время как стоимость LUKE Arm составляет порядка 7,5 млн руб. Еще одним достоинством моей разработки может стать то, что LUKE Arm труднодоступна для россиян, так как этот проект не является массовым и распространяется только внутри США, следовательно, возникает необходимость в российском аналоге. Также конкурент не имеет системы жестов для инерциальных модулей.

Библиографический список

1. Mobius Bionics. LUKE Arm Detail Page. URL: http://www.mobiusbionics.com/luke-arm.

2. 3DNews. MEMS: микроэлектромеханические системы. Ч. 1. URL: https://3dnews.ru/600098.

3. Класс робототехники. Курсы для начинающих робототехников. Акселерометр: что это такое и как им определять наклон тела. URL: http://robotclass.ru/tutorials/accelerometer-angle-calculation.

4. *Петровский Б. В.* Большая Медицинская энциклопедия, изд 3-е. М.: Советская энциклопедия, 1974–1989 гг.

5. ГОСТ Р 56138-2014. Протезы верхних конечностей. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2014.

6. ГОСТ Р ИСО 22523-2007. Протезы конечностей и ортезы наружные. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2007.

7. *Распопов В. Я.* Микромеханические системы. М.: Машиностроение, 2007.

8. *Апресов С. С.* Популярная механика. М.: ООО «ФЭШН ПРЕСС», 2014. № 7 (141). С. 20.

9. *Кондрашин Н. И.* Руководство по протезированию. М.: Медицина, 1976.

10. *Семенов Б. Ю.* Шина I2C в радиотехнических конструкциях. М.: СОЛОН-Р, 2002.

УДК 621.317.35

О. Г. Шелехова*
кандидат технических наук, доцент
**ГОУ ВПО «Донецкий государственный университет»*

ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕГРУЗКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА МЕЖДУНАРОДНЫЕ ЕВРОПЕЙСКИЕ СТАНДАРТЫ

В статье обосновано, что при переходе на международные европейские стандарты асинхронные двигатели могут испытывать тепловые перегрузки до 25% и более. Разработаны рекомендации по обеспечению безаварийной эксплуатации для широкого класса асинхронных двигателей в условиях перехода систем электроснабжения на международные европейские стандарты.

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, отклонение напряжения, международные европейские стандарты, тепловое состояние.*

O. G. Shelekhova*
Phd Sc. Tech., Associate Professor
**GOU VPO Donetsk state University*

THERMAL OVERLOAD OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR DURING THE TRANSITION OF POWER SUPPLY SYSTEMS TO INTER NATIONAL AND EUROPEAN STANDARDS

The article proves that the transition to international European standards asynchronous motors can experience thermal overload up to 25% or more. Recommendations have been developed to ensure trouble-free operation for a wide class of asynchronous motors in the transition of power supply systems to international European standards.

Keywords: *asynchronous motor, voltage deviation, international European standards, thermal condition.*

Практика международной стандартизации в области напряжений систем электроснабжения направлена на разумное сокращение числа используемых в мире напряжений и сближение напряжений, незначительно отличающихся друг от друга [1] (например, при стандартизации напряжений 220/380 В и 230/400 В).

Большинство стран мира используют системы 50 Гц. В части низкого напряжения эти страны могут быть разделены на две группы: использующие напряжение 220/380 В и 240/415 В. Низкие напряжения используются в странах СНГ, Великобритании, Австралии, Новой Зеландии, Малазии, Новой Гвинее, Саудовской Аравии, Кении, Кувейте, Кипре и т. д. [1].

В течение длительного времени ведется работа по унификации напряжений и в настоящее время оба напряжения присутствуют как стандартные. Публикациями [1, 2] в странах СНГ установлен 20-летний переходный период, к концу которого (2003 г.) все эксплуатируемые электроприемники должны иметь номинальные напряжения 230/400 В, а рабочие напряжения в сетях находиться в диапазоне от -10 до +10% от указанных номинальных значений. В соответствии с [1] стратегией вначале переходного периода предусмотрен переход на выпуск электроприемников на напряжение 230/400 В. Для того чтобы старые и новые электроприемники работали нормально в общей сети, накладываются ограничения на диапазоны рабочих напряжений: страны с системами 220/380 В уменьшают нижний предел с −10 до −6%, а страны с системами 240/415 В − верхний предел с +10 до +6% [1]. В соответствии с предложенной стратегией в течение переходного периода электроприемники будут работать с несимметричными диапазонами допустимых отклонений шириной 16% [1].

Начиная с 90-х годов в СССР, а затем в странах СНГ органами стандартизации были предприняты необходимые меры для постепенного перехода на унифицированное с европейскими странами напряжение 230/400 В [2]. С 1993 года для стран СНГ стандарт ГОСТ 29322-92 (МЭК 38-83) «Стандартные напряжения» предусматривал поэтапный переход на стандартные фазные и линейные напряжения 230 В и 400 В соответственно, в странах СНГ одновременно со странами Евросоюза к 2003 году [2]. Этот стандарт был подготовлен методом прямого применения первого издания стандарта IE 60038, выпущенного в 1983 году (который по старой классификации назывался МЭК

38-83) [2]. В ГОСТ 29322-92 предусматривалось до 2003 года временно использовать номинальное напряжение 230 В с допусками +6, −10%, что увеличило бы величину верхнего порога предельно допустимого значения по сравнению с действующим ГОСТ 13109-97 менее чем на 2 В [2].

После 2003 года данным стандартом планировалось установить допуск на номинальное напряжение 230/400 В от −10 до +10%, чтобы полностью соответствовать требованиям европейского стандарта EN-50160:2010 [2]. Страны Евросоюза выполнили требования IEC-60038 и с 2008 года перешли на унифицированные напряжения. В настоящее время в странах СНГ ГОСТ 29322-92 принят и планируется переход систем электроснабжения на международные европейские стандарты [2].

Тепловое состояние обмоток АД является важнейшим фактором, определяющим их надежную эксплуатацию [3–5]. Согласно проведенным исследованиям [5] отклонение питающего напряжения при допустимых ГОСТ 32144-2013 параметрах питающего напряжения может приводить к тепловым перегрузкам АД до 32% и более и сокращению срока их эксплуатации. Дополнительного исследования требует оценка перегрева и разработка рекомендаций по безаварийной эксплуатации АД для обеспечения характеристик напряжения в соответствии с международными европейскими стандартами.

В работах [5] рассмотрено влияние снижения напряжения прямой последовательности на эксплуатационные характеристики АД. Дополнительного исследования требует оценка теплового состояния АД при повышении питающего напряжения до 230 В, которое предусматривается при переходе к международным европейским стандартам.

Целью данной работы является оценка теплового состояние асинхронных двигателей при переводе систем электроснабжения на международные европейские стандарты.

Таблица 1

Значения токов и температур статора и ротора при различных значениях ^{U}*р^{иК}Rmm

Тип АД	$U_р$ $U_Б$	0,9 198	0,95 209	10 220	1,05 231	11,2 42	1,15 253
4А50А4 Р=0. 06 кВт, Krmn = 0,3	I*	0,90	0,96	1,00	1,06	1,15	1,29
	1,2 р	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86
		0,94	0,99	1,00	1,11	1,25	1,25
	е*	1,11	1,02	1,00	1,00	1,03	1,07
ЭДК4-1МУ5 Р = 41 кВт $Kr_{тт}$ = 0,5	I* 1,1 р	0,95	0,98	1,00	1,03	1,06	1,09
	1,2 р	1,05	1,02	1,00	0,95	0,90	0,85
		0,97	0,98	1,00	1,04	1,08	1,14
	д*	1,11	1,02	1,00	1,00	1,01	1,03
ЭДК4Р5МК67У5		1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,99
	1,2 р	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86
Тип АД	U б	0,9 198	0,95 209	10 220	1,05 231	и. 242	1,15 253
Р = 115 кВт $K_{Rтт}$ = 0,88	о;	1,05	1,02	1,00	1,00	1,00	1,03
	о*	1,12	1,05	1,00	0,98	0,96	0,96
ЭДКО3,5 Р = 30 кВт Kr= 0,98	i’	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86
	1,2 пр	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86
	о;	1,04	1,02	1,00	1,00	1,00	1,02
	о;	1,11	1,04	1,00	0,98	0,96	0,96
ЭДК04-4МУ5 Р = 80 кВт $Kr_{тт}$ = 1,21	1,1 пр	1,02	1,01	1,00	0,99	1,00	1,00
	1,2 пр	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,85
	о;	1,10	1,04	1,00	0,98	0,96	0,96
	о*	1,16	1,07	1,00	0,97	0,92	0,91
ЭКВ3,5-125У5 Р = 125 кВт $Kr_{тт}$ = 2,31	1,1пр	1,07	1,03	1,00	0,97	0,95	0,93
	1,2пр	1,10	1,05	1,00	0,95	0,9	0,85
	о;	1,25	1,11	1,00	0,92	0,86	0,81
	о*	1,26	1,12	1,00	0,91	0,84	0,80
4А200А4 Р = 45 кВт Kr= 3,35	1,1пр	1,11	1,04	1,00	0,95	0,92	0,86
	1,2пр	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86
	о;	1,31	1,13	1,00	0,91	0,84	0,79
	о*	1,28	1,13	1,00	0,91	0,84	0,78

В предшествующих публикациях [5] установлено, что при повышении напряжения наибольшие тепловые перегрузки испытывают лобовые части об мотки статора, а при снижении – обмотки ротора. В [5] обосновано, что коэффициент сопротивления K_{Rmin} может быть использован в качестве критерия для оценки токовых и тепловых нагрузок в обмотках АД при отклонении питающего напряжения и получены формулы для его расчета.

В качестве примера в табл. 1 представлены токи и температуры наиболее нагруженных элементов конструкции АД с различными значениями коэффициентов сопротивления K_{Rmin} при различных значениях напряжения прямой последовательности. В качестве базового напряжения принято номинальное фазное напряжение $u_Б = 220$ В. В качестве базовых значений токов и температур принимаются их значения при симметричном питающем напряжении $u_Ф = 220$В.

Из анализа результатов, представленных в табл. 1, следует, что чем меньше коэффициент сопротивления K_{Rmin}, тем выше температуры обмоток статора и ротора при увеличении питающего напряжения. Для асинхронных двигателей коэффициент сопротивление может изменяться в пределах $K_{\text{Rтт}} = 0{,}3 \text{ ^ } 4{,}0$ [5]. Тогда в зависимости от температурных нагрузок АД при переводе систем электроснабжения на международные европейские стандарты все АД можно условно разделить на три группы: первая группа – АД с $K_{\text{R тт}} = 0{,}3 \text{ ^ } 0{,}85$; вторая – $Kr = 0{,}85 \text{ ^ } 1{,}15$; третья – $K_{\text{Rтт}} = 1{,}15 \text{ ^ } 4, 0$.

В качестве примера в табл. 2 представлены максимальные (0^{*}_{max}), минимальные ($0^{*}_{\text{тп}}$) значения температуры АД и $\text{Ао} = Э^{*}_{\text{тах}} Э^{*}_{\text{т11П}}$ при переходе системы электроснабжения на новый международный европейский стандарт (IEC-60038) и при эксплуатации в соответствии с отечественным ГОСТ 32144–2013.

По данным табл. 1, 2 для наглядности на рис. 1 представлена диаграмма, позволяющая оценить разброс температур АД при изменении напряжения в пределах допустимых стандартами значений.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2 и на рис. 1, следует, что при переходе системы электроснабжения на международный европейский стандарт IEC-60038 тепловые перегрузки обмоток АД и разброс температур несколько снизится. Например, при выполнении требований ГОСТ 32144-2013 превышение температуры обмотки АД с $K_{R\text{min}} = 1.\ 15 \text{ ^ } 4{,}0$ может достигать 1,31 $в_{Н}$, а при переходе на международный европейский стандарт IEC-60038 не превышает 1,13 $в_{Н}$. При выполнении требований ГОСТ 32144-2013 разброс температур обмоток АД с $K_{R\text{min}} = 0{,}85 \text{ ^ } 1{,}15$ составляет 20%, а при переходе на международный стандарт IEC-60038 не превышает 9%.

Снижение разброса температур позволяет осуществить рациональный выбор мощности АД и нагрузки на его валу. Из данных, представленных в табл. 1, 2, следует, что тепловые перегрузки при выполнении требований международного стандарта могут достигать 25%.

Наиболее неблагоприятно повышение напряжения сказывается на эксплуатации АД с $K_{R\text{тп}} < 0{,}85$. Например, при выполнении IEC 60038 температуры статора и ротора для асинхронных электродвигателей с $K_{R\text{min}} = 0{,}5$ могут достигать 1,14-$в_{1Н}$ и 1,03-$в_{2Н}$ соответственно, а для АД с $K_{Rm\text{п}} = 0{,}34 - 1{,}22в_{1Н}$ и 1,03-$в_{2Н}$ соответственно. Подобный рост температур приведет к сокращению срока безаварийной эксплуатации АД и досрочному выходу его из строя.

При переходе на европейский стандарт IEC 60038 (табл. 1, 2) наиболее рациональным является использование АД с $0{,}85 < K_{Rm\text{п}} < 1{,}15$. В этом случае рост температур в обмотках статора и ротора не превышает 5%. Например, для АД ЭДКО3,5 с $K_{Rm\text{п}} = 0{,}98$ при $U_{\text{пр}} = 1{,}15\, U_H$ температура статора вырастет на 3%, а температура ротора снизится на 4%. При эксплуатации АД с $K_{Rmm} > 1{,}15$ при выполнении требований международного стандарта IEC 60038 по напряжению разброс температур составляет от -22 до + 13%. В этом случае во избежание перегрева нагрузку на валу электродвигателя необходимо снижать.

Таблица 2

Значения максимальной (0^{*}_{max}) и минимальной ($в^{*}_{\text{тп}}$) температур наиболее нагруженного узла АД при различных значениях KR min

		Первая группа $Kr_{тт} = 0{,}3\ 0{,}85$	Вторая группа $Kr_{т.м} = 0{,}85\ 1{,}15$	Третья группа $Kr_{m}, n = 1{,}15\ 4{,}0$
IEC 60038	^{e}max	1,25	1,05	1,13
	^{e}min	0,96	0,96	0,78
	АО	0,35	0,20	0,41
ГОСТ 32144 2013	e* ^{e}max	1,25	1,10	1,31
	О*	0,90	0,90	0,90
	АО	0,29	0,09	0,35

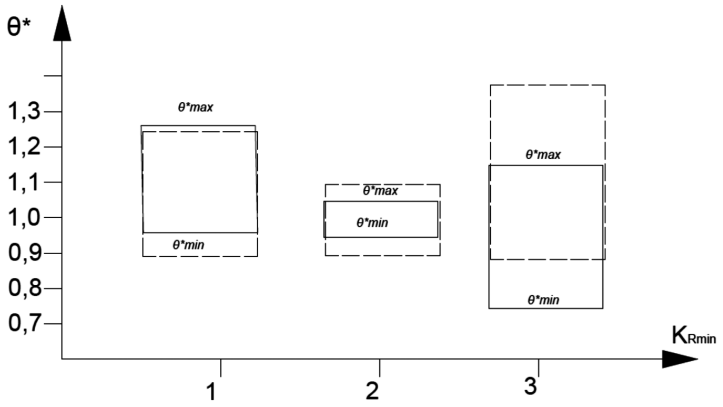


Рис. 1. Максимальная {0*$_{\text{тах}}$) *и минимальная* {в*$_{\text{Шп}}$) *температура наиболее нагруженного узла АД при различных* K_{Rmin} *при выполнении требований ГОСТ 32144-2013*(—) *и IEC-60038* (—)

Таблица 3

Нагрузка на валу АД в продолжительном режиме при различных значениях ^{U}пр$^{и K}$Rmin

^{K}Rmin	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,4	1,8	2,5	4,0
0,95Uн	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,92	0,9
1,15Uн	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	1,0	1,02	1,05	1,06	1,09	1,11

В качестве примера в табл. 3 представлены величины нагрузки на валу АД с различными коэффициентами сопротивления K_{Rmm}, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов при отклонении питающего напряжения в пределах допустимых Европейским стандартом EN-50160:2010. В качестве базовых (табл. 3) приняты значения соответствующих величин при симметричном напряжении сети. Из анализа результатов, представленных в табл. 3, следует, что чем ниже значение $K_{R\min}$, тем в большей степени необходимо снижать нагрузку на валу АД. Например, для исключения перегрева АД с $K_{R\min} = 0{,}3$ при $U_{\text{пр}} = 1{,}15\ U_H$ нагрузку на валу АД необходимо снизить на 6%.

Выводы

Результаты исследования позволяют оценить тепловое состояние АД в случае перехода систем электроснабжения на международные европейские стандарты:

– при переходе системы электроснабжения на международный европейский стандарт IEC-60038 тепловые перегрузки обмоток и диапазон изменения температур АД несколько снизятся;

– при эксплуатации АД с коэффициентом сопротивления $K_{\text{Rmin}} > 1{,}15$ при выполнении требований международного стандарта IEC-60038 по напряжению разброс температур составляет от –22 до + 13%;

– при переходе на европейский стандарт IEC-60038 наименьшие тепловые перегрузки наименьший разброс температур АД с коэффициентом сопротивления 0,85 <Krmn < 1,15;

– показано, каким образом должна изменяться нагрузка на валу АД в случае обеспечения характеристик напряжения в соответствии с международными европейскими стандартами, чтобы температура наиболее нагретого его узла не превышала допустимую.

Библиографический список

1. *Железко Ю. С.* Стандартизация напряжений, токов и частот в международной и отечественной практике // Электричество. 1992. № 12. С. 1–5.

2. *Жаркин А. Ф., Новский В. А., Палачев С. А.* Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2010. 167 с.

3. *Маренич К. Н.* Асинхронный электропривод горных машин с тиристорным коммутаторами. Донецк, ДонГТУ, 1997. 64 с.

4. Особенности моделирования и анализа пусковых и рабочих характеристик асинхронных двигателей при различных напряжениях сети / М. М. Федоров, Е. Р. Алексеев, В. Ф. Денник, М. В. Горелов // Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности: Материалы Всероссийской международной научно-технической конференции 19.05–21.05.1999. Таганрог, 2000. С. 230–235.

5. *Шелехова О. Г.* Определение зависимости тока статора асинхронного двигателя от напряжения прямой последовательности при различных параметрах его схемы замещения // Сб. трудов СПб ГУАП, 2016. С. 284–291.

6. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.

УДК 004.052

Ю. С. Акинина*
кандидат технических наук
Т. А. Сергеева*
кандидат технических наук, доцент
М. Ю. Сергеев*
кандидат технических наук, доцент
С. В. Тюрин*
кандидат технических наук, доцент
**Воронежский государственный технический университет*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСТРОЕННОГО В УПРАВЛЯЮЩИЙ ПРОЦЕССОР СТОРОЖЕВОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ РАЗМЕТКИ КОДОВ ИСПОЛНЯЕМОЙ ПРОГРАММЫ

В статье обосновывается целесообразность применения в процессорах, используемых в робототехнике, различных сторожевых механизмов, оперативно обнаруживающих ошибки потока управления. Рассмотрен известный сторожевой механизм на основе прогнозирования адреса ячейки программной памяти, в которой хранится следующий код команды, и оригинальный сторожевой механизм, базирующийся на разметке кодов программной памяти. Для оригинального механизма предложены аналитические соотношения, позволяющие прогнозировать вероятность обнаружения ошибок потока управления для CISC-процессоров с системой команд произвольной байтности на основе статистики команд исполняемого кода программы.

Ключевые слова: *сторожевой механизм, управляющий процессор, ошибки потока управления, вероятность обнаружения.*

Y. S. Akinnina*
PhD Sc. Tech.
T. A. Sergeeva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. Y. Sergeev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. V. Tyurin*
PhD, Tech., Associate Professor
**Voronezh state Technical University*

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE BUILT-IN CONTROL PROCESSOR WATCHDOG MECHANISM BASED ON MARKUP CODES EXECUTABLE PROGRAM

In the article the expediency of application processors used in robotics, various watchdog mechanisms to promptly detect errors in the control flow describes the known watchdog mechanism based on the prediction of the cell address program memory in which is stored the next command code, and the original watchdog mechanism based on the markup codes software memory. For the original mechanism, analytical relations are proposed that allow predicting the probability of detection of control flow errors for CISC-processors with a system of arbitrary byte commands based on the statistics of the program executable code commands.

Keywords: *watchdog mechanisms, control processor, control flow errors, detection probability.*

К управляющим процессорам, применяемым в робототехнике, предъявляются повышенные требования по устойчивости не только к внезапным отказам, но и к случайным сбоям. Одним из наиболее эффективных путей, позволяющих парировать в режиме функционирования процессора последствия отказов и сбоев, является включение в их состав встраиваемых систем повышения показателей надежности, например, на основе сторожевых механизмов (watchdog mechanisms) [1]. Сторожевые механизмы могут использоваться на всех уровнях организации управляющих систем, реализуемых аппаратным, программным или комбинированным способами.

Одним из классов ошибок, существенным образом влияющих на надежность и безопасность управляющих процессоров, являются ошибки потока управления (Control-Flow Errors, или CFE) [2–6], которые приводят к тому, что процессор начинает реализовывать псевдопрограмму, интерпретируя коды команд (opcode) как коды данных (data code), и наоборот. Подобный процесс инициализируется сбоями, которые самопроизвольно возникают в случайные моменты времени и кратковременно искажают коды программного счетчика, коды адреса или коды данных в магистралях управляющего процессора. Последствия таких сбоев могут присутствовать длительное время в пассивном состоянии, не отражаясь на функционировании процессора, но при определенных условиях активизируются и приводят к ошибкам в вычислительном или управляющем процессе. В связи с этим при проектировании управляющих процессоров стремятся использовать такие сторожевые механизмы, которые максимизируют вероятность обнаружения ошибок потока управления при ограничениях на время их обнаружения или минимизируют время обнаружения при ограничениях на вероятность обнаружения.

Под сторожевыми мониторами будем понимать согласно [1] аппаратные и (или) программные компоненты, позволяющие получать информацию о внутреннем состоянии контролируемой системы. На основании этой информации, предсказаний формализованной модели системы, а также данных с входов и выходов контролируемой системы сторожевой механизм делает вывод о наличии или отсутствии в ней ошибок и неисправностей.

Например, в [7] предложен следующий алгоритм функционирования сторожевого механизма на основе прогнозирования адреса ячейки программной памяти, из которой должен быть считан код следующей команды. Не вдаваясь в подробности практической реализации этого алгоритма, поясним его сущность.

Процессор контролируемой системы после запуска обращается по фиксированному адресу к ячейке программной памяти, откуда считывает код первой исполняемой инструкции. Адрес считанной инструкции (то есть код PC) и код инструкции также считывается сторожевым монитором, который запоминает код адреса и проверяет на принадлежность кода инструкции к инструкциям ветвления (Branch Instruction). Если считанный код не является кодом инструкции ветвления, то сторожевой монитор прогнозирует код адреса ячейки, содержащей код следующей инструкции путем прибавления к запомненному ранее коду программного счетчика PC величину «instruction size», определяющей количество обращений процессора контролируемой системы к программной памяти, необходимое для исполнения текущей инструкции. Если считанный код является кодом инструкции ветвления, то сторожевой монитор прогнозирует код адреса ячейки, содержащей код следующей инструкции, путем прибавления к коду программного счетчика величины «instruction size» – если условие ветвления не выполняется, или прибавляет величины смещения «Offset» и «instruction size» – если выполняется. Как утверждается в [7], рассмотренный сторожевой механизм на основе прогнозирования адреса ячейки программной памяти обеспечивает хороший компромисс между охватом обнаружения неисправностей и занимаемой площади на кристалле. Однако данный сторожевой механизм обладает определенным недостатком. Ясно, что для прогнозирования адреса следующей ячейки памяти, содержащей код команды, управляющий процессор и сторожевой монитор используют одни и те же исходные данные – код исполняемой команды. Следовательно, если код исполняемой команды искажается при чтении из программной памяти, то и управляющий процессора и сторожевой монитор определят ошибочный адреса следующей ячейки памяти, содержащей код команды.

В [8] предложен сторожевой монитор на основе разметки кодов исполняемой программы. Данный способ ориентирован на управляющие процессоры с многобайтным форматом команд. Для реализации данного способа используется программная память с дополнительным битом контроля четности/нечетности и управляющий процессор, формирующий при обращении к программной памяти внешний сигнал оповещения о том, как будет интерпретироваться считываемый код с шины данных. Если данный код будет интерпретироваться как код команды, то сигнал оповещения примет значение логической единицы, в противном случае он будет равен логическому нулю.

На основе предварительного анализа рабочей программы процессора, представленной в виде двоичных кодов, определяют адреса тех ячеек программной памяти, в которых будут содержаться коды команд. Для каждой такой ячейки определяется количество единичных значений, содержащихся в коде команды, при этом если количество единичных значений в коде команде четное, то в дополнительный бит программной памяти должна впоследствии записываться единица (то есть код команды дополняется до нечетности). Для всех других кодовых слов рабочей программы, включая и неиспользуемые программой ячейки программной памяти, кодовые слова дополняются до четности. Затем рабочая программа, представленная в виде двоичных кодов, загружается в программную память со-

вместно с загрузкой битов контроля четности/нечетности.

Управляющий процессор начинает свою работу с того, что устанавливает на шину адреса двоичный код ячейки программной памяти, из которой будет считываться (n+1) – разрядный код (n-разрядов кода команд и данных и один разряд четности/нечетности). Одновременно с установкой кода на шине адреса процессор формирует на одной из линий шины управления сигнал, поступающий на (n+2)-й вход сумматора по модулю 2 и свидетельствующий о том, что данные, считанные процессором из данной ячейки программной памяти, будут интерпретироваться процессором как код команды. Иначе говоря, процессор формирует признак чтения кода команды из ячейки программной памяти. Далее на одной из линий шины управления формируется сигнал чтения из ячейки программной памяти. Одновременно с фронтом сигнала чтения запускается формирователь, предназначенный для выработки сигнала стробирования схемы «И». С началом действия сигнала чтения на выходах программной памяти формируется код, который поступает в шину данных и на n входов сумматора по модулю 2. На (n+1) вход сумматора поступает сигнал с бита четности/нечетности. К моменту формирования фронта сигнала стробирования сумматор по модулю 2 формирует на своем выходе стабильный признак четности или нечетности (n+2) – разрядного входного кода. Сигнал с выхода сумматора поступает на второй вход схемы «И». При единичном значении стробирующего сигнала, поступающего на первый вход схемы «И», проверяется значение сигнала с выхода сумматора. Если на выходе сумматора сформирован «0», то это свидетельствует о том, что код, считанный из программной памяти, не имеет нечетного числа искажений и правильно интерпретируется процессором. Если на выходе сумматора сформирована «1», то это свидетельствует о том, что код, считанный из программной памяти, либо имеет искажения, либо неправильно интерпретируется процессором. При этом на выходе схемы «И» будет сформирован единичный сигнал, по длительности примерно равный стробирующему сигналу и вызывающий прерывание процессора. Подпрограмма обслуживания данного прерывания выбирается пользователем и ориентируется на целенаправленную реакцию на возможные случайные сбои.

Пусть имеем процессор, система команд которого состоит из однобайтных, двухбайтных и трехбайтных команд (например, микропроцессор I8080). Тогда любая программа для этого микропроцессора будет состоять из n_1 однобайтных команд, n_2 двухбайтных команд и n_3 трехбайтных команд. Размер (в байтах) всей программы определяется как (1):

$$\mathbf{n} = n_1 + 2\,n_2 + 3n_3. \qquad (1)$$

Найдем вероятность (P) пропуска ошибок потока управления как (2):

$$\mathbf{P} = \mathbf{c}_1\mathbf{P}_1 + \mathbf{c}_2\mathbf{P}_2 + \mathbf{c}_3\mathbf{P}_3, \qquad (2)$$

где $\mathbf{P}_i$ – вероятность пропуска сбоя при выполнении i-байтной команды; $\mathbf{c}_i$ – доля i-байтных команд в рабочей программе.

Ошибки потока управления (независимо от конкретной причины) проявляются в том, что в какой-то момент времени ($?_c$) микропроцессор начинает интерпретировать коды команд как коды данных, и наоборот. Отождествим момент времени $?_c$ с моментом чтения кода команды из ячейки программной памяти по адресу A. Полагаем, что ошибка потока управления эквивалентна несанкционированному переходу микропроцессора к ячейке памяти со случайным адресом $\mathbf{A}_x$. Тогда для рассматриваемого способа повышения сбоеустойчивости и выбранного типа микропроцессора имеем следующие случаи.

Случай 1. Из ячейки по адресу **A** читается код однобайтной команды. Процессор несанкционированно переходит по адресу $\mathbf{A}_x$. Если в ячейке $\mathbf{A}_x$ находится код команды (одно-, двух- или трехбайтной), то сбой не обнаруживается и ошибка потока управления продолжает распространяться. Если по адресу $\mathbf{A}_x$ читается не код команды, то сбой обнаруживается и ошибка потока управления может быть локализована.

Случай 2. Из ячейки по адресу **A** читается код двухбайтной команды. Процессор несанкционированно переходит по адресу $\mathbf{A}_x$. Если в ячейке $\mathbf{A}_x$ находится код команды, то сбой обнаруживается. Если в ячейке $\mathbf{A}_x$ находится не код команды, то процессор несанкционированно переходит по адресу A_y. Если в ячейке по адресу $\mathbf{A}_y$ находится код команды, то сбой не обнаруживается. Если же по адресу $\mathbf{A}_y$ извлекается код данных, то сбой обнаруживается.

Случай 3. Из ячейки по адресу **A** читается код трехбайтной команды. Процессор несанкционированно переходит по адресу $\mathbf{A}_x$. Если в ячейке $\mathbf{A}_x$ находится код команды, то сбой обнаруживается. Если в ячейке $\mathbf{A}_x$ находится не код команды, то процессор несанкционированно переходит по адресу $\mathbf{A}_y$. Если в ячейке по адресу $\mathbf{A}_y$ находится код команды, то сбой обнаруживается. Если в ячейке по адресу $\mathbf{A}_y$ находится код данных, то процессор несанкционированно переходит по адресу A_z. Если по адресу $\mathbf{A}_z$ читается код команды, то сбой не обнаруживается, а если читается код данных – то сбой обнаруживается.

Как следует из проведенного анализа, любая исполняемая процессором программа представляется состоящей из некоторой смеси одно-, двух- и трехбайтных команд. При этом полагаем, что коды, составляющие программу, не изменяются (не искажаются) в программной

памяти под воздействием сбоев – сбой лишь искажает код адреса при обращении к ячейкам памяти. При таких принимаемых условиях метод аналитической оценки эффективности рассматриваемого способа повышения сбоеустойчивости микропроцессоров сводится к решению классической задачи теории вероятностей – «извлечение шаров с возвращением». Как следует из приведенного выше, процедура анализа различных случаев сбоев, приводящих к ошибкам потока управления, заключается в последовательной проверке принадлежности кодов к множеству команд и множеству данных. Это можно интерпретировать как нахождение вероятности совместного появления событий, которые могут быть зависимыми или независимыми. Численное решение таких задач базируется на теоремах умножения и сложения вероятностей.

Введем в рассмотрение величины P_k – вероятность чтения из ячейки программной памяти кода команды и P_d – вероятность чтения из ячейки программной памяти кода данных. Тогда с учетом (1) имеем: (уравнения (5)–(7)

$$P_1 = P_k = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{n},$$

$$P_2 = P_d P_k = \frac{n_2 + 2n_3}{n} \times \frac{n_1 + n_2 + n_3}{n},$$

$$P_3 = P_d P_d P_k = \frac{n_2 + 2n_3}{n} \times \frac{n_2 + 2n_3}{n} \times \frac{n_1 + n_2 + n_3}{n}.$$

Соотношения (5)–(7) можно преобразовать к более общему виду для микропроцессоров, система команд которого состоит из команд, содержащих i байт ($i = 1 \ldots g$). Для этого преобразуем соотношения (5)–(7) следующим образом: (уравнения (8)–(12)

$$P_k = \frac{(c_1 + c_2 + c_3)n}{c_1 n + 2c_2 n + 3c_3 n} = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{c_1 + 2c_2 + 3c_3},$$

$$P_d = \frac{c_2 n + 2c_3 n}{c_1 n + 2c_2 n + 3c_3 n} = \frac{c_2 + 2c_3}{c_1 + 2c_2 + 3c_3},$$

$$P = \sum_{i=1}^{g} c_i ((P_d)^{i-1} \times P_k),$$

$$P_d = \frac{\sum_{i=1}^{g-1} (ic_{i+1})}{\sum_{i=1}^{g} (ic_i)}, \; P_d = \frac{\sum_{i=1}^{g} c_i}{\sum_{i=1}^{g} (ic_i)}.$$

В аналитическом методе оценки эффективности, базирующемся на соотношениях (5)–(7), исходили из того, что адреса ячеек программной памяти $\mathbf{A}_x$, $\mathbf{A}_y$, $\mathbf{A}_z$ после сбоя формируются по случайному закону. Такое формирование адресов было бы адекватным только в случае очень интенсивного возникновения сбоев. Реально же интенсивность подобных сбоев очень низкая, в связи с чем адреса программной памяти следует формировать как $\mathbf{A} = \mathbf{A}_x$, $\mathbf{A}_y = \mathbf{A}_{x+1}$, $\mathbf{A}_z = \mathbf{A}_{x+2}$. При таком алгоритме обращения к программной памяти после сбоя вытекает, что пропуск сбоя однобайтной команды не обнаруживается тогда, когда в ячейке с адресом $\mathbf{A}_x$ обнаруживается код команды. Пропуск сбоя двухбайтной команды не обнаруживается тогда, когда в ячейке памяти с адресом $\mathbf{A}_x$ обнаруживается код данных и в ячейке памяти с адресом $\mathbf{A}_y = \mathbf{A}_{x+1}$ обнаруживается код команды. Пропуск сбоя трехбайтной команды не обнаруживается тогда, когда в ячейке памяти с адресом $\mathbf{A}_x$ обнаруживается код данных и в ячейке памяти с адресом $\mathbf{A}_y = \mathbf{A}_{x+1}$ обнаруживается код данных и в ячейке с адресом $\mathbf{A}_z = \mathbf{A}_{x+2}$ обнаруживается код команды. Иначе говоря, вероятность пропуска однобайтной команды пропорциональна количеству команд в программе; вероятность пропуска двухбайтных команд пропорциональна количеству последовательных фрагментов «данные – команда» в программе; вероятность пропуска трехбайтных команд пропорциональна количеству последовательных фрагментов «данные – данные – команда». Отсюда следует, что: (уравнения (13)–(15)

$$P_1 = \frac{(c_1 + c_2 + c_3)n}{c_1 n + 2c_2 n + 3c_3 n} = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{c_1 + 2c_2 + 3c_3},$$

$$P_2 = \frac{(c_2 + c_3)n}{c_1 n + 2c_2 n + 3c_3 n} = \frac{c_2 + c_3}{c_1 + 2c_2 + 3c_3},$$

$$P_3 = \frac{c_3 n}{c_1 n + 2c_2 n + 3c_3 n} = \frac{c_3}{c_1 + 2c_2 + 3c_3}.$$

Обобщая (13)–(15) с четом (1) для микропроцессоров, система команд которого состоит из команд, содержащих i байт ($i = l \ldots g$), получаем:

Многократные расчеты для программ из различных смесей одно-, двух- и трехбайтных команд по соотношениям (8)–(12) и (13)–(15) и усреднение результатов расчетов показали, что усредненные вероятности пропуска ошибок потока управления $P_{(8-12)} \sim 0{,}31$ и $P_{(13-15)} \sim 0{,}36$ отличаются не более чем на 15%. Как и ожидалось, аналитическая модель, (уравнения (16)–(17)

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{g-1} (ic_{i+1})}{\sum_{j=1}^{g} (jc_j)}, \; P_d = \sum_{j=1}^{g} c_i P_i.$$

базирующаяся на соотношениях (8)–(12), дает в среднем более оптимистичный результат по сравнению с более реалистичной моделью, базирующейся на соотношениях (13)–(15).

Следует отметить, что ошибки потока управления могут возникать также из-за искажения читаемых кодов команд и данных. Однако в рассматриваемом способе повышения сбоеустойчивости микропроцессорных систем при помощи соответствующего дополнительного бита программной памяти обеспечивается не только

различимость кодов команд и кодов данных, но и контроль четности данных, читаемых из ячеек программной памяти. Из этого следует, что данный способ дополнительно обеспечивает обнаружение однократных и многократных нечетных ошибок чтения программной памяти, в связи с чем общая вероятность пропуска ошибок потока управления будет приближаться к 0,18…0,22.

Таким образом, предлагаемый аналитический метод оценки эффективности «способа разметки кодов команд» позволяет прогнозировать вероятность обнаружения ошибок потока управления в микропроцессорной системе на основе процентного соотношения команд различной байтности, содержащихся в рабочей программе микропроцессора.

Предложенный аналитический метод оценки эффективности без ограничений применим к микропроцессорам с CISC-архитектурой и многобайтным форматом команд любой кратности. В частности, показано, что данный сторожевой механизм потенциально позволяет обнаруживать до 80% ошибок потока управления, вызванных кратковременным искажением кодов программного счетчика, кодов адреса или кодов данных в магистралях микропроцессорной системы для микропроцессоров с трехбайтным форматом команд.

Библиографический список

1. *Платунов А. Е., Стерхов А. С.* Сторожевые механизмы во встраиваемых вычислительных системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 301–311.

2. *Vemu R., Abraham J.* CEDA: Control-Flow Error Detection Using Assertions // IEEE Trans. on Computers. 2011. Vol. 60 No. 9. P. 1233–1245.

3. *Рожков М. В., Тюрин С. В.* Перспективные подходы к повышению эффективности программного метода обнаружения ошибок потока управления // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 1 (51). С. 65–71.

4. *Li A., Hong B.* Online control flow error detection using relationship signatures among basic blocks // Comput. Electr. Eng., 36 (January 2010). P. 132–141.

5. *Khoshavi N., Zarandi H., Maghsoudloo M.* Control-Flow Error Detection Using Combining Basic and Program-Level Checking in Commodity Multi-core Architectures, 6th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES'11). 2011. P. 103–106.

6. Efficient Mitigation of Data and Control Flow Errors in Microprocessors / L. Parra, A. Lindoso, M. Portela et al. // In Proceedings of the 14th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems RADECS 2013. Oxford, UK. Sept 23–27, 2013.

7. Control Flow Checking through Embedded Debug Interface / L. Parra, A. Lindoso, M. Portela et al // Proceedings 26th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems. 2011. P. 339–343.

8. *Тюрин С. В., Рожков М. В.* Способ повышения надежности микроЭВМ: Патент 2530325 РФ; опубл. 10.10.2014; бюл. № 28.

УДК 004.5–896

Р. Р. Галин*
младший научный сотрудник
**Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук*

СОТРУДНИЧЕСТВО ЧЕЛОВЕКА И РОБОТА НА ПРИМЕРЕ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

В статье рассматриваются вопросы обеспечения оптимального сотрудничества между человеком и роботом и организация их взаимодействия на примере коллаборативной робототехники. Речь идет о построении модели взаимодействия интеллектуального ассистента и интеллектуального робототехнического агента в многоагентной системе, которые совместно выполняют поставленную задачу в спланированном сценарии.

Ключевые слова: *коллаборативная робототехника, интеллектуальные агенты, взаимодействие и система управления, коллаборация человека и робота.*

R. R. Galin*
**Junior Researcher*
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences

THE HUMAN-ROBOT COOPERATION ON THE EXAMPLE OF COLLABORATIVE ROBOTICS

This paper describes the organization of the optimal functions cooperation between human and robot and their interaction on the example of collaborative robotics. It presents about building a model of interaction between an intelligent assistant and an intelligent robotic agent in multi-agent system, which together perform the task in a planned scenario.

Keywords: *collaborative robotics, intelligent agent, interaction and control system, Human-Robot collaboration.*

Введение

Взаимодействие между человеком и роботом может быть рассмотрено с разных сторон. С одной стороны, это взаимодействие в общем пространстве без непосредственного контакта человека с роботом и синхронизация их задач, а с другой – это совместный процесс выполнения задач, учитывающий корректировку движений робота в соответствии с движением человека в режиме реального времени. Таким образом, появляется задача по созданию мультиагентной коллаборативной системы, в которой выстроен процесс взаимодействия между человеком и роботом.

По мере увеличения функциональных возможностей роботов многократно возросло количество их возможных применений в различных сферах деятельности человека, однако на сегодняшний день множество рабочих процессов попрежнему не могут быть полностью автоматизированы. Поэтому возникает потребность в совместной работе человека и робота при выполнении поставленных задач. Процесс совместной работы человека и робота принято называть коллаборативным взаимодействием, а приспособленный для этого класс роботов – коллаборативными роботами [1, 3]. Понятие «коллаборативный робот» претерпело ряд изменений за счет развития новых технологий в области робототехники. Изначально термин «коллаборативный робот» был применим к промышленным манипуляторам, впервые использовался в рамках исследовательского проекта компании General Motors и означал «робота, который работает с человеком рука об руку» [2].

Коллаборативные роботы и требования безопасности

Современное понимание коллаборативного робота связано с принятыми требованиями международных стандартов и технических спецификаций «ISO/TS 15066:2016», разработанным Международной организацией по стандартизации [3]. Согласно данной спецификации коллаборативным является робот, предназначенный для прямого взаимодействия с человеком в рамках определенного совместного пространства.

Основные формы совместной работы коллаборативного робота, отвечающие технической спецификации ISO/TS 15066:2016 [3–5]:

– «Safety-rated monitored stop» – контролируемая остановка (остановка робота, если человек попадает в зону безопасного рабочего пространства);

– «Hand guiding» – ручное ведение (роботы с силомоментными датчиками);

– «Speed and separation monitoring» – контроль скорости и разделения (замедление процессов робота по мере приближения человека, возможна параллельная деятельность и остановка при пересечении заданных границ безопасности);

– «Power and force limiting» – ограничение мощности и усилия (контролируемые сила и мощность робота).

Оптимизация производства за счет внедрения робототехнических решений широко используется и в перспективе станет основой любого бизнес-процесса. Определим различие коллаборативных роботов от других робототехнических решений. Далее представлено пять различий, которые позволяют описать коллаборативных роботов [1]:

1. Кооперация человека и робота. Следует понимать, что работа промышленных роботов выполняется в соответствии с заложенной программой, не учитывающей работающего рядом человека. Таким образом, рабочее пространство огораживается с целью обеспечения безопасного производственного процесса. В отличие от промышленных роботов, коллаборативные изначально предназначены для совместной работы в кооперативной среде и оказания помощи при решении сложных задач, которые не могут быть полностью автоматизированы.

2. Умное и безопасное взаимодействие. Коллаборативные роботы оснащены датчиками, позволяющими реагировать на человека при контакте с ним: сближение, прямой контакт. Действия робота при контакте с человеком: снижение скорости, временная или полная остановка. В результате совместное рабочее пространство является безопасным для коллаборации человека и робота.

3. Снижение риска при реализации опасных работ, таких как: транспортировка опасных объектов, острых или нагретых деталей и т. п. В свою очередь человек может заниматься менее сложными задачами или вести контроль качества исполнения.

4. Гибкость и обучаемость коллаборативных роботов. Упрощенные подходы к программированию и перепрограммированию роботов для решения разнообразных задач.

5. Универсальность в применении. Помимо возможности перепрограммировать робота под новую задачу, его также можно устанавливать в различном положении на поверхности: горизонтально, вертикально или в перевернутом положении. Коллаборативные роботы, в отличие от промышленных, имеют меньшую массу и габариты.

В настоящее время коллаборативные роботы применяются не только в промышленности, но и в сферах здравоохранения, обслуживания, образования и в сельском хозяйстве. Наиболее распространенный сценарий совместной работы человека и робота в общем пространстве – это работа, в которой человек и робот выполняют задачи последовательно. Чаще всего роботы выполняют утомительные или неэргономичные задачи. Совместная работа, в которой коллаборативный робот реагирует в реальном времени на движение человека, является наиболее технически сложным процессом, поскольку робот должен приспосабливаться к поведению человека, чьи действия не являются полностью предсказуемыми, а человек должен быть уверен, что весь процесс совместной работы отвечает требованиям безопасности. Таким образом, возникает новая задача организации взаимодействия человека и робота, когда робот должен функционировать в условиях неопределенности, самостоятельно адаптироваться и обучаться.

Концепция оптимального распределения функций между человеком и роботом

Вопрос классификации взаимодействия между человеком и роботом, работающих в общем пространстве, возник еще с момента необходимости создания эффективной человеко-машинной системы. Суть заключается в оптимальном сочетании возможностей робота и человека в стремлении снизить человеческие трудозатраты при выполнении поставленных задач.

Если возможности и свойства рассматриваемого робота могут быть ограничены его функциональностью, степенями свободы, его юзабилити и т. д., то человек в данной связке выступает в роли черного ящика с так называемым человеческим фактором. Теоретическими основами для изучения человеческого фактора являются: эргономика и инженерная психология, так как в человеко-машинной системе человек занимает ключевое место, поэтому помимо математического моделирования в проектировании системы в целом необходимо осуществить физическое моделирование – экспериментальное исследование системы управления, учитывая социальные аспекты, вызванные изменениями деятельности человека.

В исследовательской работе [6] выделены критерии проектирования работы в человеко-машинной системе, которые применимы и сегодня при рассмотрении системы с человеком и роботом:

1. На первом месте при проектировании системы стоит обеспечение безопасности.

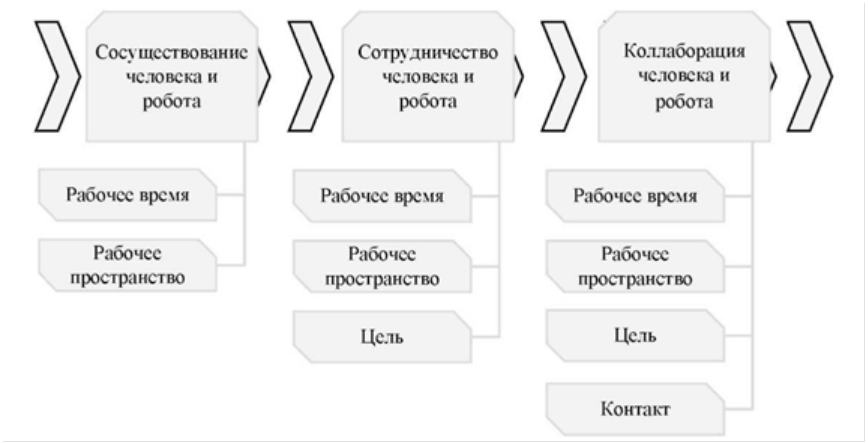


Рис. 1. Классификация взаимодействия человека и робота

2. Робот должен приспосабливаться к человеку, а не наоборот. Если система функционирует недостаточно хорошо, то следует вести доработку робота, а не искать замену человеку-ассистенту.

3. Необходимо сводить к минимуму разного рода исключения, создавая условия, при которых каждый человек-ассистент в рабочем пространстве мог бы использовать робота.

4. Процесс сотрудничества человека и робота должен быть построен так, чтобы интеллектуальная и социальная деятельности возлагались на робота, а легкая физическая и канцелярская – на человека.

5. Создавая наилучшие условия для взаимодействия человека и робота, необходимо уделять внимание взаимодействию агентов системы для эффективности труда и снижения количества ошибок.

6. Роботы предназначены для повышения производительности труда человека.

Концептуально взаимодействие человека и робота можно разделить на следующие составные элементы: время работы, рабочее пространство, цели взаимодействия и контакт [7], представленные на рис. 1.

В представленной концепции рабочее время определяется как время, в течение которого человек и робот взаимодействуют в рабочем пространстве. Каждая сущность имеет поставленную цель, которая достигается совместно или может быть раздельной. Если существует общее время в одном рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой сосуществование человека и робота. При условии единой цели взаимодействия сущности могут иметь различные задачи, что характеризует их сотрудничество, а если происходит прямой контакт (например, тактильный или слуховой), то взаимодействие может быть обозначено как коллаборация человека и робота.

Коллаборация между человеком и роботом автором будет показана на примере многоагентной системы, в которую входят манипуляторы, чьи характеристики и меры безопасности отвечают нормам коллаборативной робототехники, и человек, взаимодействующий с манипулятором в общем пространстве.

Технология многоагентных систем в моделировании взаимодействия человека и робота

Многоагентные системы (далее по тексту – МАС) представляют собой некоторое множество интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом, учитывая взаимное влияние со стороны внешней среды [8–11]. Изначально данное понятие связано с программными системами или моделями, которые описывают процесс их работы и поведения. Тогда в качестве агента выступает программный агент (исполняемая программа) или абстрактный интеллектуальный агент, например экономический агент (то есть модель, формализованное описание действующего лица реальной системы). При рассмотрении робототехнических систем в качестве агента выступают роботы [12–15]. Ключевыми аспектами интеллектуальных агентов являются целенаправленность и автономность, связанная с действиями на основе целенаправленных проблемно-ориентированных рассуждений.

Более комплексное определение интеллектуального агента определено в работе [16], где выделены следующие характеристики:

– способность решения задач, поставленных людьми или другими компьютерными агентами;

– активность, то есть способность инициировать решение задачи и предлагать свои услуги пользователю;

– сетевая «среда обитания» и способность самоорганизации в ней;

– полуавтономность (у пользователя есть возможность управлять уровнем автономности агента);

– антиципация, то есть способность предвидеть запросы пользователя;

– надежность;

– способность сотрудничать с людьми или другими компьютерными агентами в интересах решения задачи;

– гибкость, проявляющаяся в способности работать с неоднородными агентами и удаленными информационными ресурсами;

– адаптивность, способность оперативно приспосабливаться к изменению потребностей пользователя и факторов среды;

– настойчивость в решении задачи.

В данной статье рассматривается общий вид МАС с двумя интеллектуальными агентами, формализованным описанием процессов и их представлением как системы, состоящей из агентов (человека и робота) и среды. Архитектура многоагентной системы с когнитивными процессами представлена на рис. 2.

Многоагентная система представлена набором действующих агентов и пассивной средой. Каждый агент имеет свое представление о внешнем окружении, текущее состояние, целеполагание и логику. Агенты осуществляют коммуникацию, а их деятельность отражается в обработке информации, принятии решения и воздействии на среду. Общее представление взаимодействия рассматриваемых агентов относится к концепции теории рабочих команд или теории командной работы агентов. Модель командной работы, отраженная в работах [16–21], описывает общие положения рассуждения и взаимодействия агентов команды на основе комбинирования теории общих намерений и теории общих планов. Суть данных теорий сводится к обязательству команды агентов (человека и робота) к достижению общей цели, в свою очередь сама цель декомпозируется (в пространстве и времени) на множество подцелей, которые достигаются каждым агентом команды. Стоит отметить, что существуют проблемы и ограниченность применения комбинированных теорий взаимодействия [22], связанных с такими ситуациями, как невозможность выполнения действий агентом, невыполнимость действий, непредвиденность ситуации при исполнении действий. Поэтому поиск решения эффективного сотрудничества между человеком и роботом для достижения желаемого результата в многоагентной системе не теряет актуальности.

Рассмотрим пример оптимального распределения работ между человеком и роботом при автоматизации технологического процесса сборки деталей. Под оптимальностью понимается минимизация затрат времени человека на выполнение операции, включая затраты робота. В качестве технологического процесса берется простейшая задача по сборке изделия из составных элементов в детерминированной среде.

Сначала представим общие затраты ресурсов человека на технологический процесс:

$$F(A_1) = \sum_{i=1}^{n} a_i d_i,$$

где a_t – время на одну операцию технологического процесса человека из некоторого множества операций n; d_t – количество операций технологического процесса.

Далее добавляем агента-робота, распределяя общий технологический процесс по затратам времени на сборку изделия. Таким образом, получим стоимость общих затрат человека и робота на технологический процесс:

$$F(A_1, A_2) = \sum_{i=1}^{n} a_i d_i + \theta(\alpha) \sum_{i=1}^{n} b_i d_i,$$

где b_t – время на одну операцию технологического процесса человека; $b(a)$ – значение стоимости рабочего времени агента-робота.

Стоимость рабочего времени робота будет получаться из деления затрат человека на остаток ресурса (P) робота после вычитания затрат на момент выполнения операции.

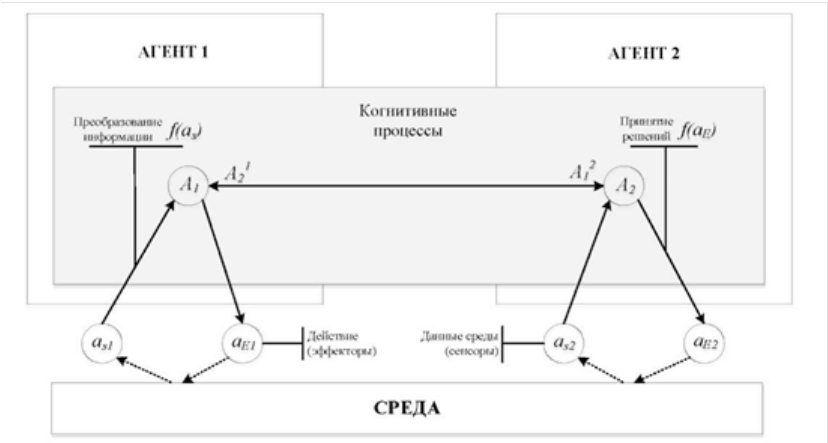


Рис. 2. Архитектурная схема многоагентной системы

Результатом выполнения расчетов является решение об оптимальном распределении работ между человеком и роботом в технологическом процессе, которое сводит к минимизации общие затраты человеческого труда на производстве.

Заключение

Важно отметить, что, рассматривая разницу между коллаборативным и промышленным роботом, следует уделять особое внимание оценке риска его использования в общем пространстве, а не самому роботу. Так как в стандарте, регламентирующем «коллаборативную робототехнику», редко речь идет о роботе, в первую очередь говорится о коллаборативном приложении (кабели, комплектующие, манипулятор с захватом и т. д.), что является всем тем, что находится в общем рабочем пространстве человека и робота.

Итак, подводя итоги по выполненной работе, можно предполагать, что коллаборативная робототехника способна занять основное место в развитии робототехники в ближайшем будущем. Роботы высокого поколения, обладающие искусственным интеллектом, уже сменяют своих промышленных предшественников на производствах.

Создание условий для совместной работы человека и робота обеспечат эффективность и производительность технологических процессов за счет разделения и автоматизации операций. В дальнейшем предстоит решать сложные задачи по обработке информации при взаимодействии человека и робота, изучению характеристик человека-агента в системе человек – робот, а также исследовать эффективные решения по распределению функций между человеком и роботами, обладающими разной степенью автономности.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00331.

Библиографический список

1. *Ермишин К. В., Ющенко А. С.* Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. № 3 (12). 2016. С. 3–9.

2. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. URL: http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml?emsrc=socialmedia&refID=hm/17/b/twitter/intensive/regel/cobots/en (дата обращения: 15.12.2018).

3. ISO/TC 299 Robotics ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices Collaborative robots, 2016. URL: https://www.iso.org/standard/62996.html (дата обращения: 17.12.2018).

4. *Lazarte M.* Robots and humans can work together with new ISO guidance. URL: https://www.iso.org/news/2016/03/Ref2057.html (дата обращения: 15.12.2018).

5. *Галин Р. Р.* Виртуальный полигон для эффективного взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6 (86). Ч. II. С. 112–118.

6. *Konz S.* Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons, Inc., 1990.

7. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future. Occupational Ergonomics / J. Schmidtler, V. Knott, C. Holzel, K. Bengler. 2015. No 12 (3). P. 83–95.

8. *Wooldridge M., Jennings N.* Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey // Intelligent Agents: ECAI–94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (Amsterdam, The Netherlands, August 8–9, 1994). Berlin: Springer Verlag, 1995. P. 1–22.

9. *Wooldridge M., Jennings N.* Intelligent Agents: Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. 1995. Vol. 10. № 2. P. 115–152.

10. *Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R.* Cloud robotic platform on basis of fog computing approach // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 11097 LNAI. P. 34–43.

11. *Тимофеев А. В.* Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий. СПб.: СПИИ РАН, 1999. С. 71–81.

12. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект. Современный подход. 2-е издание. Киев: Вильямс, 2006. 1408 с.

13. *Осипов О. Ю., Мещеряков Р. В., Шепеленко М. Г.* Проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей робототехнических систем // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 160–164.

14. *Галин Р. Р., Кулагин К. А.* Использование виртуального полигона для отработки взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе // Тр. 2-й Междунар. науч. конф. «Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем». Нальчик, 2018. С. 185–189.

15. *Meshcheryakov Y., Meshcheryakov R.* Automated system of monitoring and positioning of functional units of mining technological machines

for coal-mining enterprises // MATEC Web of Conferences 13. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics. 2018. C. 3017.

16. Distributed Intelligent Agents. IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications / K. Sycara, A. Pannu, M. Williamson. 1996. Vol. 11. No 6. P. 36–46.

17. Trends in Distributed Artificial Intelligence // Artificial Intelligence Review / B. Chaib-Draa, M. Moulin, R. Mandiau et al. 1992. Vol. 6. P. 35–66.

18. *Cohen P., Levesque H.* Teamwork // Nous. Special Issue on Cognitive Science and Artifical Intelligence. 1991. No. 25 (4). P. 487–512.

19. *Консон Ю. А., Ронжин А. Л.* Оптимизация производства для современной работы робота и человека // Современные информационные технологии. Теория и практика. Череповец: ЧГУ, 2017. С. 23–29.

20. *Grosz B., Kraus S.* Collaborative Plans for Complex Group Actions // Artificial Intelligence. 1996. № 86. P. 269–358.

21. *Кулинич А. А.* Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 95–106.

22. *Городецкий В. И.* Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор. Ч. 2 // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 3. С. 34–47.

УДК 621.791.03-52

В. А. Иващенко*
кандидат технических наук, доцент
О. О. Мугин*
кандидат технических наук, доцент
Д. Ю. Петров*
кандидат технических наук, доцент
С. А. Черкасов*
аспирант
**Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.*

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ РЕЗКИ И УПАКОВКИ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Изложена методология синтеза оптимальных структур роботизированных технологических комплексов резки и упаковки листового стекла, в основе которой лежит процедура решения многокритериальной задачи методом использования генетического алгоритма. Также разработаны критерии и ограничения для задачи оптимизации.

Ключевые слова: *роботизированные технологические комплексы, теория, методы и математические модели управления сложными системами, генетический алгоритм.*

V. A. Ivashchenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
O. O. Mugin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
D. Y. Petrov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. A. Cherkasov*
PhD Student
**Gagarin State Technical University of Saratov*

OPTIMIZATION OF ROBOTIC SHEET GLASS CUTTING AND PACKAGING STRUCTURES

The article describes the methodology of synthesis of optimal structures of robotic technological complexes of sheet glass cutting and packing, which is based on the procedure of solving a multi-criteria problem. Criteria and limitations for the optimization task are developed. It is proposed to use a genetic algorithm to solve a multicriteria problem.

Keywords: *robotic technological complexes, theory, methods and mathematical models of control of complex systems, genetic algorithm.*

Одной из важнейших подсистем современных стекольных производств является линия резки и упаковки (ЛРУ). Особенностью работы данной линии является отсутствие возможности изменить конфигурацию участка без остановки производства. Поэтому повышение эффективности функционирования линии резки и упаковки предъявляет более высокие требования к методологии построения и оценки ее структуры.

Среди работ, посвященных оптимизации структур роботизированных комплексов, отметим [1–5], в которых даются оценки технического уровня промышленных роботов, представлены характеризующие ЛРУ параметры. В работе [3] выполнен подбор оптимальной структуры роботизированного комплекса методом выбора случайных параметров из общей базы, что показало свою эффективность по сравнению с полным перебором. Однако в случае использования объемной базы оборудования с большим количеством переменных данный метод показывает свою неэффективность. В работе [4] для решения задач многокритериальной оптимизации предлагается использовать генетические алгоритмы, которые позволят ускорить подбор оптимальной комбинации.

Основными исходными данными для построения и оценки структуры ЛРУ являются:

Таблица 1

Описание классов структур ЛРУ на языке признаков

S_k	Признаки классов		
	Толщина стекла, мм	Длина стекла, мм	Ширина стекла, мм
S_1	2,5–8	3210	6000
S_2	4	3600	2250
S_3	2,5–8	1605–3210	1800–3210

1) анализ решаемых ЛРУ задач (состав и характеристики);

2) определение необходимых параметров исследуемого оборудования, используемого для выполнения процедуры оптимизации ЛРУ;

3) определение множества возможных комбинаций различных структур ЛРУ $S = \{S_1, S_2, ..., S_i, ..., S_I\}$, формирование и определение их признаков;

4) изучение характеристик и анализ функционирования базовых модулей ЛРУ $M = \{M_1, M_2, ..., M_j, ..., M_J\}$, а также классификация этих модулей;

5) разработка критериев $K = \{K_1, K_2, ..., K_l, ..., K_L\}$, по которым будет выполнена оценка интересующей структуры и сделан выбор наиболее оптимальных;

При анализе и выполнении процедуры оптимизации работы линии резки и упаковки мы сталкиваемся с большими объемами информации. Это связано с колоссальным количеством структур, которые описываются многочисленными показателями, характеризующими их. Чтобы упростить задачу, необходимо сократить это количество, разбив множество на небольшие группы, куда попадут схожие между собой структуры. Таким образом, нам придется работать не с каждой отдельной структурой, а с типичным представителем группы, что позволит в разы снизить объем анализируемой информации.

В результате выполнения процедуры кластеризации исходных данных были выделены классы S_k, $k = 3$. Исходные структуры *ai* распределились между полученными классами следующим образом: в первый класс попало 6 структур, во второй – 1 структура, а в третий – 25. Описание классов структур представлено в табл. 1.

Из анализа следует, что базовая структура (класс) S_1 обеспечивает изготовление стекла размера Jumbo; S_2 – изготовление среднегабаритных стекол; S_3 – всех остальных.

Найденные базовые структуры S_k связаны оборудованием. Структура S_1 (рис. 1) реализует функции для изготовления крупногабаритных (*Jumbo*) листов. Структура S_2 (рис. 2) реализует функции для изготовления стекла толщиной 4 мм и размером 3600 мм * 2250 мм. Структура S_3 (рис. 3) реализует функции для изготовления всех остальных типоразмеров стекол.

Применяются следующие модули:

M1 – модуль управления;

M2 – сканер дефектов;

M3 – участок резки;

M4 – участок разлома;

M5 – станция утилизации брака;

M6 – рольганги;

M7 – манипуляторы низкой грузоподъемности;

M8 – манипуляторы средней грузоподъемности;

M9 – манипуляторы большой грузоподъемности;

M10 – легкие укладчики;

M11 – укладчики средней грузоподъемности;

M12 – тяжелые укладчики.

В последнее время отмечается необходимость использования многокритериальных методов для решения вопросов построения эффективных структур участков резки и упаковки (ЛРУ), но примеров использования этих методов не приводится. Так, для решения поставленной задачи рассматривается векторный критерий, включающий в себя стоимость, занимаемую оборудованием производственную площадь и степень гомогенности моделей оборудования. Предлагает-

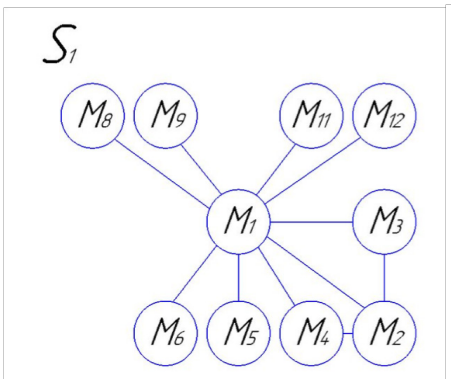


Рис. 1

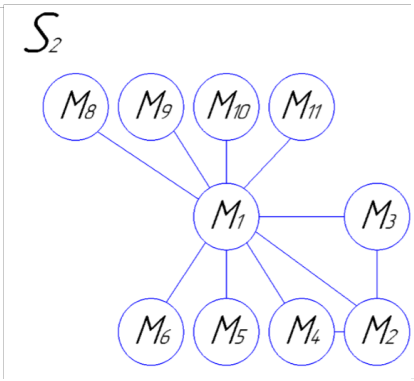


Рис. 2

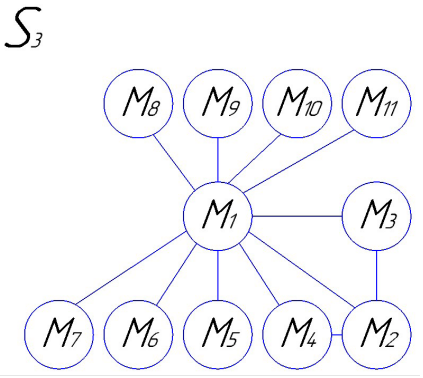


Рис. 3

ся найти область Парето для этих показателей, а затем решить задачу о покрытии.

В работе [1] для оценки технического уровня промышленных роботов применяются интегральные оценки, однако не предлагаются решения по синтезу оптимальных структур комплексов. Данные оценки определяются на основе качественных и количественных показателей промышленных роботов. В то же время характеристики роботов возможно использовать как качественные показатели ЛРУ, так как в основе данной линии лежат промышленные роботы и их характеристики напрямую влияют на эффективность работы всего участка.

В работе [2] представлены основные характеризующие ЛРУ параметры, такие как стоимость оборудования (руб.), стоимость монтажа (руб.), эксплуатационные расходы (руб./год), расход сжатого воздуха ($м^3$/ч), точность позиционирования (мм), время переналадки (ч), вероятность отказа, масса (кг), грузоподъемность (кг), рабочая зона (мм), занимаемая площадь ($мм^2$). При выборе параметров для упрощения процедуры оптимизации используются только те параметры, которые возможно применить ко всем элементам ЛРУ.

Для постановки задачи оптимизации необходимо выбрать такую структуру ЛРУ, которая соответствует предполагаемой номенкулатуре выпускаемой продукции. После этого можно приступать к минимизации совокупности технико-экономических критериев:

– по стоимости оборудования (1) и стоимости его монтажа (2)

$$\mathrm{k}_1 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{u=1}^{Uj} v_{ju}x_{ju} \to \min ; \qquad (1)$$

$$k_2 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{j=1}^{Uj} v_{ju}^{m}x_{ju} \to \min ; \qquad (2)$$

– по эксплуатационным расходам (3) и расходу сжатого воздуха

$$k_3 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{j=1}^{Uj} P_{ju}x_{\ ju} \to \min ; \qquad (3)$$

$$k_4 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{j=1}^{Uj} W_{ju}^{b}x_{ju} \to \min ; \qquad (4)$$

– по точности манипуляторов, сканера дефектов и резака

$$k_5 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{j=1}^{Uj} \Delta_{ju}x_{ju} \to \min ; \qquad (5)$$

– по времени, требуемого для смены режима (переналадки) ЛРУ

$$k_6 = \max_{r=1,R}\left\{\sum_{j\in M_r}^{j}\sum_{u=1}^{Uj} t_{ju}x_{ju}\right\}\times N_{ПО} \to \min ; \qquad (6)$$

– по уменьшению отказов ЛРУ

$$k_7 = 1 - \prod_{j\in M_r}^{J}\sum_{u=1}^{Uj} p_{ju}x_{ju} \to \min . \qquad (7)$$

В работе [5] в качестве критерия эффективности используют минимизацию времени выпуска необходимого объема продукции

$$T = \max_{j\in J}\left[T_{jB} + T_{jПЕР} + T_{jПП}\right] \to \min , \qquad (8)$$

где

$$\Omega_p = \left\{\begin{array}{c} P : G = (L_{j1}; L_{j2}; \ldots; L_{jn_j}), \\ t_{ij}^{k} = t_{ij}^{0} + t_{ij}, t_{j1j1}^{0} \le t_{j2j2}^{0}, \overline{i = 1, m_j, j = 1, n} \end{array}\right\};$$

J – множество единиц оборудования; T_{jB} – суммарное время выполнения операций j-й единицы оборудования; $T_{jПЕР}$ и $T_{jПР}$ – суммарное время переналадок и простоя j-й единицы оборудования; $L_{ij}=(q_{ij},t_{ij})$ – операция с номером i (i=1, ..., m_j), которая выполняется над j-й деталью (j=1, ..., n); m_j – число операций, которое необходимо выполнить над j-й деталью; q_{ij} – номер группы оборудования, настроенного на выполнения операции L_{ij}; t_{ij} – номинальная продолжительность выполнения операций L_{ij}.

Иногда используют частные случаи указанного критерия, например – минимизация максимального времени простоя:

$$T = \max_{j\in J}\left[T_{jПР}\right] \to \min_{P\in\Omega_p}, \qquad (9)$$

где:

$$\Omega_p = \left\{\begin{array}{c} P : G = (L_{j1}; L_{j2}; \ldots; L_{jn_j}), \\ t_{ij}^{k} = t_{ij}^{0} + t_{ij}, t_{j1j1}^{0} \le t_{j2j2}^{0}, \overline{i = 1, m_j, j = 1, n} \end{array}\right\};$$

максимизация загрузки оборудования:

$$k = \max_{j\in J}\left[\frac{T_{jB}}{T_{jB} + T_{jПЕР} + T_{jПП}}\right] \to \max_{P\in\Omega_p},$$

где:

$$\Omega_p = \left\{\begin{array}{c} P : G = (L_{j1}; L_{j2}; \ldots; L_{jn_j}), \\ t_{ij}^{k} = t_{ij}^{0} + t_{ij}, t_{j1j1}^{0} \le t_{j2j2}^{0}, \overline{i = 1, m_j, j = 1, n} \end{array}\right\}.$$

При решении задачи необходимо наложить конструкционные и технологические ограничения:

– по массе ЛРУ

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{u=1}^{Uj} G_{ju}x_{ju} \le G ; \qquad (11)$$

– по грузоподъемности модулей, входящих в состав ЛРУ

$$G_{cr} \le m_{\ ju}x_{ju;} ; \qquad (12)$$

– по рабочей зоне манипуляторов, входящих в состав ЛРУ

$$r^x_{7u}x_{7u} \vee r^x_{8u}x_{8u} \vee r^x_{9u}x_{9u} \geq L_{cm}$$
$$r^y_{7u}x_{7u} \vee r^y_{8u}x_{8u} \vee r^y_{9u}x_{9u} \geq B_{cm} \; ; \qquad (13)$$
$$r^z_{7u}x_{7u} \vee r^z_{8u}x_{8u} \vee r^z_{9u}x_{9u} \geq H_{cm}$$

– по занимаемой оборудованием площади

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{u=1}^{Uj} S_{ju}x_{ju} \leq S\,. \qquad (14)$$

При формулировке задачи приняты следующие обозначения: x_{ju} – количество модулей j-го типа u-го вида; c_{ju}, $c^m{}_{ju}$, m_{ju} – соответственно стоимость ЛРП, его монтажа и грузоподъемность (кг) для модуля j-го типа uго вида; $W^e{}_{ju}$ – удельный расход сжатого воздуха (м^3/ч) для модуля j-го типа u-го вида; G_{cm}, L_{cm}, B_{cm}, H_{cm} – соответственно вес (кг) и габаритные размеры (длина, ширина и толщина) (мм) стекла; $r^x{}_{ju}$, $r^y{}_{ju}$, $r^z{}_{ju}$ – максимальные перемещения (м)

Таблица 2

Средние манипуляторы

№ п/п	Наименование	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость монтажа, руб.	Эксплуатационные расходы, руб./год	Расход сжатого воздуха, м^3/ч	Время переналадки, ч	Точность позиционирования, мм	Вероятность	Масса, кг	Грузоподъемность, кг	Рабочая зона, мм	Занимаемая площадь, l мм^2
1	Промышленный робот KUKA KR 100-2 P	800000	96000	40000	100	1,3	0,2	0,001	1500	100	3500	3500
2	Промышленный робот KUKA KR 100-2 PA	810000	97200	40500	100	1,3	0,25	0,001	1200	100	1200	1200
3	Промышленный робот KUKA KR 100-3 COMP	820000	93400	41000	100	1,3	0,15	0,001	1155	100	2400	2400
4	Промышленный робот KUKA KR 100 HA	830000	99600	41500	100	1,3	0,1	0,001	1210	100	3000	0,1
5	Промышленный робот KUKA KR 120-2 P	840000	100300	42000	120	1,3	0,2	0,001	1500	120	3500	3500
6	Промышленный робот KUKA KR 140-3 COMP	845000	101400	42250	140	1,3	0,06	0,001	1170	140	2300	2800
7	Промышленный робот KUKA KR 150-2	860000	103200	43000	150	1,3	0,06	0,001	1263	150	3100	3100
8	Промышленный робот KUKA KR 150-2 K	860000	103200	43000	150	1,3	0,06	0,001	1465	150	3500	3500
9	Промышленный робот KUKA KR 180-2	880000	105600	44000	130	1,3	0,12	0,001	1285	180	3100	3100
10	Промышленный робот KUKA KR 180-2 K	885000	106200	44250	130	1,3	0,06	0,001	1475	180	3700	3700
11	Промышленный робот KUKA KR 180-2 PA	890000	106300	44500	130	1,3	0,06	0,001	1240	180	3200	3200
12	Промышленный робот KUKA KR 180-2 PA ARCTIC	900000	103000	45000	130	1,3	0,25	0,001	1240	180	3200	3200
13	Промышленный робот KUKA KR 200-3	930000	111600	46500	200	1,3	0,1	0,001	1170	200	2300	2800
14	Промышленный робот KUKA KR 210-2 K	960000	115200	43000	210	1,3	0,12	0,001	1285	210	3100	3100
15	Промышленный робот KUKA KR 220-3	930000	117600	49000	220	1,3	0,15	0,001	1155	220	2400	2400
16	Промышленный робот KUKA KR 240-2	930000	117600	49000	240	1,3	0,12	0,001	1285	240	3100	3100
17	Промышленный робот KUKA KR 240 270-2 PA	990000	113300	49500	270	1,3	0,12	0,001	1285	270	3100	3100
18	Промышленный робот KUKA KR 125	950000	114000	47500	125	1,3	0,15	0,001	1100	125	2450	2450
19	Промышленный робот KUKA KR 360 L-150-2 P	1050000	126000	52500	360	2	0,15	0,001	2050	360	3500	3500
20	Промышленный робот KUKA KR 300-2 PA	1050000	126000	52500	300	2	0,15	0,001	2330	300	3150	3150
21	Промышленный робот KUKA KR 360-2	1060000	127200	53000	360	2	0,15	0,001	2385	360	3326	3326
22	Промышленный робот KUKA KR 360 450-2 PA	1070000	123400	53500	450	2	0,15	0,001	2385	450	3326	3326

по координатным осям x, y и z для модуля j-го типа u-го вида; Δ_{ju} _ точность (мм) для модулей j-го типа u-го вида; G_{ju} , t_{ju}, p_{ju} – соответственно, масса (кг), время переналадки (с) и надежность модуля j-го типа u-го вида; G – масса (кг) ЛРУ; S – занимаемая ЛРУ площадь, S_{ju} – площадь, занимаемая модулем j-го типа u-го вида, $M_r \subset M$, r=1,R – подмножества последовательно переналаживаемых модулей j-го типа u-го вида; $M' \subset M$ – подмножество элементов ЛРП, определяющих надежность его функционирования.

Часто в реальных производственных условиях целесообразно решать задачу одновременным учетом нескольких критериев, то есть как многокритериальную.

В связи с тем, что каждый тип применяемого оборудования в нашем случае характеризуется 7 критериями, применение алгоритма полного перебора всех возможных комбинаций потребует колоссальных вычислительных мощностей для решения задачи в разумные сроки. Самыми многообещающими методами оптимизации на данный момент являются методы с использованием муравьиного и генетического алгоритмов, а также методы с использованием нейронных сетей. В работе [4] наглядно показано преимущество применения генетического алгоритма для решения задачи многокритериальной оптимизации. В нашем случае для решения поставленной задачи принято решение о применении генетического алгоритма со случайным выбором стартового значения.

Перед выполнением оптимизации необходимо заполнить базу применяемого оборудования

Таблица 3

Результат оптимизации

№ п/п	Наименование	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость монтажа, руб.	Эксплуатационные расходы, руб./год	Расход сжатого воздуха, j м^3/ч	Время переналадки, ч	Точность позиционирования, мм	Вероятность отказа	Масса, кг	Грузоподъемность, кг	Рабочая зона, мм	Занимаемая площадь, мм^2
1	Резак Macotec	2600000	312000	62400	0	0,5	0,2	0,02	380	0	3600	3230000
2	Сканер дефектов Glaston	1500000	180000	36000	19	0,3	0,08	0,01	300	0	3210	3230000
3	Модуль разлома Bystronic	1200000	144000	28800	0	0,5	0,1	0,01	300	0	1800	3230000
4	Станция утилизации брака North Glass	1500000	180000	36000	0	0,2	0,5	0,5	400	0	1800	24000000
5	Легкий рольганг 1	30010	3600	1500	0	0,2	0	0,05	200	100	8000000	8000000
6	Легкий рольганг 1	30000	3600	1500	0	0,2	0	0,05	200	100	8000000	8000000
7	Легкий рольганг 1	30000	3600	1500	0	0,2	0	0,05	200	100	8000000	8000000
8	Легкий рольганг 1	30000	3600	1500	0	0,2	0	0,05	200	100	8000000	8000000
9	Средний рольганг 7	32000	3840	1600	0	0,2	0	0,05	600	130	12000000	12000000
18	Средний рольганг 7	34000	4080	1700	0	0,2	0	0,05	600	160	12000000	12000000
11	Средний рольганг 8	34000	4080	1700	0	0,2	0	0,05	600	160	12000000	12000000
12	Средний рольганг 8	36000	4320	1800	0	0,2	0	0,05	600	190	12000000	12000000
13	Средний рольганг 8	36000	4320	1800	0	0,2	0	0,05	600	190	12000000	12000000
14	Легкий укладчик 3	38000	4560	1900	10	0,2	0	0,05	200	150	8000000	8000000
15	Средний укладчик 18	40000	4800	2000	35	0,2	0	0,05	1000	180	12000000	12000000
16	Промышленный робот KUKA KR 60-4 KS	730000	87600	365 00	60	1	0,06	0,001	600	60	2233	2233
17	Промышленный робот KUKA KR 60-4 KS	730000	87600	365 00	60	1	0,06	0,001	600	60	2233	2233
18	Промышленный робот KUKA KR 120-2 P	840000	100800	42000	120	1,3	0,2	0,001	1500	120	3500	3500
19	Промышленный робот KUKA KR 200-3	930000	111600	465 00	200	1,3	0,1	0,001	1170	200	2800	2800

в соответствии с классами. Пример заполненной базы манипуляторов средней грузоподъемности приведен в табл. 2.

После формирования базы оборудования необходимо ввести ограничения (по массе, площади, грузоподъемности и рабочей зоне модулей) и выполнить расчет. Во время расчета алгоритм будет стремиться к выполнению обозначенных выше критериев. Результат работы генетического алгоритма оптимизации для линии, производящей стекла средних и малых размеров, представлен в табл. 3.

Применение генетического алгоритма для задачи многокритериальной оптимизации подбора оборудования для линии резки и упаковки листового стекла помогло добиться быстрого решения задачи с получением результата, удовлетворяющего критериям эффективности и введенным ограничениям.

Библиографический список

1. Технология. Сер. Гибкие производственные системы и робототехника. ВИМИ. 1990. Вып. 2. С. 104.

2. ГОСТ 25378-82. Роботы промышленные. Основные понятия, термины и определения. М.: ГК СССР по стандартам, 1982.

3. *Иващенко В. А., Петров Д. Ю., Резчиков А. Ф.* Оптимизация структур роботизированных комплексов дуговой сварки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. № 6. С.60–65.

4. *Авдеев А. А.* Применение генетических алгоритмов к задачам оптимизации // Доклады ТУСУРа. 2008. №2 (18). С. 110–111.

5. *Сочнев А. Н.* Оптимизация функционирования представленных сетями Петри систем с помощью искусственных нейронных сетей // Управление большими системами. М., 2011. № 33. С. 198–217.

УДК 531.1

В. Е. Павловский*
доктор физико-математических наук, профессор
М. В. Андреева**
магистрант
Н. В. Петровская****
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
**Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН*
***Московский автомобильно-дорожный институт (технический университет) МАДИ*
****МГУ им. М. В. Ломоносова, механико-математический факультет, кафедра теоретической механики и мехатроники*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЗВЕННОГО КОЛЕСНОГО АППАРАТА, ИМИТИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЕ РОБОЗМЕЙ

Рассмотрен новый класс робототехнических устройств – роботы-змеи. Приведены примеры, обсуждаются механический и программный способы существования данного типа роботов, способы управления ими. Рассматриваются применения их в современном мире, предположения о дальнейшем развитии данного направления.

Ключевые слова: *робот-змея, моделирование, макетирование.*

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-01-00131, 16-08-00880.

V. E. Pavlovsky*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
M. V. Andreeva**
Postgraduate Student
N. V. Petrovskaya****
PhD Sc. Phys.-Math., Research Employee
**Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*
***Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*
****Lomonossov MSU, Moscow, 1 Leninskiye Gory, Faculty of Mechanics and Mathematics, Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics*

MODELING OF A MULTI-LINKED WHEELED APPARATUS IMITATING MOVEMENT OF SNAKE-ROBOTS

A new class of robotic devices-snakelike robots is considered. Examples are given, the mechanical and software way of existence of this type of robots; ways to control them are discussed. Considerations of their use in the modern world, assumptions about the further development of these test apparatus are given. Examples of author model are given as well. The model was named as robotrain. This work was supported by RFBR grants 16-01-00131, 16-08-00880.

Keywords: *snake-robot, modeling, prototypin.*

Введение

Одним из путей, позволяющих создать высокоэффективные робототехнические устройства, является копирование природных биообъектов. Такой подход может решить проблемы разработки и создания мобильных роботов различного назначения, требующих новых подходов к механизмам, способным перемещаться в ограниченном пространстве со сложным рельефом, в различных экстремальных условиях (ограничения на давление, температуру, влажность и др.). В этой связи большой интерес в настоящее время представляет создание роботов, имитирующих движение змей [1]. В докладе предлагается подход к моделированию и макетированию подобного устройства с помощью многозвенного колесного аппарата.

Примеры исследований в мире

Исследования робозмей в ведущих лабораториях мира идут достаточно широко. Приведем лишь некоторые примеры. При этом будем рассматривать роботы, реализующие змееподобные движения на колесном ходу.

Роботы лаборатории Ш. Хиросе Токийского технологического института

Шигео Хирозе (*Shigeo Hirose*), исследователь из Токийского технологического института, широко известен в области робототехники своими биовдохновленными роботами, в частности роботами-змеями. Еще в 2005 году на робототехнической выставке EXPO2005 он представил всеобщему вниманию робота-змею ACM-R5. Корпус этого робота состоит из множества гибких сегментов, позволяющих ему изгибаться, подобно телу змеи, а небольшие колесики, установленные на каждом из сегментов, позволяют роботу передвигаться, подобно его биологическому прототипу. С момента первой презентации робота ACM-R5 над его конструкцией была проделана немалая работа, модули робота получили дополнительную изоляцию от влаги и пыли, а также элементы, увеличивающие жесткость и прочность конструкции. Благодаря этому новый робот ACM-R5H стал способен не только находиться и перемещаться в неблагоприятной окружающей среде, но и плавать под водой, подобно водяной змее.

Обновленный вариант робота ACM-R5H также получил некоторые усовершенствования программного обеспечения своей системы управления, которая отвечает за движения робота в водной среде. Именно благодаря этому движения робота ACM-R5H в воде выглядят плавными и неимоверно грациозными. Как и у робота предыдущего поколения, у робота ACM-R5H имеется камера и осветительные приборы, установленные в головном и хвостовом модулях робота. Хотя достаточно тяжело сказать, где у этого робота голова, а где хвост, ведь за счет универсальности системы управления робот одинаково хорошо движется в любом направлении, вперед или назад. С практической точки зрения конструкция робота HiBot ACM-R5H делает его идеальным устройством для проведения операций по осмотру подводных частей морских судов, исследований и проведения поисков на морском дне.

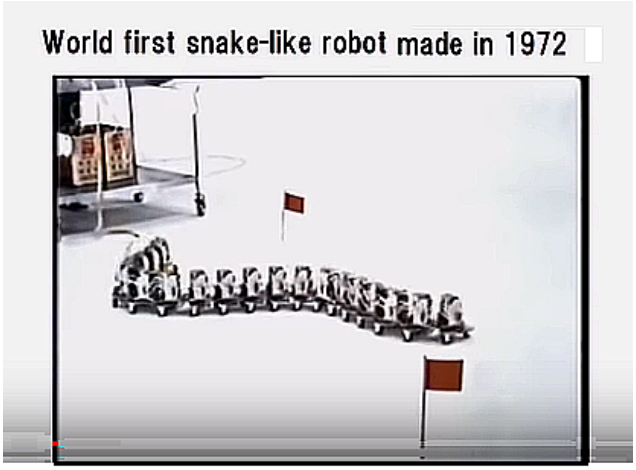


Рис. 1. Первый в мире змееподобный робот, лаборатория проф. Ш. Хиросе, Япония



Рис. 2. «Koryu-II» змееподобный робот для трехмерной поверхности, лаборатория проф. Ш. Хиросе, Япония

Робот-змея будет изучать Марс. Wheeko

В исследовательском центре SINTEF (https://www.sintef.no/en/) работают над созданием новых роботов-змей для Европейского космического агентства. Эти устройства обеспечат больший уровень мобильности и маневренности во время путешествия по Марсу по сравнению с традиционными роверами. К настоящему времени NASA отправила на Марс четыре марсохода. Эти колесные аппараты ограничены в маневренности, счи-





Рис. 3. Робот wheeko, norway

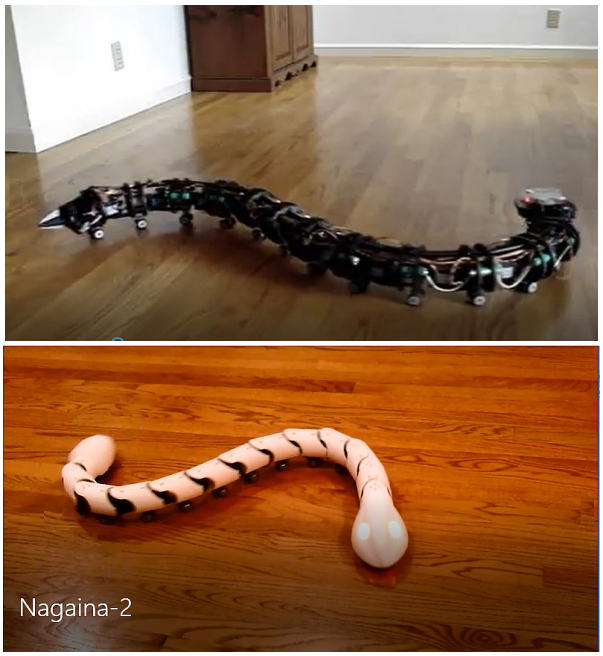


Рис. 4. Nagaina-1 (слева), Nagaina-2 (справа)

тают в SINTEF. Например, один из роверов Spirit застрял в песчаных дюнах на Марсе. Предполагается, что роботы-змеи будут работать вместе с роверами. В настоящий момент рассматриваются несколько вариантов их совместной работы. Одно из предложений – соединить робота-змею с одной из рук марсохода. В этом случае робозмея сможет при необходимости отсоединяться, работая автономно, и вновь подсоединяться к роверу. Кроме того, робот-змея может быть присоединена к марсоходу с помощью кабеля, по которому она будет получать энергию и передавать информацию.

Nagaina-1, Nagaina-2

В США разработаны колесные роботы-змеи Nagaina-1, Nagaina-2, они показаны на рис. 4. Назначение этих роботов – исследование реализации змееподобных движений колесными многозвенными аппаратами. Результаты, представленные автором разработки, можно признать успешными.

Snakerobot tehnion. Израиль

В Израиле в tehnion разработан робот-змея, названный SnakeRobot. Он показан на рис. 5.

Назначение этого аппарата – исследование сложных змееподобных движений и возможности использования робота-змеи как робота-разведчика. Для этой цели робот оснащен эффективным сенсором для осмотра среды, который расположен в голове робота.

Метод управления роботом-змеей на примере робопоезда

Одним из примеров робото-змеи, движение которого обеспечивается колесными парами, является система, названная робопоездом [14].

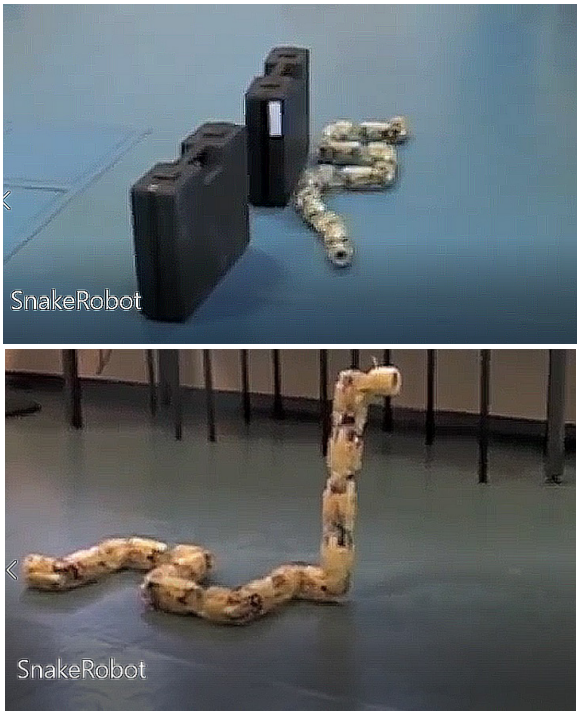


Рис. 5. SnakeRobot Tehnion. Израиль

Она является моделью рассмотренных выше роботов с колесными парами. Опишем динамику, свойства движения и управление такой системой как пример управления роботом-змеей. Модель робопоезда показана ниже на рис. 6, а ее теоретико-механическая модель – на рис. 7.

Уравнения движения

Можно показать, что система робопоезд из n тележек всегда имеет две механические степени свободы и является неголономной, добавление каждой n+1 тележки добавляет в систему 5 обобщенных координат и 5 уравнений связи, два из которых являются неголономными, что сохраняет общее число степеней свободы системы, равное двум.

Параметры модели

Рассматривается система, состоящая из объектов, которые мы будем называть «тележка-

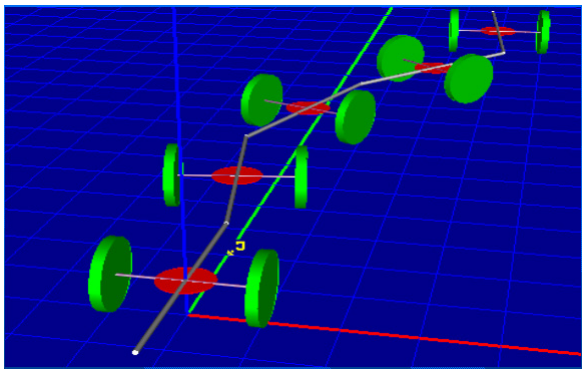


Рис. 6. Робопоезд

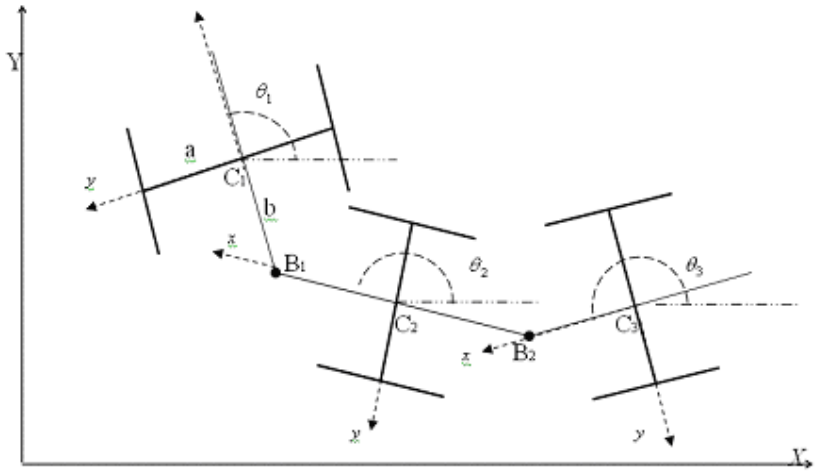


Рис. 7. Проекция системы «робопоезд» на горизонтальную плоскость

ми». Каждая тележка представляет собой невесомую ось L длины $2b$ и перпендикулярную ей невесомую ось длины $2a$, на которую насажены два одинаковых колеса. Каждое колесо является плоским однородным диском массы m, радиуса r, перпендикулярным оси тележки. Кузов тележки имеет массу m_i и может перемещаться только параллельно плоскости движения. Вообще говоря, массы кузова у разных тележек могут быть различными. Будем считать, что центр масс тележки совпадает с центром оси колес. Тележки соединены друг с другом при помощи шарнира. Активной назовем тележку, вращением колес которой можно управлять при помощи электродвигателей, пассивной – тележку без управления. Обе движутся по абсолютно шероховатой горизонтальной плоскости в однородном поле силы тяжести.

Пусть $OXYZ$ – неподвижная система координат, плоскость OXY совпадает с горизонтальной плоскостью; C_1 ... C_n – соответственно центры осей тележек; C_1xyz ... C_nxyz – системы координат, жестко связанные с тележками (осями тележек), θ_1, θ_2, ... , θ_n – углы поворота осей L соответствующих тележек вокруг вертикали. В дальнейшем кроме углов $\theta_2, \dots, \theta_n$ будем рассматривать углы поворота оси L i-й тележки ($i = 1,2,\dots,n$) относительно оси L предыдущей тележки $\psi_2,\dots,\psi_n$, где $\psi_2 = \theta_2 - \theta_1,\dots,\psi_n = \theta_n - \theta_{n-1}$, $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$ – координаты точек $C_1,\dots,C_n$ соответственно; ϕ_{11}, ϕ_{12}, ... , ϕ_{n1}, ϕ_{n2} – углы поворота колес соответствующих тележек относительно их осей, отсчитываемые от проекции положительного направления оси Cz на плоскость колеса против часовой стрелки (если смотреть в сторону вектора $\vec{e}_y$).

Уравнения движения

Рассмотрим далее систему из двух тележек. Уравнения связей можно записать в следующем виде:

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= r\frac{\dot{\phi}_{12}+\dot{\phi}_{11}}{2}\cos\theta \\
\dot{y}_1 &= r\frac{\dot{\phi}_{12}+\dot{\phi}_{11}}{2}\sin\theta_1 \\
\dot{\theta}_1 &= r\frac{\dot{\phi}_{12}-\dot{\phi}_{11}}{2} \\
\dot{x}_2 &= r\frac{\dot{\phi}_{21}+\dot{\phi}_{22}}{2}\cos(\theta_1+\psi_2), \\
\dot{y}_2 &= r\frac{\dot{\phi}_{21}+\dot{\phi}_{22}}{2}\sin(\theta_1+\psi_2), \\
\dot{\theta}_1+\dot{\psi}_2 &= r\frac{\dot{\phi}_{22}-\dot{\phi}_{21}}{2a}, \\
\dot{x}_1+b\dot{\theta}_1\sin\theta_1 &= \dot{x}_2-b(\dot{\theta}_1+\dot{\psi}_2)\sin(\theta_1+\psi_2), \\
\dot{y}_1-b\dot{\theta}_1\cos\theta_1 &= \dot{y}_2+b(\dot{\theta}_1+\dot{\psi}_2)\cos(\theta_1+\psi_2),
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где первые шесть уравнений – условия «непроскальзывания» колес, а последние два – условие сцепки.

Динамические уравнения движения системы робопоезда могут быть записаны в виде уравнений Воронца [14]:

$$
\begin{cases}
\dfrac{d}{dt}\dfrac{\partial T^*}{\partial \dot{\phi}_{21}} - \dfrac{\partial T^*}{\partial \phi_{21}} = \\
= Q_9 + \sum\limits_{k=1}^{s}\alpha_{k,1}\left(Q_k + \dfrac{\partial T^*}{\partial q_k}\right) + \sum\limits_{k-1}^{s}\Theta_k\left(\sum\limits_{j=1}^{n}A_{12}^{(k)}\dot{\phi}_{11}\right) \\
\dfrac{d}{dt}\dfrac{\partial T^*}{\partial \dot{\phi}_{11}} - \dfrac{\partial T^*}{\partial \phi_{11}} = \\
= Q_{10} + \sum\limits_{k=1}^{s}\alpha_{k,2}\left(Q_k + \dfrac{\partial T^*}{\partial q_k}\right) + \sum\limits_{k-1}^{s}\Theta_k\left(\sum\limits_{j=1}^{n}A_{21}^{(k)}\dot{\phi}_{12}\right)
\end{cases}. \qquad (2)
$$

С помощью выписанных уравнений (1) и (2) можно описать различные движения системы тележек и поставить задачу планирования ее движения по плоскости.

Планирование, управление

Для планирования и управления робопоездом (реализации спланированного движения) предлагается метод построения трасс его движения из отрезков базовых кривых. Используются отрезки прямых, отрезки дуг окружностей и отрезки специфических кривых – одинарных и сдвоенных спиралей Корню, которые отвечают условию линейного изменения скоростей вращения колес робопоезда и описываются неэлементарными функциями, называемыми интегралами Френеля. Построенные из указанных базовых линий трассы робопоезда позволяют перевести аппарат из любой начальной в любую конечную точку фазового пространства робопоезда.

Основной метод планирования движения назван методом коридоров (рис. 8), при котором трасса строится внутри трубки допустимого движения, названной коридором.

Покажем этапы планирования движения робопоезда на примере, показанном на рис. 9, а также основные вычисления этого метода. Пусть базовая трасса с обходом препятствия задается четырьмя отрезками прямых, уравнения которых имеют вид:

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y + c_1 &= 0 \\ a_2x + b_2y + c_2 &= 0 \\ a_3x + b_3y + c_3 &= 0 \\ a_4x + b_4y + c_4 &= 0. \end{aligned} \qquad (3)$$

При этом начало и конец отрезков определяются точками пересечения прямых (3) строго в указанном порядке. Начало и конец трассы заданы точками O(x_0, y_0) и O$_k$(x_k, y_k), расположенными на первой и последней прямой. Сами отрезки на рисунке обозначены римскими цифрами I, II, III, IV.

Кроме прямолинейных отрезков на рис. 10 показаны пунктирные дугообразные линии – дуги двойных спиралей Корню. Они предназначены для плавного гладкого сопряжения прямолинейных отрезков I и II, II и III, III и IV и соответствующего перехода робопоезда по ним.

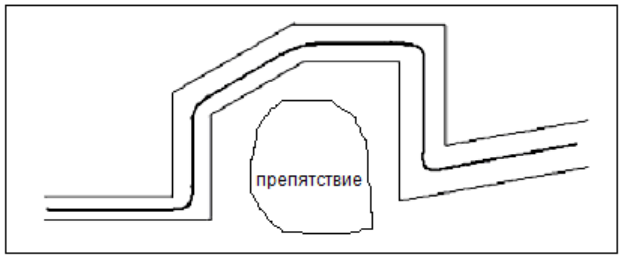


Рис. 8. Коридор для планирования движения робопоезда

Предположим, что в начальной точке трассы угловые скорости вращения колес равны, угол ориентации ведущей тележки совпадает с углом наклона прямой, задающей первый отрезок. Условия движения по прямой при таких начальных условиях очевидны. Переход с одной прямой на другую будет осуществляться при помощи движения по двум спиралям Корню, как показано на рис. 9.

Движение по коридору, заданному двумя соседними отрезками, разбивается на три участка:

– движение по прямой, задающей первый отрезок, от начальной точки до точки A_1 (выбирается на первой прямой);

– движение по двум дугам спиралей от точки A_1 до точки A_2 (принадлежит прямой, задающей второй отрезок движения, точные координаты определяются несложным вычислением);

– движение по прямой, задающей второй отрезок, до точки начала перехода на третий отрезок.

При движении по прямой, задающей первый отрезок, от начальной точки до точки A_1 угол ориентации движущейся тележки не меняется и совпадает с углом наклона прямой, задающей первый отрезок. Угловая скорость вращения колес может равномерно меняться до необходимой (при этом в точке A_1 угловые скорости обоих колес ведущей тележки будут одинаковыми).

Определим параметры для осуществления такого движения. Пусть угловые скорости вращения колес ведущей тележки меняются по следующему закону:

$$\dot{\phi}_{11} = kt + \dot{\phi}^0, \quad \dot{\phi}_{21} = kt + \dot{\phi}^0.$$

Тогда координаты центра ведущей тележки будут меняться по закону:

$$x = \left(\frac{k}{2}t^2 + \dot{\phi}^0 t\right)\cos\theta_1 + x_0$$

$$y = \left(\frac{k}{2}t^2 + \dot{\phi}^0 t\right)\sin\theta_1 + y_0.$$

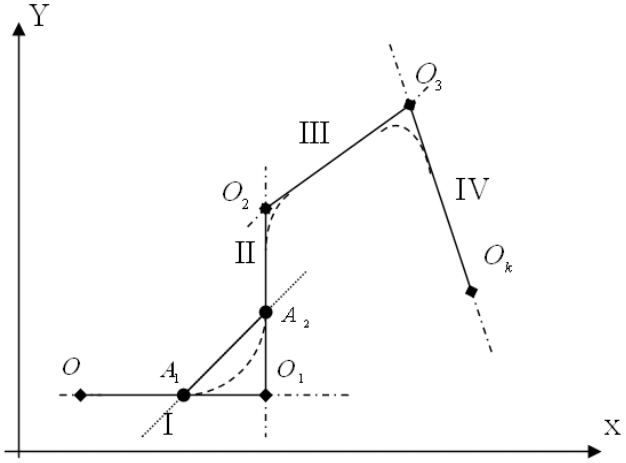


Рис. 9. Этапы планирования движения

Из этих уравнений можно определить интервал времени, за который центр ведущей тележки переместится из начальной точки с координатами (x_0, y_0) в точку A_1.

Для того чтобы система могла перейти на второй отрезок из точки A_1, которая принадлежит первому отрезку, двигаясь по двум спиралям с заданной ориентацией, необходимо подобрать параметры движения по этим спиралям.

Для этого рассмотрим следующую последовательность действий.

Шаг 1. Найдем углы ориентации ведущей тележки в начальный и конечный момент для движения по заданным отрезкам. В точке A_1 угол ориентации совпадает с углом наклона прямой, задающей первый отрезок. В конечной точке угол ориентации должен совпадать с углом наклона прямой, задающей второй отрезок.

Таким образом находятся начальный и конечный углы ориентации аппарата.

Шаг 2. Вычисляем точку пересечения прямых, задающих первый и второй отрезки движения. Это точка O_1.

Шаг 3. Находим координаты точки A_1. Принадлежность этой точки первой прямой выражается условием: $a_1 x_{A_1} + b_1 y_{A_1} + c_1 = 0$.

Допустим, система должна начать поворот на расстоянии ρ от точки пересечения первой и второй прямой, то есть $R(A_1, O_1) = \rho$.

Используя первое и второе условие, получим следующие координаты точки A_1:

$$\begin{cases} x_{A_1} = -\text{sign}(\cos\theta_1)\dfrac{\rho b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} + \dfrac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \\ y_{A_{11}} = \text{sign}(\cos\theta_1)\dfrac{\rho a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} + \dfrac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \end{cases}.$$

Так получаем начальные координаты для движения по участку двух спиралей.

Шаг 4. Можно показать, что геометрическим местом финальных точек, конечный угол ориентации в которых совпадает с заданным, является прямая вида:

$$y = tg\frac{\theta_k + \theta_0}{2}(x + x_0) + y_0 + 2a\left(\cos\theta_0 - \cos\theta_k\right) + \sqrt{\pi}\phi^0 T \times$$

$$\times\left(\frac{\sin(\theta_k - \theta_0)}{(\sin\theta_k - \sin\theta_0)\sqrt{(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel S\left(\frac{\sqrt{(\theta_k - \theta_0)}}{\sqrt{\pi}}\right) + \right.$$

$$+\frac{\cos(\theta_k - \theta_0) - 1}{(\sin\theta_k - \sin\theta_0)\sqrt{(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel C\left(\frac{\sqrt{(\theta_k - \theta_0)}}{\sqrt{\pi}}\right) +$$

$$+\frac{\cos(\theta_k - \theta_0) - 1}{(\sin\theta_k - \sin\theta_0)\sqrt{-(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel C\left(\frac{\sqrt{-(\theta_k - \theta_0)}}{\sqrt{\pi}}\right) -$$

$$\left. -\frac{\sin(\theta_k - \theta_0)}{(\sin\theta_k - \sin\theta_0)\sqrt{-(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel S\left(\frac{\sqrt{-(\theta_k - \theta_0)}}{\sqrt{\pi}}\right)\right),$$

где $x_0 = x_{A_1}, y_0 = y_{A_1}$, $\theta_k = \theta_2, \theta_0 = \theta_1$.

Запишем уравнение этой прямой в следующем виде: $ax + y + c = 0$.

Найдем точку пересечения этой прямой и прямой, задающей второй отрезок. Это будет точка A_2 с координатами (x_{A_2}, y_{A_2}).

$$\begin{cases} x_{A_2} = \dfrac{c\ b_2 - c_2}{a_2 - a\ b_2} \\ y_{A_2} = \dfrac{a c_2 - a_2 c}{a_2 - a b_2} \end{cases},$$

где

$$a = \text{tg}\frac{\theta_k + \theta_0}{2}$$

$$y = \text{tg}\frac{\theta_2 + \theta_2}{2} x_A + y_A + 2a\left(\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right) + \sqrt{\pi}\phi^0 T \times$$

$$\times\left(\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\sqrt{(\theta_2 - \theta_1)}} Fresnel S\left(\frac{\sqrt{(\theta_2 - \theta_1)}}{\sqrt{\pi}}\right) + \right.$$

$$+\frac{\cos(\theta_2 - \theta_1) - 1}{(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\sqrt{(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel C\left(\frac{\sqrt{(\theta_2 - \theta_1)}}{\sqrt{\pi}}\right) +$$

$$+\frac{\cos(\theta_2 - \theta_1) - 1}{(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\sqrt{-(\theta_k - \theta_0)}} Fresnel C\left(\frac{\sqrt{-(\theta_2 - \theta_1)}}{\sqrt{\pi}}\right) -$$

$$\left. -\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\sqrt{-(\theta_2 - \theta_1)}} Fresnel S\left(\frac{\sqrt{-(\theta_2 - \theta_1)}}{\sqrt{\pi}}\right)\right).$$

Здесь функции FresnelS() и FresnelC() – интегралы Френеля.

Шаг 5. Вычисляются параметры спиральных кривых для определения скоростей движения по ним. Формулы технически несложны, но громоздки, поэтому здесь не приводятся, они приведены в [14–16].

Затем можно определить значения основных характеристик для движения по двум спиралям для того, чтобы из одной точки система могла перейти в другую с заданной ориентацией.

Движение по второму отрезку из точки A_2 до нужной точки на второй прямой осуществляется так же, как и по первому отрезку прямой, но для него ищется свой интервал времени движения.

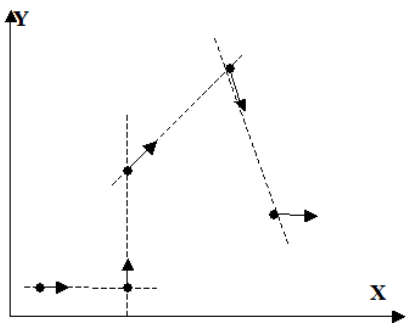


Рис. 10. Метод реперных точек для планирования движения



Рис. 11 Пример траектории робопоезда

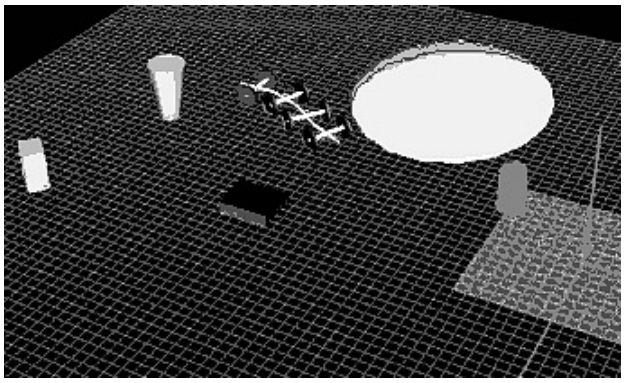


Рис. 12. Эпизод моделирования

Далее проведем ту же процедуру для второго и третьего отрезков движения и так далее до конечной точки.

Следует заметить, что ширина «коридора» зависит от требуемой точности прохождения трассы системой тележек. Этот вопрос рассматривался в [14–16].

Дополнительный метод планирования движения назван методом реперных точек. Его идея показана на рис. 10. Здесь на плоскости задается набор точек, через которые должен пройти аппарат с заданными ориентациями. Легко показать, что этот метод сводится к рассмотренному выше методу коридоров.

На рис. 11 показан пример планирования траектории робопоезда и ее исполнения в задаче движения с обходом препятствия. По результатам моделирования был сделан вывод о приемлемом качестве планирования и исполнения движения.

Эпизод моделирования приведен на рис. 12.

Заключение

Вывод может быть сделан следующий. Технология создания роботов-змей вышла на уровень практической и в настоящее время уже ясно, как такие роботы можно строить. Роботы-змеи смогут найти применение в решении задач перемещения по сложному рельефу, а также мониторинга, информационного обеспечения миссий других мобильных роботов.

Библиографический список

1. *Hirose S.* Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators. Oxford: Univ. Pres., 1993. 220 p.

2. *Лаврентьев М. А., Лаврентьев М. М.* Об одном принципе создания тяговой силы для движения. ПМТФ. 1962. № 4. С. 3–9.

3. *Журавлев В. Ф.* Об одной модели механизма движения змеи. ПММ. 2002. Т. 66. Вып. 4. С. 534–538.

4. *Литвинцев А. И., Пятницкий Е. С.* Динамика и управление многозвенным транспортным механизмом. Автоматика и телемеханика. 1993. № 1. С. 141–153.

5. URL: https://www.dailytechinfo.org/robots/4258-hibot-acm-r5h-robot-zmeya-sposobnyy-peredvigatsya-kak-po-sushe-tak-i-v-vode.html

6. URL: http://www.mechatronics.me.kyoto-u.ac.jp/https://nplus1.ru/news/2018/10/15/snakes-and-ladders

7. URL: https://robo-hunter.com/news/robot-zmeya-nauchilsya-polzat-po-pesku

8. URL: https://www. dailymail.co.uk/sciencetech/article-4608210/Furry-snake-like-camera-robot-built-disaster-relief. html

9. URL: http://robotforum.ru/novosti-texnogologij/robot-zmeya-ot-kompanii-biorobotics-video.html

10. URL: http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/index.php

11. URL: https://makezine.com/projects/nagaina-the-snake-robot/

12. URL: https://hi-news.ru/research-development/v-budushhem-marsianskie-peski-budut-issledovat-robotizirovannye-zmei.html

13. URL: https://defense-pdate.com/20101110_snake_robot_brml.html

14. *Павловский В. Е., Петровская Н. В.* Исследование динамики движения цепочки «робопоезд»: уравнения движения, частные решения. М.: Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2005. № 117. 31 с.

15. *Павловский В. Е., Петровская Н. В., Евграфов В. В.* Исследование динамики движения цепочки «робопоезд». Управляемое движение. М.: Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2005. № 120. 31 с.

16. *Павловский В. Е., Петровская Н. В.* Исследование динамики Движения цепочки «робопоезд». Методы планирования движения. М.: Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2005. № 121. 31 с.

УДК 621.865.8

С. И. Савин*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Л. Ю. Ворочаева**
кандидат технических наук, доцент
**Университет Иннополис*
***Юго-Западный государственный университет*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА КАК ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА

В статье рассмотрен вопрос восстановления вертикальной устойчивости шагающего робота, движущегося по опорной поверхности, которая может быть локально аппроксимирована как кусочно-линейная. Для этого случая предложена формулировка задачи поиска новых положений точек контакта робота и опорной поверхности, а также нового положения его центра масс, позволяющих роботу сохранить вертикальную устойчивость. Предложенный способ основан на записи нелинейной задачи математического программирования.

Ключевые слова: *шагающий робот, контактное взаимодействие, восстановление равновесия, математическое программирование.*

S. I. Savin*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
L. Y. Vorochaeva**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Innopolis University*
***Southwest State University*

VERTICAL BALANCE RECOVERY FOR A WALKING ROBOT AS AN OPTIMIZATION PROBLEM

In this paper, the topic of vertical balance recovery for a walking robot is discussed. In particular, the case when the robot is moving over terrain that can be closely local- ly approximated by a piece-wise linear function is considered. For this case, the paper presents a formulation of the task of finding new contact points, as well as new center of mass position for the robot that would allow the robot to reclaim its vertical balance. The proposed method is based on non-linear optimization.

Keywords: *walking robot, contact interaction, vertical balance recovery, numeric optimization.*

Понятие вертикальной устойчивости является ключевым в робототехнике двуногих шагающих механизмов и в особенности в антропоморфной робототехнике. Под вертикальной устойчивостью двуногих роботов понимают способность робота сохранять желаемые режимы контактного взаимодействия с опорной поверхностью, предотвращая нежелательные потери и приобретения контакта, в том числе падения.

Одним из ключевых способов сохранения вертикальной устойчивости для антропоморфных роботов является планирование движения с учетом требований, связанных с ограничениями, соответствующими текущему, и планируемым режимам контактного взаимодействия. Например, значительные успехи достигнуты в использовании ZMP (от англ. *zero moment point*) принципа для планирования траектории центра масс робота для заданной последовательности шагов [1–3]. Одним из популярных подходов является введенный С. Каджита так называемый *preview control*, основанный на использовании LIP (от англ. *linear inverted pendulum*) модели для упрощенного описания динамики центра масс робота и формулировки задачи отыскания его траектории как задачи управления [4–5].

Подобные подходы ограничены движениями, которые могут быть выполнены, сохраняя все допущения, необходимые для использования этих методов. Так, ZMP принцип позволяет планировать траектории, не учитывая физические особенности контактного взаимодействия, такие как наличие конуса трения. Это является преимуществом с точки зрения сложности метода, но недостатком с точки зрения объема набора задач, для которых этот метод пригоден. Од-

ним из способов преодоления указанных ограничений является их непосредственный учет при планировании траекторий, использование траекторий, робастных (с точки зрения сохранения вертикальной устойчивости) к изменению параметров опорной поверхности [6–7]. Другим подходом является использование методов восстановления вертикальной устойчивости для обеспечения движения робота по заданной траектории при наличии неучтенных геометрических или физических ее особенностей, а также при наличии столкновений и возмущающих воздействий. Остановимся на этих методах подробнее.

В настоящий момент известны ряд методов восстановления вертикальной устойчивости (вертикального равновесия) для шагающих механизмов, основанных на различных стратегиях управления. Одним из популярных подходов является планирование положения контакта робота с опорной поверхностью, который должен быть приобретен для того, чтобы робот мог сохранить устойчивость. Примерами такого подхода являются так называемые *capture point* методы [8–10], *divergent component of motion* методы [11–12] и др.

Одним и простых подходов к восстановлению вертикальной устойчивости является попытка получить новый контакт с опорной поверхностью такой, что точка ZMP будет находиться внутри нового опорного полигона. Тогда важным является вопрос настройки системы управления робота для реализации указанного движения. В случае если совершение шага не является обязательным, можно сформулировать задачу генерации траектории робота из заданных начальных условий, позволяющей ему сохранить вертикальную устойчивость и перейти в положение, при котором возможно движение, используя штатные методы генерации движения [13–14]. Одной из проблем, связанной с такими подходами, является вычислительная сложность алгоритмов, которая должна допускать их работу в режиме реального времени.

В этой работе приведем описание альтернативного подхода к восстановлению вертикальной устойчивости, основанного на использовании численной оптимизации. Для этого сформулируем эту задачу как задачу математического программирования. Использование численной оптимизации в контурах управления реального времени является возможным благодаря успехам, достигнутым в области разработки высокоэффективных алгоритмов и реализующих их программных пакетов численной оптимизации, в особенности для задач выпуклого программирования [15–16]. Методы численной оптимизации используются для планирования последовательностей шагов антропоморфных роботов, планирования траекторий, организации управления по обратной связи, и др. [17–20]. В следующем разделе будет приведено описание и анализ свойств оптимизационной задачи, связанной с восстановлением вертикальной устойчивости робота.

Задача восстановления вертикальной устойчивости как оптимизационная задача

Диаграмма контактного взаимодействия шагающего механизма показана на рис. 1.

Рассмотрим уравнения движения шагающего робота, введя допущение, что величина кинетического момента механизма в целом остается неизменной. Тогда можем рассмотреть динамику центра масс робота и уравнение баланса моментов, учитывая реакции связей, обусловленных контактным взаимодействием. Соответствующие выражения приведены ниже:

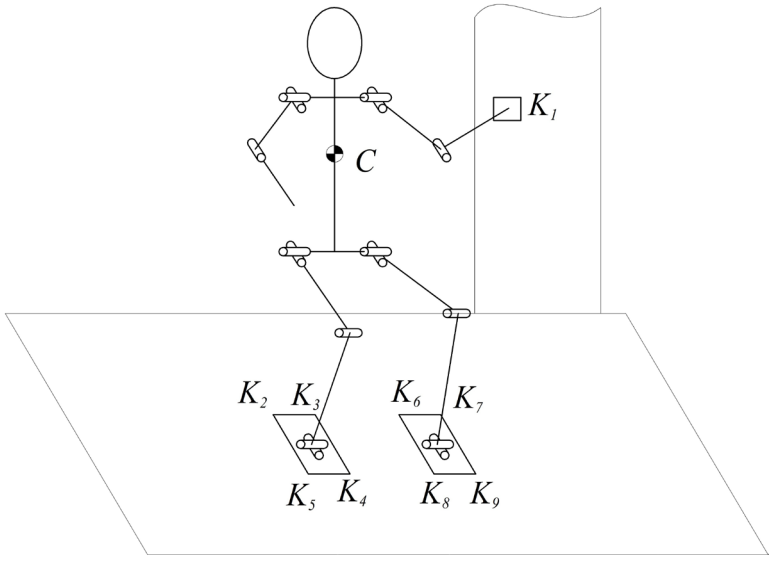


Рис. 1. Диаграмма контактного взаимодействия шагающего механизма

$$\begin{cases} m_C \ddot{r}_C = \sum_{i=1}^{n} f_{ki} + f_g \\ 0 = \sum_{i=1}^{n} [r_{ki}]_X f_{ki} + [r_C]_X f_g \\ \forall i \, \| f_{ki} - \left(f_{ki}^T n_{ki} \right) n_{ki} \| \le \mu_{ki} f_{ki}^T n_{ki} \end{cases}, \quad (1)$$

где r_c – вектор, задающий положение центра масс робота; m_c – масса робота; f_{ki} – сила контактного взаимодействия в i-й точке контакта робота с опорной поверхностью, f_g – сила тяжести; r_{ki} – вектор, задающий положение i-й точки контакта робота с опорной поверхностью; n_{ki} – вектор, задающий нормаль к опорной поверхности в i-й точке контакта; n – число точек контакта с опорной поверхностью; μ_{ki} – коэффициент трения между стопой робота и опорной поверхностью в i-й точке контакта; $[\cdot]_x$ – матричное представление вектора в векторном произведении такое, что $[x]_x y = x \times y$, $\|\cdot\|$ – Евклидова норма вектора.

Выражение (1) можно преобразовать в алгебраическое, используя конечные разности и введя линейную аппроксимацию конуса трения:

$$\begin{cases} \frac{m_C}{\Delta t^2}(r_C^{t-\Delta t} - 2r_C^t + r_C^{t+\Delta t}) = \sum_{i=1}^{n} f_{ki} + f_g \\ 0 = \sum_{i=1}^{n} [r_{ki}]_X f_{ki} + [r_C^{t+\Delta t}]_X f_g \\ \forall i C_{ki} f_{ki} + [r_{ki}]_X f_{ki} + [r_C^{t+\Delta t}]_\Delta f_g \end{cases}, \quad (2)$$

где C_{ki} – матрица линейной аппроксимации конуса трения; $r\ r_c^t, r_c^{t-\Delta t}, r_c^{t+\Delta t}$ – положения центра масс в моменты времени t, $t + \Delta t$ и $t - \Delta t$; a Δt – шаг во времени.

Используя приведенное выражение, можем записать оптимизационную задачу с квадратичной целевой функцией, квадратичными ограничениями в виде равенств и линейными ограничениями в виде неравенств:

Minimize $\| r_c^{t-\Delta t} - 2r_c^t + r_c^{t+\Delta t} \|_{W1}^2 + \| \Delta r_{ki} \|_{W2}^2$;

$$r_c^{t+\Delta t}, \Delta r_{ki}, f_{ki}$$

subject to:

$$\begin{cases} \frac{m_c}{\Delta t^2}(r_c^{t-\Delta t} - 2r_c^t + 2r_c^{t+\Delta t}) = \sum_{i=1}^{n} f_{ki} + f_g \\ 0 = \sum_{i=1}^{n} [r_{ki} + \Delta r_{ki}]_X f_{ki} + [r_c^{t+\Delta t}]_X f_g \\ \forall i C_{ki} f_{ki} \le 0 \\ \forall i A_{ki}(r_{ki} + \Delta r_{ki}) = b_{ki} \end{cases}, \quad (3)$$

где A_{ki}, b_{ki} – матрица и вектор локальной линейной аппроксимации опорной поверхности около i-й точки контакта; Δr_{ki} – смещение i-й точки контакта; $\|\bullet\|_{W1}^2$ и $\|\bullet\|_{W2}^2$ – взвешенные векторные нормы с весовыми матрицами $W1$, $W2$.

Заметим, что указанная задача существенно нелинейная, так как условия в виде равенств содержат квадратичную форму оптимизируемых параметров.

Это можно интерпретировать как срез гиперплоскостью многомерного аналога параболоида. Используя срез параболоида плоскостью в трехмерном пространстве в качестве упрощенного примера, можно убедиться, что результирующее многообразие не является связным. Можно указать, что рассматриваемая задача имеет общие черты с задачами оптимизации вращений, которые также являются вычислительно сложными. Такие задачи можно решать кусочно-линейной аппроксимацией входящих в них невыпуклых функций, заменяя исходную задачу задачей смешанного целочисленного программирования (MIP, mixedinteger program) [21–22].

Альтернативным подходом является локальная линеаризация невыпуклых функций в окрестности решения, но такой подход требует знания достаточно точного начального приближения решения. Основным достоинством предложенной формулировки поиска нового положения центра масс и точек контакта является его универсальность. Этот метод не требует использования какого-то конкретного набора точек контакта или каких-то конкретных их свойств. При необходимости принудить алгоритм использовать конкретное подмножество точек контакта для поиска нового положения, реализующего вертикальную устойчивость, достаточно исключить остальные точки контакта из числа оптимизируемых параметров. Основным недостатком метода является отсутствие робастных алгоритмов для численного решения таких оптимизационных задач в режиме реального времени.

Заключение

В этой работе приведена формулировка метода решения задачи восстановления вертикальной устойчивости для шагающего робота. Метод сформулирован как задача математического программирования с квадратичной целевой функцией, линейными условиями в виде равенств и неравенств, а также квадратичными условиями в виде равенств. Дальнейшая работа включает разработку эффективного метода решения указанной оптимизационной задачи для обеспечения возможности использования этого метода в составе системы управления шагающего робота в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-38-00140\18).

Библиографический список

1. *Vukobratović M., Borovac B.* Zero-moment point-thirty five years of its life. International journal of humanoid robotics, 2004. 1 (01). P. 157–173.

2. *Jatsun S., Savin S.,Yatsun A.* Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. In International Workshop on Medical and Service Robots. 2016. P. 305–317.

3. Simulation of exoskeleton sit-to-stand movement. Journal of Machinery Manufacture and Reli- ability, 45(3) / G. Panovko, S. Savin, S. Yatsun, A Yatsun. 2016. P. 206–210.

4. Biped walking pattern generation by using pre-view control of zero-moment point. In ICRA \ S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko. 2003. Vol. 3. P. 1620–1626.

5. Arbitrary trajecto- ry foot planner for bipedal walking. Conference: 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics / R. Khusainov, A. Klimchik, E. Magid, A. Sagitov. 2017.

6. *Савин С. И., Ворочаева Л. Ю.* Определение допустимых положений центра масс шагающего робота, движущегося по пересеченной местности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии № 3 (329). 2018. С. 49–56.

7. *Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В.* Определение допустимых диапазонов длины шага четырехногого внутритрубного робота // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 206–217.

8. *Pratt J., Carff, J., Drakunov S., Goswami, A.* Capture point: A step toward humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on. 2006. P. 200–207.

9. Bipedal walking control based on capture point dynamics. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on / J. Englsberger, C. Ott, M. Roa et al. 2011. P. 4420–4427.

10. Balance control based on capture point error compensation for biped walking on uneven terrain. In Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on / M. Morisawa, S. Kajita, F. Kanehiro et al. 2012. P. 734–740.

11. *Englsberger J., Ott C., Albu-Schäffer A.* Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion. IEEE Transactions on Robotics, 31 (2). 2015. P. 355–368.

12. *Hopkins M., Hong D., Leonessa A.* Compliant locomotion using whole-body control and Divergent Component of Motion tracking. In Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on. 2015. P. 5726–5733.

13. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.*, Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton perform- ing push recovery. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2016 20th International Conference on. P. 107–112.

14. *Jatsun S., Savin S., Yatsun, A.* Motion control algorithm for exoskeleton push recovery in the frontal plane. In International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. 2016. P. 474–481.

15. *Boyd S., Vandenberghe L.* Convex optimization. Cambridge university press. 2004.

16. *Grant M., Boyd S., Ye Y.*CVX: Matlab software for disciplined convex programming. 2008.

17. *Otani K., Bouyarmane K.* Adaptive whole-body manipulation in human-to-humanoid multi-contact motion retargeting. In Humanoid Robotics (Humanoids), 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on. 2017. P. 446–453.

18. *Jatsun S., Savin S., Yatsun, A.* Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2017. P. 75–82.

19. *Savin S., Vorochaeva L.* Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots. In Industrial Engineering, Applications and Manu- facturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. 2017. P. 1–6.

20. Straight-leg walking through underconstrained whole-body control. In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) / R. Griffin, G. Wiedebach, S. Bertrand. 2018. P. 1–5.

21. *Deits R., Tedrake R.* Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization. In Humanoid Robots (Humanoids), 2014 14th IEEE-RAS International Conference on. 2014. P. 279–286.

22. *Deits R.* Convex segmentation and mixed-integer footstep planning for a walking robot (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). 2014.

УДК621.865

С. И. Савин*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Л. Ю. Ворочаева**
кандидат технических наук, доцент
А. В. Ворочаев****
системный инженер-программист
**Университет Иннополис*
***Юго-Западный государственный университет*
****ВАИС-техника*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ПЕРЕДАЧ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА

В работе рассматривается антропоморфный робот, приводы которого оснащены передачами с упругими свойствами. Предложен способ записи математической модели рассматриваемого механизма, позволяющий использовать методы управления, разработанные для систем без гибких передач. Рассмотрено влияние, оказываемое параметрами упругих передач, на качество работы системы управления, изучены свойства этой зависимости.

Ключевые слова: *антропоморфный робот, упругая передача, система управления, линейный квадратичный регулятор, оптимизация.*

S. I. Savin*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
L. Y. Vorochaeva**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. V. Vorochaev****
System Engineer-Programmer
**Innopolis University*
***Southwest State University*
****VAIS-technique*

STUDY OF THE INFLUENCE THE PARAMETERS OF ELASTIC DRIVES HAVE ON THE PERFORMANCE OF THE CONTROL SYSTEM OF A HUMANOID ROBOT

In this paper, an anthropomorphic robot with elastic drives is studied. A simplified method for building its mathematical model is presented, allowing the use of the control methods developed for systems without elastic drives. The influence of the parameters of elastic drives on the quality of the control system operation is examined, the properties of this dependence are studied.

Keywords: *anthropomorphic robot, elastic transmission, control system, linear quadratic controller, optimization.*

Введение

В настоящее время продолжается активное развитие технологий, связанных с проектированием и управлением антропоморфными шагающими роботами. Внимание к таким механизмам обусловлено в том числе возможностью использовать существующую инфраструктуру, построенную для использования людьми, что позволит упростить и снизить стоимость повсеместного внедрения таких устройств для автоматизации различных процессов.

Среди проблем, связанных с внедрением таких роботов, можно выделить следующие: формирование выполнимой последовательности шагов, обеспечение вертикальной устойчивости, генерация походки, робастное устойчивое управление, а также обработка и интерпретация сенсорной информации. Задача формирования последовательности шагов для двуногих шагающих механизмов, которая может быть выполнена с учетом кинематики и динамики робота, особенностей опорной поверхности, а также на-

личия препятствий, рассматривается в ряде работ. В работах [1–3] предлагается использовать разбиение свободного от препятствий пространства на выпуклые области и генерировать последовательность шагов путем решения задачи MICP программирования (от англ. *mixed integer convex programming*). В работах [3–5] представлены способы генерации шагов по кусочно-линейным опорным поверхностям, таким как лестницы. В статье [6] рассмотрено формирование последовательности шагов по поверхности более сложной геометрии.

Задачи сохранения вертикальной устойчивости и генерации походки зачастую решаются совместно и используют сформированную ранее последовательность шагов в качестве входных данных. Одним из распространенных подходов является использование принципа ZMP (от англ. *zero-moment point*) для нахождения желаемой траектории центра масс и использование этой траектории для формирования и решения обратной задачи кинематики [7–10]. Существуют альтернативные подходы, основанные на использовании CWC критерия (от англ. *Contact Wrench Cone*) [11, 12], снимающие часть ограничений, связанных с использованием ZMP.

В данной работе остановимся на вопросах управления движением шагающих механизмов. Для управления движением таких устройств был разработан ряд методов. Среди них модификации линейного квадратичного регулятора (ЛКР) [13–16], пропорционально-дифференциальных (ПД) регуляторов в сочетании с решением обратной задачи динамики [16–18], регуляторов, формулирующих задачу отыскания управляющих воздействий как задачу квадратичного программирования [14, 19–22]. Для таких регуляторов рассматривались задачи их настройки [23], изучалось влияние характеристик электроприводов на качество их работы [24] и др.

Следует заметить, что регуляторы такого типа используют математическую модель устройства для вычисления управляющих воздействий. В связи с этим важно определить влияние немоделируемых свойств шагающего робота на качество работы его системы управления. В данной работе будем рассматривать одно из таких свойств – упругость передачи между электродвигателями, генерирующими управляющие моменты, и звеньями робота. Данный эффект может быть как побочным, например, связанным со свойствами используемых материалов, так и желательным, когда передача проектируется с заданными упругими свойствами с целью уменьшить ударные и другие нагрузки на механические части передачи, повысить энергоэффективность робота и получить другие желаемые свойства механической системы [25, 26]. Подобный способ введения упругих элементов не является единственным, другие варианты представлены в работах [27–29].

В этой работе исследуется влияние упругости передачи на качество работы системы управления при условии, что модель робота, используемая системой управления, не учитывает влияние этой упругости, рассматривается способ моделирования такого механизма.

Описание робота

В настоящее время разработано и тестируется значительное число разнообразных конструкций антропоморфных механизмов. Робот Atlas, разработанный компанией Boston Dynamics, имеет 28 степеней свободы [14], а робот HUBO (модель DRC-HUBO+), разработанный в лаборатории HUBO lab в университете KAIST, – 32 степени свободы [30]. Движение антропоморфных механизмов может также рассматриваться в отдельных плоскостях – в сагиттальной [31] или фронтальной [32, 33]. В рамках данной работы остановимся на одной из наиболее простых схем, моделирующих робота, перемещающегося в сагиттальной плоскости, как трехзвенный механизм. Расчетная схема такого робота приведена на рис. 1, *а*. На рис. 1 использованы обозначения: 0 – шарниры, ср. углы, определяющие ориентацию звеньев робота. Математическая модель, описывающая кинематику и динамику такого робота, представлена в работах [34–36].

Наличие упругого элемента между электроприводом и звеном робота, приводимым в движение этим электроприводом, означает, что робот приобретает дополнительную степень свободы – вал привода может вращаться, тогда как остальной механизм может оставаться неподвижным. Упрощенная модель привода с упругой передачей показана на рис. 2.

Математическая модель робота, показанного на рис. 1, *а* имеет три степени свободы (при принятии допущения, что стопа робота не отрывается от опорной поверхности и не скользит по

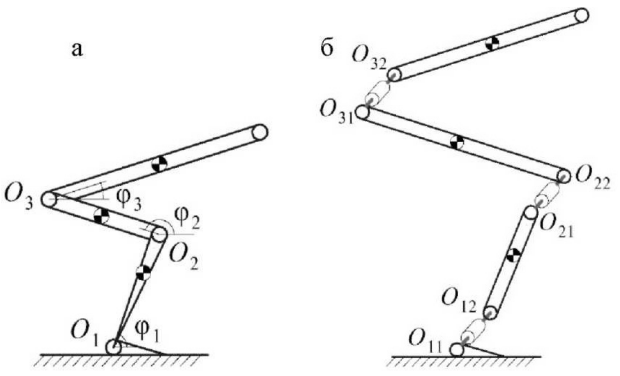


Рис. 1. Расчетная схема робота: а – без учета дополнительных степеней свободы, связанных с упругой передачей; б – с учетом дополнительных степеней свободы

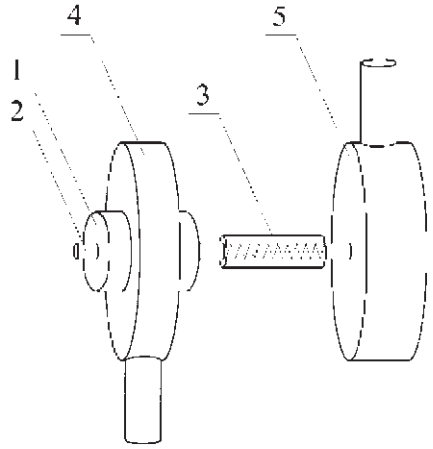


Рис. 2. Модель привода с упругой передачей: 1 – электропривод; 2 – вал электропривода; 3 – упругая передача; 4, 5 – звенья робота

ней). С учетом дополнительных степеней свободы, привносимых в модель упругими передачами, общее число степеней свободы возрастает до 6. Соответствующая расчетная схема показана на рис. 1, *б*. На этом рисунке цилиндрами условно обозначены новые звенья, включающие валы электродвигателей и связанные с ними элементы редукторов и передач. Далее будем называть эти звенья «вал привода».

Сделаем несколько наблюдений касательно модели, получаемой для данной расчетной схемы. Во-первых, массы и моменты инерции валов приводов значительно ниже масс и моментов инерции звеньев робота, что делает модель плохо определенной и затрудняет использование стандартных численных схем для интегрирования получаемых уравнений движения. Значения упомянутых выше параметров валов приводов могут быть неизвестны (например, при использовании электроприводов без исчерпывающей конструкторской документации, что часто происходит в экспериментальных исследованиях), помимо этого могут быть не известны точные значения параметров упругой передачи. Получение точных данных о текущей ориентации вала также не всегда является возможным и зачастую не представляет самостоятельного интереса с точки зрения управления роботом. Также модель, представленная на рис. 1, *б*, имеет лишь 3 привода на 6 степеней свободы, что делает ее системой с дефицитом управляющих воздействий и не позволяет использовать ряд методов управления, разработанных для механических систем, где число степеней свободы равно числу управляющих воздействий.

В связи с вышесказанным, оправданным является использование упрощенной математической модели робота, представленной на рис. 1, *а*, и отдельное моделирование динамики валов приводов и упругой передачи. Важными преимуществами данного подхода являются: 1) упрощение модели механизма, используемой системой автоматического управления (САУ) робота; 2) возможность использовать стандартные методы управления без необходимости учитывать свойства валов приводов и упругой передачи. Недостатком такого подхода является возможное снижение точности получаемых результатов моделирования и управления.

Предлагаемая математическая модель робота имеет вид:

$$\begin{cases} H\ddot{q} + c = Bu \\ H_s\ddot{q}_s = u - u_s \\ u_s = C_p(q - q_s) + C_d(\dot{q} - \dot{q}_s) \end{cases}, \qquad (1)$$

где q – вектор обобщенных координат; H – обобщенная матрица инерции робота; C – вектор моментов Кориолисовых и нормальных сил инерции, диссипативных сил и сил тяжести; B – матрица, преобразующая моменты, действующие в шарнирах робота, в вектор обобщенных моментов; u_s – вектор моментов, действующих в шарнирах робота (моментов, передаваемых упругой передачей); u – вектор моментов, генерируемых электроприводами робота; q_s – вектор координат, определяющий ориентации валов приводов; H_s – диагональная обобщенная матрица инерции для валов приводов; C_p и C_d – матрицы упругости и диссипации, определяющие свойства упругой передачи. В последующих разделах будем исследовать влияние параметров C_p, C_d и H_s на качество работы системы управления робота.

Моделирование работы системы управления робота

В этом разделе рассмотрим управляемое движение исследуемого робота при перемещении по заданной траектории. Будем использовать траектории движения, реализующие вертикализацию робота, предложенные в работе [35] и полученные путем аналитического решения обратной задачи кинематики для заданной траектории движения центра масс. Для управления роботом задействуем итеративный линейный квадратичный регулятор (ИЛКР), описанный в работах [9, 16]. Общий вид закона управления, получаемого при использовании ИЛКР, имеет вид:

$$u = \mathbf{K}(t)(x - x^*) + u^*, \qquad (2)$$

где $x = [q^T\ q^T]^T$; x^* – желаемое значение x; $\mathbf{K}(t)$ – матрица коэффициентов регулятора, получаемая решением алгебраического уравнения Риккати через заданные промежутки времени; u^* – значение управляющих воздействий, получаемых решением обратной задачи динамики.

Для исследования влияния значений параметров C_p, C_d и H_s на качество работы САУ робота примем допущение, что все валы приводов иден-

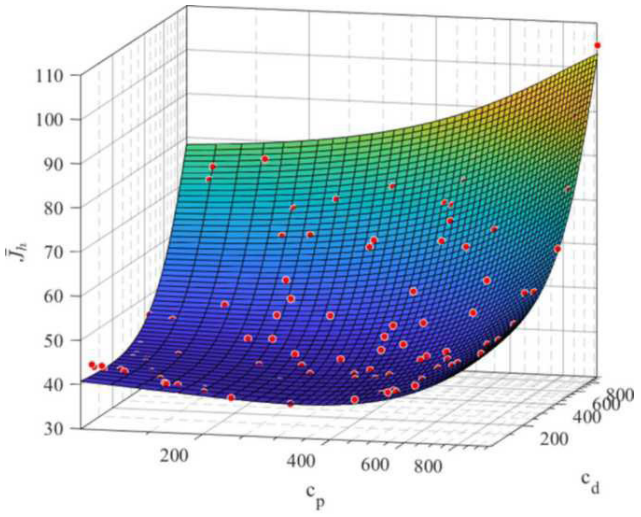


Рис. 3 Поверхность $J_h(c_p, c_d)$, полученная при $h_s = 0{,}5$ кг-м². Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе

тичные: $C_p = c_p I$, $C_d = c_d I$ и $H_s = h_s I$. Для оценки качества работы системы управления используем квадратичную аддитивную целевую функцию:

$$J = \int (x - x^*)^T \mathbf{Q}(x - x^*) + (u - u^*)^T \mathbf{R}(u - u^*)dt, \quad (3)$$

где **Q** и **R** – весовые матрицы.

Будем производить моделирование следующим образом: задаем значение h_s, выбираем n пар значений c_p, c_d и для каждой из полученных таким образом троек (h_s, c_p, c_d) интегрируем уравнения (1) с учетом управления (2) и находим значение функции J. Полученные значения образуют поверхность $J_h = J_h(c_p, c_d)$. Аппроксимируем эту поверхность кубической функцией двух переменных:

$$\bar{J}_h(c_p, c_d) = a_1 c_p + a_2 c_p^2 + a_3 c_p^3 + a_4 c_d + a_5 c_d^2 + a_6 c_d^3 + a_7, \quad (7)$$

где a – полиномиальные коэффициенты.

На рис. 3 показана поверхность $J_h(c_p, c_d)$, найденная для $h_s = 0{,}5$ кг-м². Здесь и далее пары значений c_p, c_d выбирались так, чтобы они были равномерно распределены в диапазоне $100 > c_p > 1000$, $100 > c_d > 1000$ в логарифмическом масштабе. Рис. 3 показывает, что построенная таким образом поверхность достаточно точно аппроксимирует набор точек, полученных в ходе численных экспериментов. Данная поверхность имеет слабо выраженный минимум.

Для того чтобы упростить анализ получаемых поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, далее будем представлять их в виде контурных графиков. На рис. 4 показан контурный график поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, полученных при $h_s = 0{,}1$ кг-м² и $h = 0{,}5$ кг-м². Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе.

Можем заметить, что минимум данной функции достигается при $c_p = 228{,}7$; $c_d = 102$ и составляет $\min J_h = 21$ для случая $h_s = 0{,}1$ кг-м² и при $c_p = 330{,}7$; $c_d = 117{,}2$ для случая $h_s = 0{,}5$ кг-м², причем повышение значения c_d значительно ухудшает показатель работы САУ. Рассмотрим, как эта поверхность изменится при выборе больших значений h_s (рис. 5).

Для $h_s = 1$ кг-м² минимум функции $J_h(c_p, c_d)$ достигается при $c_p = 416{,}5$; $c_d = 208{,}6$; для $h_s = 2$ кг-м² – при $c_p = 512{,}5$; $c_d = 268{,}8$. Таким образом, с увеличением h_s минимум смещается в сторону больших значений c_p и c_d.

На рис. 6 показано, как поверхности $J_h(c_p, c_d)$ изменяются при дальнейшем увеличении h_s.

Рис. 6 показывает, что при дальнейшем увеличении h_s поверхности $J_h(c, c_d)$ приобретают локальные минимумы. Глобальный минимум достигается при $c_p = 1000$, $c_d = 1000$ для $h_s = 5$ кг-м² и при $c_p = 1000$; $c_d = 1000$ для $h_s = 20$ кг-м². Оба минимума были достигнуты на границе диапазонов значений для параметров c_p, c_d.

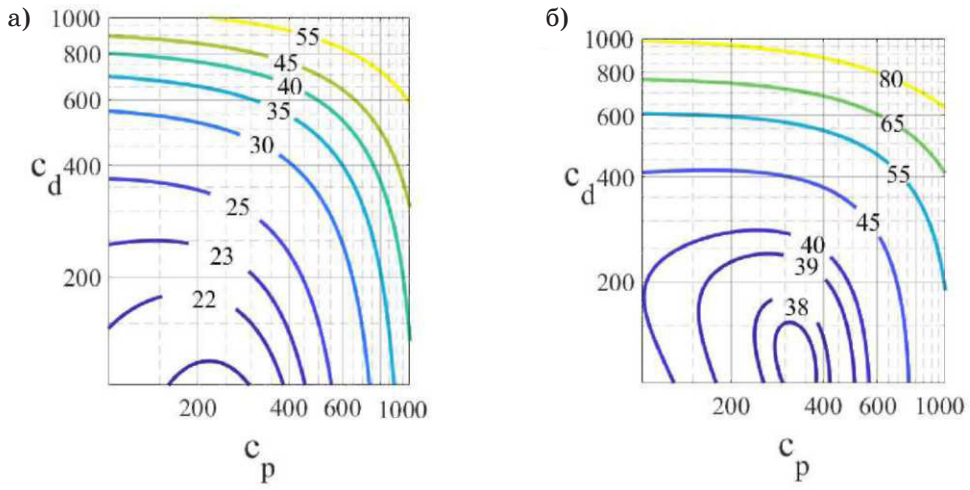


Рис. 4 Контурные графики поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, полученные при: а – $h_s = 0{,}1$ кг-м²; б – $h_s = 0{,}5$ кг-м². Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе

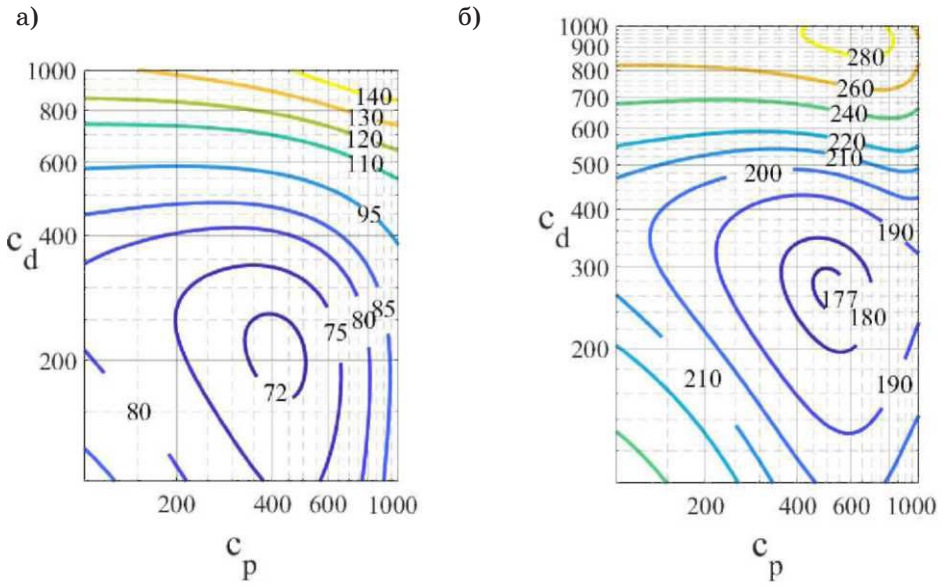


Рис. 5. Контурные графики поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, *полученные при:*
а – $h_s = 1$ *кг-м²; б –* $h_s = 2$ *кг-м². Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе*

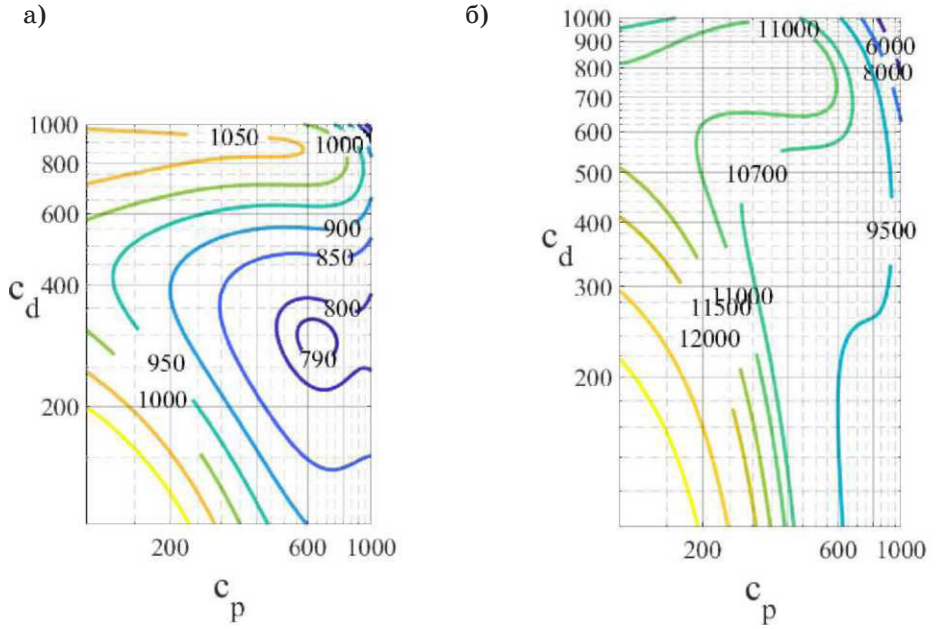


Рис. 6. Контурные графики поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, *полученные при:*
а – $h_s = 5$ *кг-м²; б –* $h_s = 20$ *кг-м². Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе*

Полученные данные также демонстрируют, что минимумы поверхностей $J_h(c_p, c_d)$ растут с увеличением h_s. Это указывает на то, что рост момента инерции вала привода негативно сказывается на качестве работы САУ робота. Для того чтобы проверить это предположение, рассмотрим поведение САУ при выборе низких значений h_s (рис. 7).

Можем заметить, что при $h_s = 0{,}08$ кг-м² поверхность демонстрирует локальные минимумы, а при $h_s = 0{,}07$ кг-м² наименьшее значение функции $J_h(c_p, c_d) = 20{,}2$ оказывается выше, чем при $h_s = 0{,}08$ кг-м². Это указывает на то, что величина момента инерции вала двигателя имеет оптимальное значение. В данном случае это $h_s = 0{,}08$ кг-м². Для данного значения h_s оптимальный выбор параметров c_p, c_d следующий: $c_p = 268{,}8$; $c_d = 102$; величина $J_h(c_p, c_d)$ при этом составила 14,77.

В общем случае оптимальное значение величины h_s должно подбираться с учетом требований к робастности системы управления. В данном исследовании не были учтены ошибки, связанные с неточностью параметров математической модели робота, используемой ИЛКР регулятором, ошибки, связанные с характеристиками сенсоров робота, а также влияние внешних возмущающих воздействий. При этом

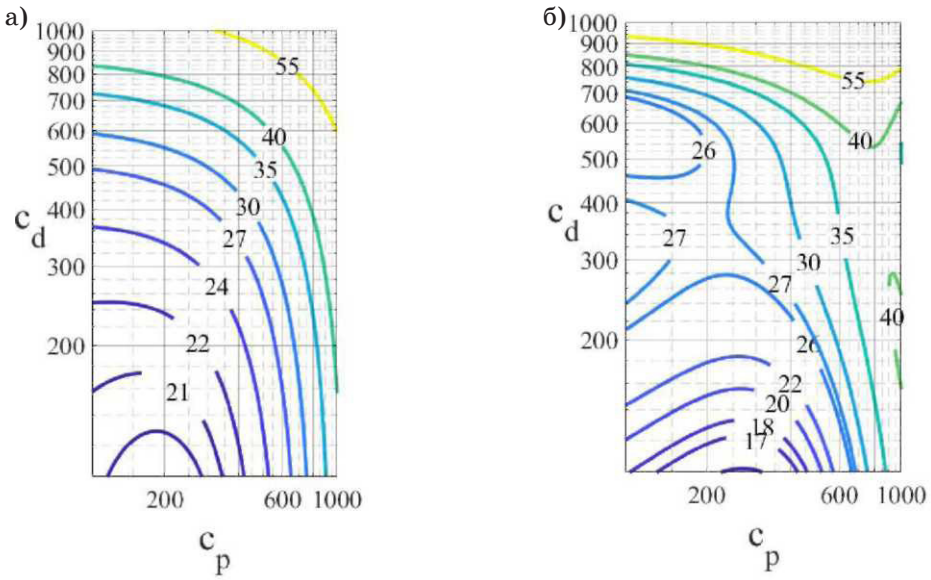


Рис. 7. Контурные графики поверхностей $J_h(c_p, c_d)$, *полученные при:* $a - h_s = 0{,}07$ *кг-м*^{2}; $б - h_s = 0{,}08$ *кг-м*^{2}. *Горизонтальные оси выполнены в логарифмическом масштабе*

существенным полученным результатом является то, что параметры упругой передачи могут быть выбраны оптимально путем исследования модели робота.

Заключение

В этом докладе было исследовано качество работы системы автоматического управления антропоморфного механизма, использующего приводы с упругими передачами. Рассматривалось движение механизма в сагиттальной плоскости. В качестве регулятора был использован итеративный линейный квадратичный регулятор.

В ходе моделирования ставилась задача определить оптимальные значения параметров упругой передачи, в частности, значения коэффициентов, задающих ее инерционные, упругие и диссипативные свойства. Было определено, что данные параметры демонстрируют наличие глобального минимума. На практике не всегда возможно спроектировать упругую передачу, соответствующую оптимальным параметрам: например, выбирать инерционные свойства вала и редуктора привода. В таком случае можно использовать предложенную методику подбора упругих и диссипативных свойств упругой передачи.

Дальнейшая работа по данному проекту включает верификацию результатов моделирования, проверку сделанного предположения о возможности моделирования механической системы с упругими связями без введения дополнительных степеней свободы в динамическую модель механизма, оценку ошибок моделирования, связанных с этим допущением, а также учет влияния подобного допущения на поведение системы управления, использующей упрощенную математическую модель.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 78-38-00740178.

Библиографический список

1. *Deits R.*, Tedrake R. Computing large convex regions of obstacle-free space through semidefinite programming // In Algorithmic foundations of robotics XI. Springer, Cham. 2015. P. 109–124.

2. *Savin S.* An algorithm for generating convex obstacle-free regions based on stereographic projection // Proc. IEEE Intern. Siberian Conf. Control and Communications (SIBCON). Astana, 2017. P. 1–6.

3. *Deits, R., Tedrake R.* Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization // Proc. 14th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots (Humanoids). Madrid, 2014. P. 279–286.

4. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point / S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko et al. // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Taipei, 2003. Vol. 2. P. 1620–1626.

5. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs // Proc. Intern. Conf. Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2017. P. 75–82.

6. *Jatsun, S.* Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. Intern. Conf. Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR). Porto, 2017. P. 13–20.

7. Closed-form solution for real-time ZMP gait generation and feedback stabilization / R. Tedrake, S. Kuindersma, R. Deits, K. Miura // Proc. 15th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots (Humanoids). Seoul, 2015. P. 936–940.

8. Versatile and efficient pattern generator for generalized legged locomotion / J. Carpentier, S. Tonneau, M. Naveau et al. // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, 2016. P. 3555–3561.

9. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation // Proc. Intern. Workshop on Medical and Service Robots. Springer, Cham. 2016. P. 305–317.

10. *Park J., Youm Y.* General ZMP preview control for bipedal walking // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. Roma, 2007. P. 2682–2687.

11. *Caron S., Pham Q., Nakamura Y.* Stability of surface contacts for humanoid robots: Closed-form formulae of the contact wrench cone for rectangular support areas // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Seattle, 2015. P. 5107–5112.

12. Universal stability criterion of the foot contact of legged robots-adios ZMP / H. Hirukawa, S. Hattori, K. Harada et al. // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Orlando, 2006. P. 1976–1983.

13. *Mason S., Righetti L., Schaal S.* Full dynamics LQR control of a humanoid robot: An experimental study on balancing and squatting // Proc. 14th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots (Humanoids). Madrid, 2014. P. 374–379.

14. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon et al. // Autonomous Robots. 2016. Vol. 40 (3). P. 429–455.

15. *Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L.* Modification of constrained LQR for control of walking in-pipe robots // Proc. IEEE Intern. Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 2017. P. 1–6.

16. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton // Proc. IEEE Intern. Conf. Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Chengdu, 2016. P. 239–244.

17. *Mistry M., Buchli J., Schaal S.* Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Anchorage, 2010. P. 3406–3412.

18. Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization / S. Jatsun, S. Savin, B. Lushnikov, A. Yatsun // ITM Web of Conferences. 2016. Vol. 6. P. 1–5.

19. *Ames A., Galloway K., Grizzle J.* Control lyapunov functions and hybrid zero dynamics // Proc. IEEE 51st Annual Conf. Decision and Control (CDC). Maui, 2012. P. 6837–6842.

20. Torque saturation in bipedal robotic walking through control Lyapunov function-based quadratic programs / K. Galloway, K. Sreenath, A. Ames, J. Grizzle // IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 323–332.

21. *Savin S.,* Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // Proc. IEEE Intern. Conf. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, 2017. P. 1–6.

22. *Савин С. И., Ворочаева Л. Ю.* Использование многоуровневого регулятора для управления движением шагающего внутритрубного робота в вертикальной трубе // Материалы конф. молодых ученых и студентов. Машиноведение и инновации (МИКМУС-2017). 2018. С. 323–326.

23. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences // Proc. 21st CISM-IFToMM Symposium ROMANSY. Robot Design, Dynamics and Control. Udine, 2016. P. 361–368.

24. Особенности управления движением многозвенной электромеханической системы с учетом свойств электропривода / Г. Я. Пановко, С. Ф. Яцун, С. И. Савин, А. С. Яцун // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 2(47). С. 2–10.

25. Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot / D. Robinson, J. Pratt, D. Paluska, G. Pratt // Proc. IEEE/ASME Intern. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, 1999. P. 561–568.

26. *Pratt J., Krupp B.* Series elastic actuators for legged robots // Unmanned Ground Vehicle Technology Vi. 2004. Vol. 5422. P. 135–145.

27. *Hurst J., Chestnutt J., Rizzi A.* The actuator with mechanically adjustable series compliance // IEEE Transactions on Robotics. 2010. Vol. 26 (4). P. 597–606.

28. Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, A. Postolnyi // Proc. 19th Intern. Conf. CLAWAR. Advances in Cooperative robotics. 2016. P. 797–805.

29. *Collins S., Ruina A.* A bipedal walking robot with efficient and human-like gait // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Barcelona, 2005. P. 1983–1988.

30. Technical Overview of Team DRC-Hubo UNLV's Approach to the 2015 DARPA Robotics Challenge Finals / P. Oh, K. Sohn, G. Jang et al. // Journal of Field Robotics. 2017. Vol. 34 (5). P. 874–896.

31. Моделирование процесса вставания экзоскелета из положения сидя / Г. Я. Пановко, С. И. Савин, С. Ф. Яцун, А. С. Яцун // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 19–24.

32. Изучение управляемого движения экзоскелета во фронтальной плоскости в режиме восстановления равновесия / С. Ф. Яцун, С. И. Савин, А. С. Яцун, А. В. Мальчиков // Сб. науч. ст. конф. Экстремальная робототехника. СПб., 2016. С. 236–245.

33. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for exoskeleton performing push recovery // Proc. 20th Intern. Conf. System Theory, Control and Computing. Sinaia, 2016. P. 107–112.

34. The modeling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism / S. F. Jatsun, L. Y. Vorochaeva, A. S. Yatsun, S. I. Savin // Proc. 18th Intern. Conf. CLAWAR. Hang Zhou, 2015. P. 175–182.

35. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, A. Malchikov // Advances in Robot Design and Intelligent Control. 2016. P. 165–172.

36. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // Proc. 10th Intern. Symposium Mechatronics and its Applications (ISMA). Sharjah, 2015. P. 1–6.

УДК 629.735.33

Е. Н. Политов*
кандидат технических наук, доцент
Е. А. Тимофеев*
студент
Д. В. Афонин*
аспирант
**Юго-Западный государственный университет, г. Курск*

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВУХСЕКЦИОННОГО КОЛЕСНОГО РОБОТА

В статье предложена кинематическая схема мобильного двухсекционного колесного робота. Каждая секция представляет собой трехколесную мобильную платформу с двумя независимо моторизованными соосными колесами и одним пассивным колесом, секции соединены между собой цилиндрическим шарниром. Описаны кинематические уравнения объекта.

Ключевые слова: *колесный робот, кинематический анализ, уравнения движения.*

E. N. Politov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. A. Timofeev*
Student
D. V. Afonin*
PhD Student
**Southwest State University, Kursk*

KINEMATIC ANALYSIS OF A TWO-SECTION WHEELED ROBOT

The article proposes a kinematic scheme of a mobile two-section wheeled robot. Each section is a three-wheeled mobile platform with two independently motorized coaxial wheels and one passive wheel, the sections are connected to each other by a cylindrical hinge. The kinematic equations of the object are described.

Keywords: *wheel robot, kinematic analysis, equations of motion.*

В работах [1–3] предложена конструкция роботизированной платформы (тягача) для транспортировки самолетов. Тягач и самолет представляют собой трехколесные транспортные платформы, соединенные между собой сцепкой или шарниром. При этом основной задачей является обеспечение движения такой цепочки роботизированных платформ по заданным траекториям и законам движения.

Математические модели робота с двумя независимо моторизованными соосными ведущими колесами представлены в работах [4–10].

Рассматриваемый робот представляет собой систему из двух мобильных секций с двумя соосными колесами по бортам платформы и рояльным передним колесом, соединенных цилиндрическим шарниром. Движение робота происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Кинематическая схема робота приведена на рис. 1.

Положение робота в неподвижной системе координат O, x, y, z описывается шестимерным вектором обобщенных координат

$$\mathbf{q} = \left| x_1\ y_1\ \psi_1\ x_2\ y_2\ \psi_2 \right|^{\mathrm{T}},$$

где x_1, y_1 – координаты точки A_1 – середины отрезка, соединяющего центры D_{11} и D_{12} задних колес секции 1; ψ_1 – угол поворота вокруг вертикали платформы 1, отсчитываемый от оси Ox; x_2, y_2 – координаты точки A_2 – середины отрезка, соединяющего центры D_{21} и D_{22} задних колес секции 2; ψ_2 – угол поворота вокруг вертикали платформы 2, отсчитываемый от оси Ox.

Определим основные геометрические и кинематические соотношения.

Вектор обобщенных скоростей системы

$$\dot{\mathbf{q}} = \left| \dot{x}_1\ \dot{y}_1\ \dot{\psi}_1\ \dot{x}_2\ \dot{y}_2\ \dot{\psi}_2 \right|^{\mathrm{T}}$$

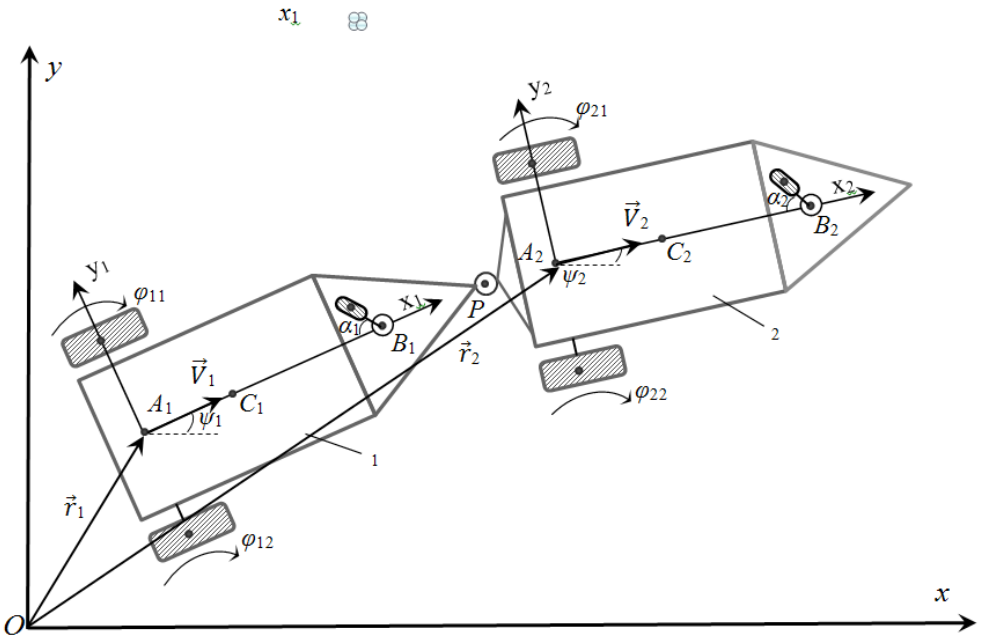


Рис. 1. Расчетная схема двухсекционного робота

содержит $\dot{x}_1, \dot{y}_1$ – проекции скорости V_1 точки A_1 на осях Ox и Oy соответственно и $\dot{\psi}_1 = \Omega_1$, где Ω_1 – проекция угловой скорости ω_1 платформы на ось Oz – для платформы 1 и аналогичные параметры: $\dot{x}_2, \dot{y}_2$, $\dot{\psi}_2 = \Omega_2$ – для платформы 2.

Неголономные связи определяют множество псевдоскоростей системы. В рассматриваемом случае элементами такого множества являются скорость V_1 точки A_1 и угловая скорость платформы 1 ω_1, а также скорость V_2 точки A_2 и угловая скорость платформы 2 ω_2.

Так как робот имеет четыре степени свободы, вектор его псевдоскоростей $\dot{\pi} = \left| V_1 \quad \Omega_1 \quad V_2 \quad \Omega_2 \right|^T$ включает четыре элемента: скорость $V_1 = \dot{x}_1 \cos\psi_1 + \dot{y}_1 \sin\psi_1$ точки A_1, угловую скорость платформы $\Omega_1 = \dot{\psi}_1$, скорость $V_2 = \dot{x}_2 \cos\psi_2 + \dot{y}_2 \sin\psi_2$ точки A_2, угловую скорость платформы $\Omega_2 = \dot{\psi}_2$.

Уравнения неголономных связей в виде проекций скоростей точек контакта ведущих колес на оси $A_2x_2y_2$ получим из условия отсутствия проскальзывания ведущих колес относительно поверхности:

$$\begin{cases} V_{D_{21}y_2} = V_{D_{22}y_2} = -\dot{x}_2 \sin\psi_2 + \dot{y}_2 \cos\psi_2 = 0, \\ V_{D_{22}x_2} = \dot{x}_2 \cos\psi_2 + \dot{y}_2 \sin\psi_2 + \dfrac{L_2}{2}\dot{\psi}_2 - R\dot{\phi}_{22} = 0, \\ V_{D_{21}x_2} = \dot{x}_2 \cos\psi_2 + \dot{y}_2 \sin\psi_2 - \dfrac{L_2}{2}\dot{\psi} - R\dot{\phi}_{21} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где R – радиус ведущих колес.

С учетом принятых допущений, геометрических связей и приведенных выше выражений кинематические соотношения принимают вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = V_1 \cos\psi_1, \\ \dot{y}_1 = V_1 \sin\psi_1, \\ \dot{\psi}_1 = \Omega_1, \\ \dot{\phi}_{11} = \dfrac{V_1 + \dfrac{L_1}{2}\Omega_1}{R}, \\ \dot{\phi}_{12} = \dfrac{V_1 - \dfrac{L_1}{2}\Omega_1}{R}, \\ \dot{x}_2 = V_2 \cos\psi_2, \\ \dot{y}_2 = V_2 \sin\psi_2, \\ \dot{\psi}_2 = \Omega_2, \\ \dot{\phi}_{21} = \dfrac{V_2 + \dfrac{L_2}{2}\Omega_2}{R}, \\ \dot{\phi}_{22} = \dfrac{V_2 - \dfrac{L_2}{2}\Omega_2}{R} \end{cases} . \quad (2)$$

Таким образом, составлена математическая модель движения робототехнической системы, состоящей из двух мобильных трехколесных платформ, соединенных цилиндрическим шарниром, по горизонтальной шероховатой плоскости.

Библиографический список

1. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В. Афонин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 23. № 2 (77).

2. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / Д. В. Афонин, Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев // Наука молодых – будущее России: сб. науч. статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск: ЗАО Университетская книга, 2017. Т. 5. С. 14–18.

3. Роботизированная платформа для перемещения самолетов по аэродрому / Д. В. Афонин, Е. Н. Политов, С. Ф. Яцун // Прогресс транспортных средств и систем-2018: Материалы международной научно-практической конференции / Под ред. И. А. Каляева, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько. 2018. С. 190–191.

4. *Ю. Г. Мартыненко*. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундамент. и приклад. математика, 11:8 (2005), 29–80; J. Math. Sci., 147:2 (2007), 6569–6606.

5. *Бартенев В. В.* Динамика управляемого движения мобильных колесных роботов по сигналу оптронной матрицы / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. № (2). С. 254–259.

6. Анализ методов управления движением мобильных колесных роботов по заданной траектории / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. трудов международной конференции. Курск: КурскГТУ, 2012. С. 144–152.

7. *Бартенев В. В.* Математическая модель управляемого движения мобильного колесного робота по шероховатой горизонтальной плоскости в вязкой среде / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун, I. Zeidis, K. Zimmermann // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. статей международной конференции. Курск: КурскГТУ, 2010. Ч. 2. С. 234–247.

8. *Мартыненко Ю. Г.* Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. № 8. С. 29–80.

9. *Павловский В. Е.* Исследование динамики движения цепочки робопоезд / В. Е. Павловский, Н. В. Петровская, В. В. Евграфов // Управляемое движение. Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. РАН, 2005. № 120. 31 с.

10. *Bartenev V.* Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix / V. Bartenev, S. Yatsun // Proceedings of the17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2010. P. 279–284.

УДК 621.865

С. Ф. Яцун*
доктор технических наук, профессор
Л. Ю. Ворочаева*
кандидат технических наук, доцент
С. И. Савин**
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
А. В. Мальчиков*
кандидат технических наук, доцент
П. А. Безмен*
кандидат технических наук, доцент
**Юго-Западный государственный университет*
***Университет Иннополис*

ДИАГРАММЫ ПРИЗЕМЛЕНИЯ КОЛЕСНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА С УПРАВЛЯЕМЫМ ПОЛЕТОМ

В статье рассматриваются варианты приземления колесного прыгающего робота (на передние и задние колеса одновременно, на передние колеса, на задние колеса) при прыжке с горизонтальной поверхности на наклонную. Управление ориентацией робота в полете происходит за счет вращения колес. В качестве варьируемых параметров для построения диаграмм приземления выступают скорость отрыва устройства от поверхности, угол наклона вектора этой скорости, угол наклона поверхности приземления и расстояние сшивки поверхностей отрыва и приземления.

Ключевые слова: *прыгающий колесный робот, управление ориентацией, система управления полетом, диаграммы приземления.*

S. F. Jatsun*
Dr. Sc. Tech., Professor
L. Y. Vorochaeva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. I. Savin**
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
A. V. Malchikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
P. A. Bezmen*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Southwest State University*
***Innopolis University*

LANDING DIAGRAMS OF A WHEELED JUMPING ROBOT WITH A CONTROLLED FLIGHT

The article discusses the landing variants of a wheeled jumping robot (on the front and rear wheels simultaneously, on the front wheels, on the rear wheels) on condition that a robot jumps from a horizontal surface to an inclined one. A robot orientation in flight is controlled by a rotation of robot wheels. The variable parameters of landing diagrams are the robot takeoff velocity, the robot takeoff velocity vector angle, the inclination angle of a landing surface, and the joining distance between a takeoff surface and a landing surface.

Keywords: *jumping wheeled robot, orientation control, flight control system, landing diagrams.*

Введение

Прыгающие роботы представляют собой особый класс робототехнических систем, которые перемещаются по неровной и пересеченной местности с периодическим отрывом от нее. Это повышает их маневренность и проходимость, а также позволяет преодолевать различные по формам и размерам препятствия, что делает

данную область робототехники актуальной и востребованной. Важным качеством прыгающих роботов является реализация ими такого приземления на поверхность, которое позволило бы совершить следующий прыжок. Для этого в одних конструкциях устройств используются те или иные механизмы, позволяющие роботу позиционироваться для следующего прыжка после приземления, а в других конструкциях предусмотрена возможность следующего прыжка независимо от ориентации робота после приземления.

Так, ряд прыгающих роботов изготавливаются симметричными, что позволяет им совершать последующий прыжок с любой поверхности корпуса, на которую они приземлились, за счет поворота внутри последнего разгонного модуля [1–6]. В [1–4] рассматривается прыгающий робот, который может приземляться на любую из четырех сторон корпуса, выполненного в форме куба, а в [5, 6] описан робот, приземление которого возможно на две поверхности корпуса, являющегося параллелепипедом.

Среди способов позиционирования после приземления можно выделить три наиболее распространенных: использование рычагов, изменение положения центра масс и расположение центра масс в нижней части устройства. Первый из них заключается в изменении конфигурации робота за счет использования специальных рычагов, приводимых в движение приводами. Рычаги опираются на поверхность и обеспечивают поворот корпуса робота до достижения требуемой ориентации [7–10]. Второй способ позиционирования описан в [11] и заключается в изменении положения центра масс устройства за счет изменения конфигурации звеньев внутри корпуса таким образом, чтобы корпус повернулся относительно поверхности и занял необходимое для следующего прыжка положение. Третий вариант позиционирования прыгающих роботов заключается в расположении центра масс всего устройства в нижней части корпуса, что позволяет аппарату занимать требуемое положение за счет «перекатывания» корпуса по поверхности. Такой способ возможен в том случае, если корпус выполнен в виде сферы, например в работе, описанной в [12].

В данной работе рассмотрен альтернативный вариант реализации требуемого приземления прыгающего робота одновременно на передние и задние колеса путем управления его ориентацией во время полета за счет вращения колес устройства относительно корпуса. Построены диаграммы, позволяющие выявить области варьируемых параметров как непосредственно устройства, так и поверхности приземления, для осуществления прыжка с необходимым вариантом приземления.

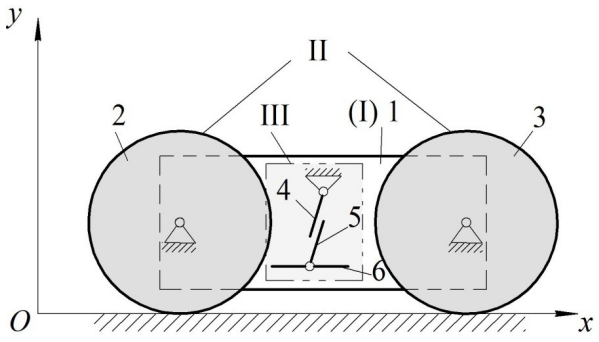


Рис. 1 Конструктивная схема колесного прыгающего робота

Описание устройства

Будем рассматривать прыгающего робота, состоящего из корпуса I, колесной платформы II и разгонного модуля III (рис. 1) [13, 14]. Робот предназначен для передвижения по пересеченной местности с различными препятствиями в целях мониторинга окружающей среды и имеет два режима перемещения: качение на колесах и прыжки. Первый из них используется для движения по достаточно ровной местности и для позиционирования робота в нужном направлении перед прыжком, а второй – для преодоления препятствий. Такое сочетание режимов движения позволяет повысить среднюю скорость перемещения робота, его маневренность и проходимость, а также расширяет сферы применения за счет большего числа поверхностей, по которым он может перемещаться.

Корпус (звено 1) робота имеет форму прямоугольника, в нем при помощи вращательных пар установлены четыре колеса (в плоской схеме рис. 1 показаны только два из них – звенья 2 и 3), вращение которых во время полета позволяет управлять ориентацией устройства. Разгонный модуль соединен с корпусом вращательной парой и состоит из трех звеньев 4–6: звенья 4 и 5 образуют поступательную пару, а звенья 5 и 6 – вращательную. Поступательная пара служит непосредственно для разгона робота, а звено 6 является его опорой при совершении отрыва от поверхности, повышает устойчивость устройства в момент толчка и позволяет уменьшить нежелательные вращательные составляющие скорости робота в момент начала полета.

Математическая модель полета прыгающего робота

Перейдем к рассмотрению расчетной схемы прыгающего робота, показанной на рис. 2. Движение робота происходит в вертикальной плоскости Oxy, прыжок осуществляется с абсолютно твердой шероховатой горизонтальной поверхности, параллельной оси Ox.

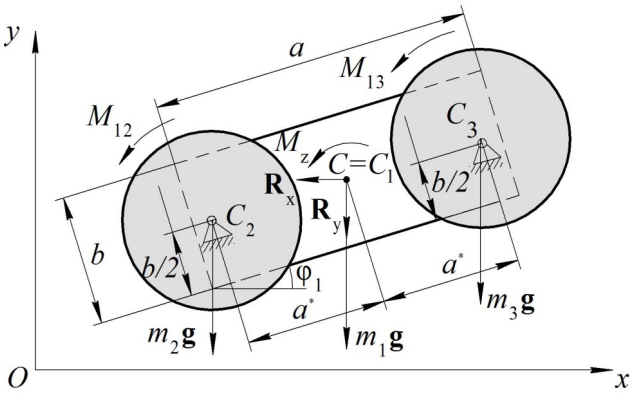


Рис. 2. Расчетная схема прыгающего робота

Корпус устройства имеет форму прямоугольника с размерами axb, его центр масс – точка C_1 – является и его центром симметрии. Колеса 2 и 3 имеют форму дисков радиусом R, оси вращения колес – точки C_2 и C_3 – удалены от точки C_1 на расстояние a^* вдоль стороны a корпуса. Центры масс колес совпадают с осями вращения. Будем считать, что звенья i = 1–3 обладают массами m_i, причем $m_2 = m_3$, а массы звеньев 4–6-разгонного модуля настолько малы по сравнению с массами корпуса и колес, что ими можно пренебречь.

Радиус-вектор центра масс корпуса записывается следующим образом:

$$\mathbf{r}_{C1} = (x_{C1}, y_{C1})^{\mathrm{T}},$$

где x_{C1}, y_{C1} – координаты точки C_1 в проекциях на осях Ox и Oy.

Радиус-векторы центров масс колес

$$\mathbf{r}_{Ci=2,3} = \mathbf{r}_{C1} + \mathbf{T}\boldsymbol{\rho}_{C1Ci},$$

где $\mathbf{T}$ – матрица поворота; $\boldsymbol{\rho}_{C1Ci}$ – относительные радиус-векторы точек C_2 и C_3 в системе координат, связанной со сторонами корпуса,

$$\boldsymbol{\rho}_{C1Ci} = ((-1)^{i+1}a^*, 0)^{\mathrm{T}}, \; i = 2,3.$$

Будем рассматривать движение прыгающего робота в полете с момента отрыва от горизонтальной поверхности ($\theta_1 = 0^0$) до момента приземления после прыжка на наклонную ($\theta_2 \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, где $\theta_{\min}$ и $\theta_{\max}$ – наименьшее и наибольшее значения угла наклона поверхности приземления) при расстоянии сшивки поверхностей, равном X (рис. 3). Радиус-вектор центра масс корпуса в начальной точке имеет координаты $\mathbf{r}_{C1} = (x^n_{C1}, y^n_{C1})^{\mathrm{T}}$, а в конечной – $\mathbf{r}_{C1} = (x^k_{C1}, y^k_{C1})^{\mathrm{T}}$. Вектор $\mathbf{q}$ обобщенных координат включает в себя координаты x_{C1}, y_{C1} центра масс корпуса, углы поворота корпуса ϕ_1 и колес ϕ_2, ϕ_3 относительно оси Ox:

$$\mathbf{q} = (x_{C1}, y_{C1}, \phi_1, \phi_2, \phi_3)^{\mathrm{T}}.$$

В момент отрыва робота от поверхности его центр масс точка C, совпадающая с точкой C_1, приобретает скорость υ_C, вектор которой направлен под углом ϕ_C к горизонту.

Во время полета на устройство действуют силы тяжести $m_i g$, приложенные к центрам масс звеньев, аэродинамические силы, приложенные в центре масс робота и вычисляемые по формулам [15]:

$$R_x = \mu_x \dot{x}_C; \; R_y = \mu_y \dot{y}_C,$$

где μ_x, μ_y – коэффициенты аэродинамического сопротивления вдоль осей Ox и Oy; $\dot{x}_C$, $\dot{y}_C$ – проекции скорости центра масс робота на координатные оси.

Помимо этого, во вращательных парах, соединяющих колеса и корпус, действуют моменты M_{12} и M_{13}, позволяющие управлять вращением колес.

Систему дифференциальных уравнений движения устройства запишем с использованием уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_n}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_n} = Q_n,$$

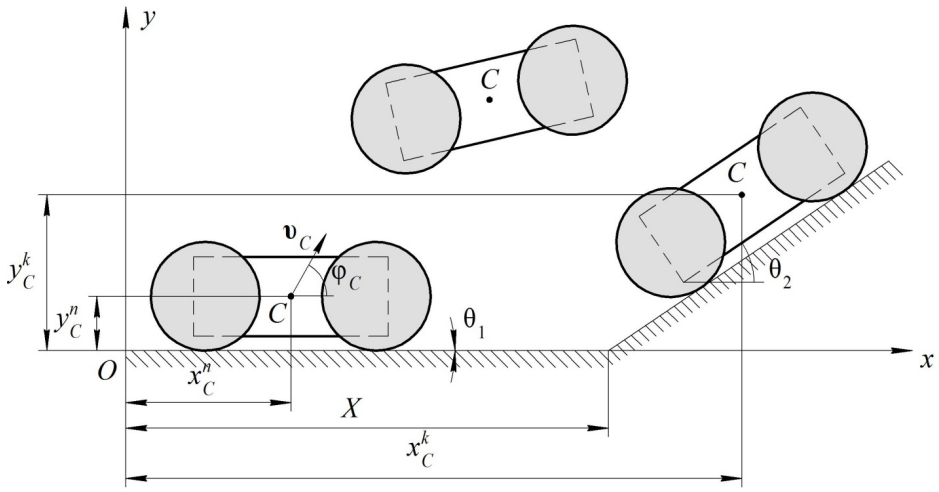


Рис. 3. Схема полета робота

где T – кинетическая энергия системы; q_n, $n = 1–5$ – обобщенная координата; Q_n – обобщенная сила по координате q_n.

Кинетическая энергия системы определяется по формуле:

$$T = \sum_{i=1}^{3} T_i ,$$

где $i = 1–3$ – звенья устройства.

Кинетические энергии звеньев записываются в виде:

$$T_i = m_i \frac{\dot{x}_{Ci}^2 + \dot{y}_{Ci}^2}{2} + \frac{J_i \dot{\phi}_i^2}{2} ,$$

где $J_1 = \frac{m_1}{4}(a^2 + b^2)$; $J_{i=2,3} = \frac{m_i R_i^2}{2}$ – центральные моменты инерции звеньев.

Систему дифференциальных уравнений движения корпуса колесного прыгающего робота можно представить следующим образом:

$$\ddot{x}_{C1} \sum_{i=1}^{3} m_i + \ddot{\phi}_1 a^* \sin\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} +$$

$$+ \dot{\phi}_1^2 a^* \cos\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} = -R_x ;$$

$$\ddot{y}_{C1} \sum_{i=1}^{3} m_i - \ddot{\phi}_1 a^* \cos\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} +$$

$$+ \dot{\phi}_1^2 a^* \sin\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} = -R_y - Mg ;$$

$$\ddot{\phi}_1 [J_1 + \sum_{i=2}^{3} m_i (a^*)^2] + \ddot{x}_{C1} a^* \sin\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} -$$

$$- \ddot{y}_{C1} a^* \cos\phi_1 \sum_{i=2}^{3} m_i (-1)^{i+1} = -M_Z - g \sum_{i=2}^{3} m_i x_{CiC} .$$

Система управления прыгающим роботом в полете

Система управления роботом должна обеспечивать такие законы вращения колес устройства в полете, чтобы приземление происходило одновременно на передние и задние колеса. Структурная схема системы управления приведена на рис. 4.

Система управления состоит из блока управления и прыгающего робота, являющегося объектом управления. Блок управления включает в себя следующие модули: задающих воздействий, формирования угла поворота, расчета угловых скоростей, двух компараторов и регулятора. Модуль задающих воздействий передает в модуль формирования угла поворота корпуса устройства следующие сигналы: значение скорости отрыва робота от поверхности υ_C, угол ϕ_C наклона вектора скорости к горизонту, значения углов наклона поверхностей отрыва θ_1 и приземления θ_2. Исходя из значений углов θ_1 и θ_2 определяется величина угла ϕ_1^{**}, на которую за время полета должен повернуться корпус устройства:

$$\phi_1^{**} = \theta_2 - \theta_1 .$$

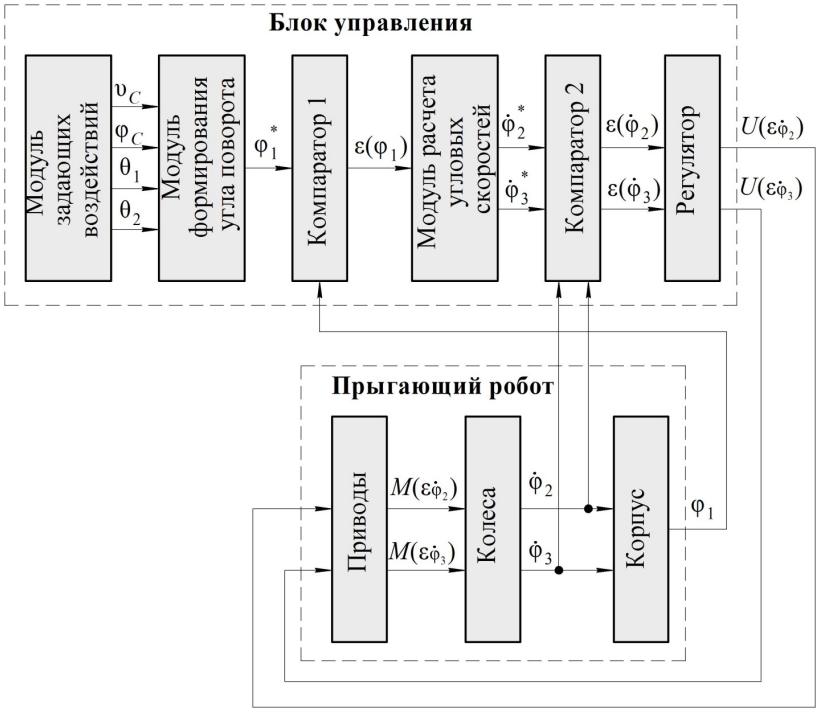


Рис. 4. Структурная схема системы управления роботом

Значения всех четырех задающих воздействий используются для вычисления времени полета T_{fl}.

Знание величин ϕ_1^{**} и T_{fl} позволяет сформировать требуемый закон изменения угла поворота корпуса робота в полете от времени:

$$\phi_1^{*} = f(\phi_1^{**}, T_{fl}).$$

Соответствующий сигнал поступает из модуля формирования угла поворота на компаратор 1, где происходит сравнение требуемой величины угла ϕ_1^{*} с его фактическим значением ϕ_1 и формирование ошибки рассогласования:

$$\varepsilon(\phi_1) = \phi_1^{*} - \phi_1.$$

Данная ошибка подается на модуль расчета угловых скоростей вращения колес, где формируются требуемые законы их изменения

$$\dot{\phi}_2^{*} = \dot{\phi}_3^{*} = f(\varepsilon(\phi_1)),$$

затем поступающие на компаратор 2, на выходе которого формируются ошибки рассогласования требуемых и фактических значений угловых скоростей вращения колес:

$$\varepsilon(\dot{\phi}_i) = \dot{\phi}_i^{*} - \dot{\phi}_i,\ i = 2, 3.$$

Данные ошибки передаются в линейный квадратичный регулятор (ЛКР) [16], формирующий законы напряжений $U(\varepsilon_{\dot{\phi}i})$, подаваемых на приводы, обеспечивающих вращение колес устройства

$$U(\varepsilon_{\dot{\phi}i}) = f(\varepsilon_{\dot{\phi}i}).$$

Приводы генерируют моменты $M(\varepsilon_{\dot{\phi}i})$, которые прикладываются к колесам робота и обеспечивают их вращение

$$M(\varepsilon_{\dot{\phi}i}) = f(U(\varepsilon_{\dot{\phi}i})).$$

Фактические угловые скорости вращения колес измеряются соответствующими датчиками (на рис. 4 не показаны) и поступают в компаратор 2. Вращение колес устройства приводит к повороту его корпуса в противоположную сторону на фактический угол ϕ_1, также измеряемый датчиком (не показан на рис. 4), значение которого передается в компаратор 1. Вопросы обработки сенсорной информации, учета свойств датчиков и динамики устройства для получения достаточно точной информации в цепи обратной связи, приемлемой для использования ЛКР и сходных регуляторов, не рассматривались в этой работе, но могут быть найдены в [17–18].

Результаты численного моделирования

Рассмотрим влияние параметров отрыва робота от поверхности (скорости υ_C и угла ϕ_C), а также параметров поверхности приземления (расстояния X и угла наклона θ_2) на различные варианты приземления. Желаемым вариантом является одновременное приземление устройства на передние и задние колеса (на последующих графиках область 1). Но ввиду малого времени прыжка, недостаточного для поворота робота в полете на заданный угол $\phi_1^{**} = \theta_2$, возможно приземление на передние колеса при $\theta_2 > 0$ (область 2) и на задние колеса при $\theta_2 < 0$ (область 3).

Пусть в начальный момент прыжка задние колеса робота упираются в оси системы координат (рис. 5):

$$x_{C2}^{n} = R,\ y_{C2}^{n} = R;$$

$$x_{C}^{n} = R + a^{*},\ y_{C}^{n} = R,$$

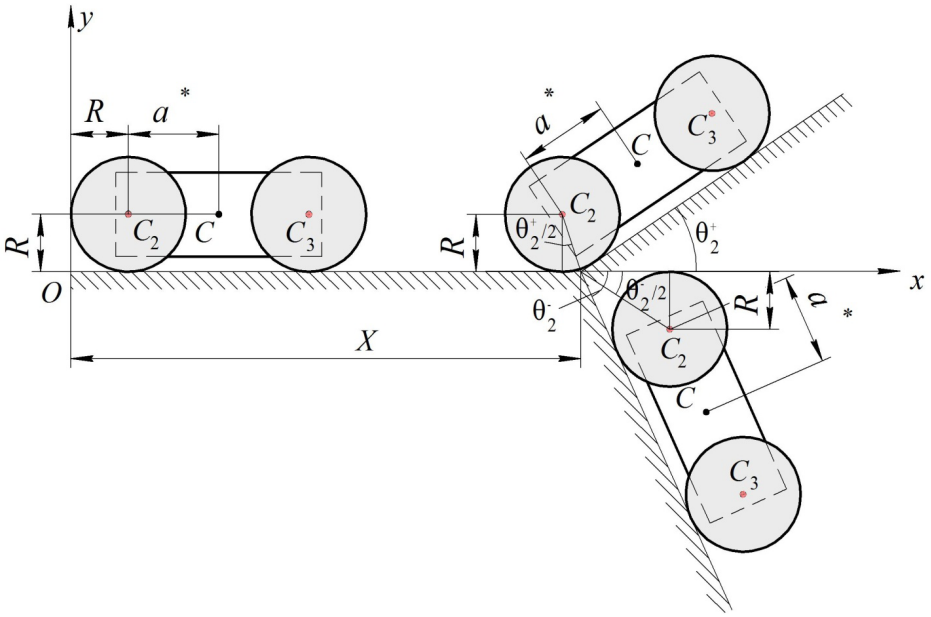


Рис. 5. Положения робота в моменты начала и завершения прыжка $\theta_2^{+} - \theta_2 \geq 0$, $\theta_2^{-} - \theta_2 < 0$

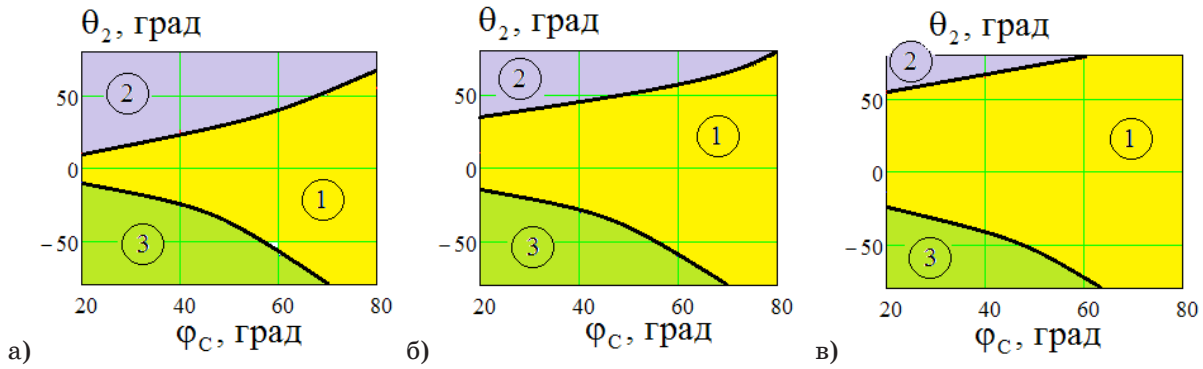


Рис. 6. Диаграммы приземления $\theta_2(\phi_C)$ *: а – X=0,5 м; б – X =1 м; в – X=1,5 м; 1 – на передние и задние колеса; 2 – на передние колеса; 3 – на задние колеса*

а в момент завершения прыжка задние колеса взаимодействуют с поверхностями разгона и приземления (рис. 5):

$$x_{C2}^k = \begin{cases} X - Rtg\dfrac{\theta_2}{2} \text{ если } \theta_2 \geq 0 \\ X + Rctg\dfrac{\theta_2}{2} \text{ если } \theta_2 < 0 \end{cases};$$

$$y_{C2}^k = R;$$

$$x_C^k = \begin{cases} X - Rtg\dfrac{\theta_2}{2} + a^* \cos\theta_2 \text{ если } \theta_2 \geq 0 \\ X + Rctg\dfrac{\theta_2}{2} + a^* \cos\theta_2 \text{ если } \theta_2 < 0 \end{cases};$$

$$y_C^k = \begin{cases} R + a^* \sin\theta_2 \text{ если } \theta_2 \geq 0 \\ -R + a^* \sin\theta_2 \text{ если } \theta_2 < 0 \end{cases}.$$

На рис. 6 показаны диаграммы приземления прыгающего робота в зависимости от углов наклона вектора скорости отрыва ϕ_C и поверхности приземления θ_2, на которых выделены три ранее описанные области. По данным диаграммам видно, что по мере увеличения угла ϕ_C расширяется область 1, в которой приземление происходит на передние и задние колеса одновременно, то есть при большем диапазоне углов θ_2 будет происходить желаемый вариант

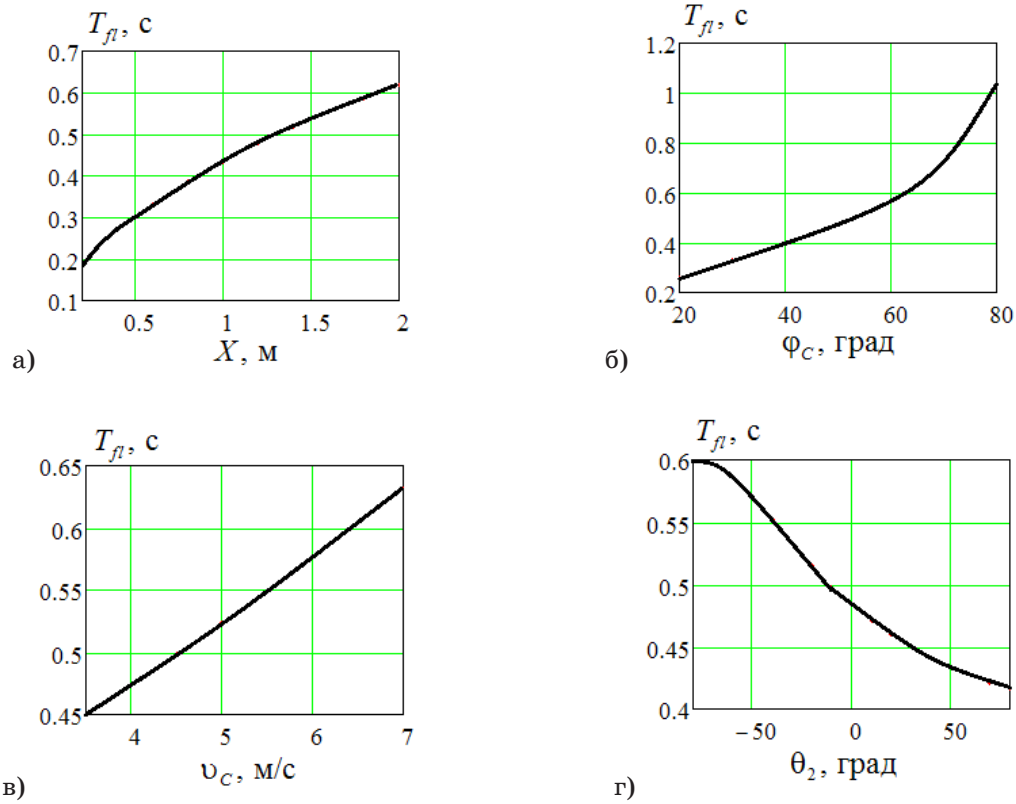


Рис. 7. Графики зависимостей:
а – $T_{fl}(X)$ *при* $\phi_C = 45^0, \theta_2 = 30^0$ *; б –* $T_{fl}(\phi_C)$ *при* $X = 1$ *м,* $\theta_2 = 30^0$ *;*
в – $T_{fl}(\upsilon_C)$ *при* $\phi_C = 45^0, X = 1$ *м* $\theta_2 = 30^0$ *; г –* $T_{fl}(\theta_2)$ *при* $\phi_C = 45^0, X = 1$ *м*

приземления. Причем можно заметить, что при малых углах ϕ_C в области 1 шире диапазон положительных углов θ_2, а с возрастанием угла ϕ_C, наоборот, шире становится диапазон отрицательных углов θ_2. Также видно, что с увеличением расстояния X сшивки поверхностей область 1 расширяется.

Это обусловлено возрастанием времени полета при увеличении параметров X (рис. 7, а) и ϕ_C (рис. 7, б), причем в обоих случаях характер возрастания криволинейный, но в первом случае выпуклость кривой направлена вверх, а во втором – вниз.

Увеличение скорости отрыва робота от поверхности в момент начала прыжка при неизменных параметрах ϕ_C и X приводит к тому, что в момент приземления робота его задние колеса не будут контактировать с поверхностью отрыва, как было показано на рис. 5, а будут взаимодействовать только с поверхностью приземления. Соответствующие диаграммы приземления показаны на рис. 8. По ним видно, что границы между областями 1 и 2, 1 и 3 представляют собой кривые, выпуклости которых направлены от области 1. При этом увеличение значения υ_C приводит к расширению диапазона углов θ_2 в области 1, что обусловлено возрастанием времени полета пропорционально скорости отрыва (рис. 7, в).

Следует отметить, что на характер диаграмм приземления рис. 6 и 8 оказывает влияние зависимость времени полета от угла θ_2 наклона поверхности приземления, представленная на рис. 7, г. Из нее следует, что время полета убывает с ростом угла θ_2.

Заметим, что приведенные на рис. 6 и 8 диаграммы построены без учета ограничений моментов приводов, осуществляющих вращение колес. Введение указанного ограничения приводит к сужению области 1 приземления на передние и задние колеса. Это проиллюстрировано на рис. 9, где получены три варианта областей приземления при трех ограничивающих значениях моментов приводов:

$$M^* = \max(|M_{\max}|, |M_{\min}|) = 5, 7, 10 \text{ Нм}.$$

На данном рисунке горизонтальные и вертикальные утолщенные линии позволяют понять принцип построения областей ограничивающих моментов. Точки на пересечениях этих линий с кривыми наибольших и наименьших значе-

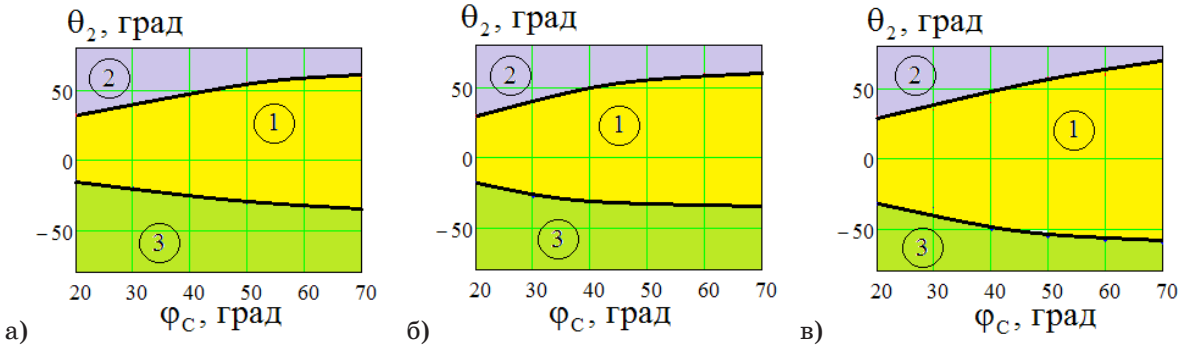


Рис. 8. Диаграммы приземления $\theta_2(\phi_C)$ при $X = 1$ м: а – $\upsilon_C = 4$ м/с; б – $\upsilon_C = 5$ м/с; в – $\upsilon_C = 6$ м/с; 1 – на передние и задние колеса; 2 – на передние колеса; 3 – на задние колеса

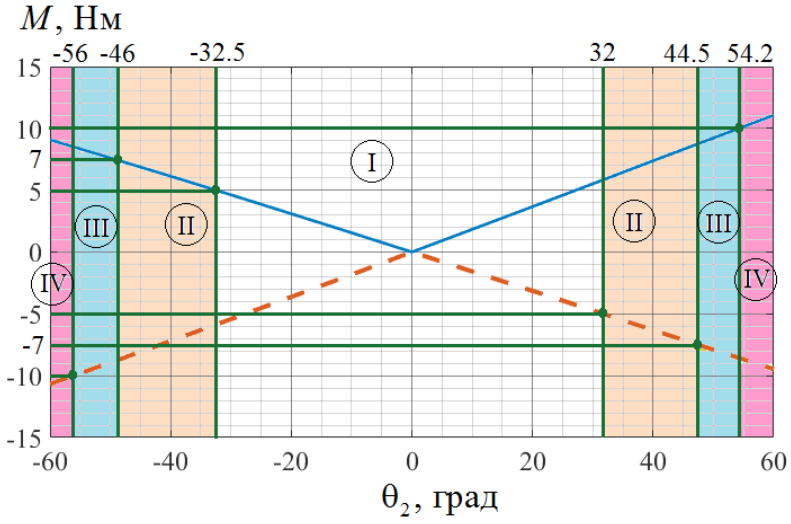


Рис. 9. Графики зависимостей областей приземления — $M_{\max}(\theta_2)$, — – $M_{\min}(\theta_2)$ при $X = 1$ м, $\phi_C = 60^0$

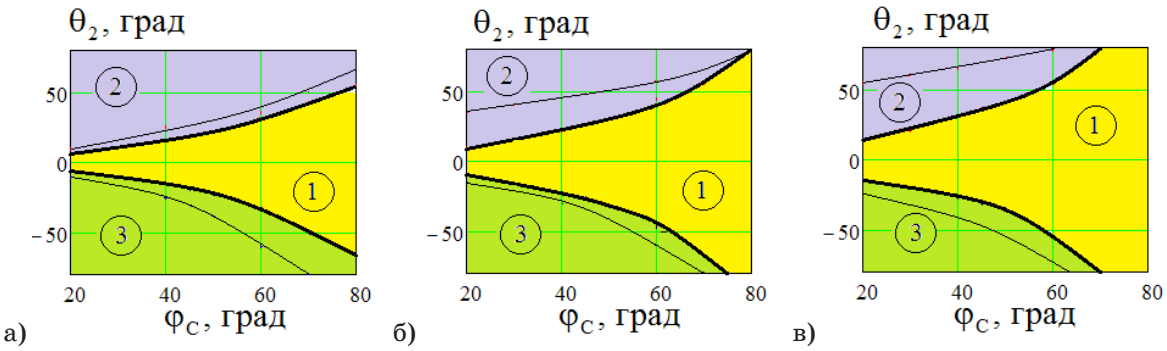


Рис. 10. Диаграммы приземления $\theta_2(\phi_C)$ *при* $X=1$ *м: а –* $|M^*|=5$ *Нм; б –* $|M^*|=5$ *Нм; в –* $|M^*|=5$ *Нм; 1 – на передние и задние колеса; 2 – на передние колеса; 3 – на задние колеса*

ний моментов вращения приводов колес являются точками граничных моментов.

На рис. 9 выделены четыре области, обозначенные римскими цифрами и являющиеся областями, ограниченными наибольшими и наименьшими значениями моментов приводов колес.

Варианты приземления прыгающего робота (области 1, 2 и 3) и данные области ограничения момента соотносятся между собой следующим образом:

$$1=\begin{cases}\text{I если } M^*=5\text{ Нм}\\ \text{I}+\text{II если } M^*=7\text{ Нм}\\ \text{I}+\text{II}+\text{III если } M^*=10\text{ Нм}\end{cases};$$

$$2=\begin{cases}\text{II}+\text{III}+\text{IV}\ \text{ если } (M^*=5\text{ Нм})\wedge(\theta_2\geq 0)\\ \text{III}+\text{IV},\ \text{если } (M^*=7\text{ Нм})\wedge(\theta_2\geq 0)\\ \text{IV},\ \text{если } (M^*=10\text{ Нм})\wedge(\theta_2\geq 0)\end{cases};$$

$$3=\begin{cases}\text{II}+\text{III}+\text{IV}\ \text{ если } (M^*=5\text{ Нм})\wedge(\theta_2<0)\\ \text{III}+\text{IV},\ \text{если } (M^*=7\text{ Нм})\wedge(\theta_2<0)\\ \text{IV},\ \text{если } (M^*=10\text{ Нм})\wedge(\theta_2<0)\end{cases}.$$

Тогда диаграммы приземления, приведенные на рис. 6, могут быть перестроены с учетом ограничений на моменты вращения колес, как показано на рис. 10. На данных графиках тонкими линиями показаны границы между областями 1 и 2, 1 и 3 без учета ограничения моментов.

По диаграммам видно, что их характер не изменился, область 1 расширяется по мере увеличения угла ϕ_C по некоторым кривым, выпуклости которых направлены к области 1, но количественные значения диапазона угла наклона поверхности уменьшились.

Заключение

Работа посвящена исследованию вариантов приземления прыгающего колесного робота при совершении им прыжка с горизонтальной поверхности на наклонную. Желаемым вариантом приземления является одновременная посадка на передние и задние колеса, что достигается путем управления ориентацией устройства в полете за счет вращения колес. В статье предложена математическая модель движения робота в полете, а также система управления его ориентацией, позволяющая добиваться желаемого варианта приземления. Численным методом проведено определение диапазонов допустимых значений параметров отрыва робота от поверхности и параметров поверхности приземления для осуществления желаемого варианта приземления. Установлено, что по мере увеличения скорости отрыва робота от поверхности, угла наклона вектора этой скорости к горизонту, расстояния сшивки поверхностей отрыва и приземления, а также моментов приводов вращения колес диапазон угла наклона поверхности приземления, при котором посадка происходит на передние и задние колеса одновременно, расширяется.

Работа поддержана РФФИ, проект № 18-31-00075.

Библиографический список

1. *Волкова Л. Ю., Яцун С. Ф.* Изучение влияния положения точки закрепления ноги прыгающего робота в корпусе на характер движения устройства // Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 2. С. 327–342.

2. Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности / С. Ф. Яцун, О. Г. Локтионова, Л. Ю. Волкова, А. В. Ворочаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 5. С. 109–118.

3. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата / С. Ф. Яцун, Л. Ю. Волкова, А. В. Ворочаев // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 24 (127). С. 86–92.

4. Investigation into the influence of the foot attachment point in the body on the four-link robot jump characteristics / S. Jatsun, O. Loktionova,

L. Volkova, A. Yatsun // Mobile service robotics: proc. of the 17th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (Clawar 2014). 2014. P. 101–108.

5. Urban hopper / J. Salton, S. Buerger, L. Marron et al. // Unmanned Systems Technology XII. International Society for Optics and Photonics. 2010. Vol. 7692. P. 76920Z.

6. *Ackerman E.* Boston dynamics sand flea robot demonstrates astonishing jumping skills // Proc. of the IEEE Spectrum. 2012.

7. *Burdick J., Fiorini P.* Minimalist jumping robot for celestial exploration // The Intern. J. of Robotics Research. 2003. Vol. 22. N. 7. P. 653–674.

8. *Stoeter S., Papanikolopoulos N.* Kinematic Motion Model for Jumping Scout Robots // Proc. of the IEEE Transactions on Robotics and Automation. Orlando, 2006. Vol. 22. N. 2. P. 398–403.

9. *Stoeter S., Rybski P., Papanikolopoulos N.* Autonomous stair-hopping with scout robots // Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Stanford, 2002. Vol. 1. P. 721–726.

10. Design of a higher jumping rescue robot with the optimized pneumatic drive / *H. Tsukagoshi, M. Sasaki, A. Kitagawa, T. Tanaka* // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Barcelona, 2005. P. 1276–1283.

11. Weiss P. Hop… hop… hopbots: designers of small, mobile robots take cues from grasshoppers and frogs // Science News. 2001. P. 159–188.

12. Steerable miniature jumping robot / M. Kovac, M. Schlegel, J.-C. Zufferey, D. Floreano // Autonomous Robots. 2010. Vol. 28. P. 295–306.

13. *Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И.* Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // Известия ЮЗГУ. 2018. Т. 22. № 1 (76). С. 76–84.

14. *Ворочаева Л. Ю., Савин С. И.* Исследование влияния на режимы разгона прыгающего робота параметров траектории его центра масс // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2018. № 3 (45). С. 22–30.

15. *Никитин Г. А., Баканов Е. А.* Основы авиации: учебник для вузов гражданской авиации. М.: Транспорт, 1984. 261 с.

16. *Posa M., Cantu C., Tedrake R.* Direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact // Intern. J. of Robotics Research. 2014. Vol. 33. № 1. P. 69–81.

17. *Jetto L., Longhi S., Venturini G.* Development and experimental validation of an adaptive extended Kalman filter for the localization of mobile robots // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1999. Vol. 15. № 2. P. 219–229.

18. *Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L.* State observer design for a walking in-pipe robot // In MATEC Web of Conf. EDP Sciences. 2018. Vol. 161. P. 03012.

УДК 004.832.2

Г. С. Армашова-Тельник*
кандидат экономических наук, доцент
М. В. Канавцев*
кандидат экономических наук, доцент
В. А. Сердитов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УПРАВЛЕНИЕ КАДРОВЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ НА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К ШЕСТОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ УКЛАДУ

В статье описывается кадровый потенциал высокотехнологичных предприятий России в условиях шестого технологического уклада. Приводятся данные о значительном разрыве в производительности труда между высокотехнологичным предприятиями и нефтедобывающими компаниями, не относящимися к таковым. Делается обобщенный анализ шести международных источников, определяющих направленность и структуру 79 «компетенций будущего». Даются выводы по компетенциям, которые необходимо развивать в новую эпоху, и рекомендации руководителям высокотехнологичных предприятий обратить внимание на необходимость подготовки и переподготовки кадров с необходимыми компетенциями.

Ключевые слова: *кадровый потенциал, управление, высокотехнологичные предприятия, шестой технологический уклад.*

G. S. Armashova-Telnik*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
M. V. Kanavcev*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
V. A. Serditov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MANAGEMENT OF PERSONNEL POTENTIAL AT THE HI-TECH ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF TRANSITION TO THE SIXTH TECHNOLOGICAL WAY

In article the personnel capacity of the hi-tech enterprises of Russia in the conditions of the sixth technological way is described. Data on a significant gap are provided in labor productivity, between hi-tech the enterprises and the oil-extracting companies which are not relating to those. The generalized analysis of six international sources defining orientation and structure 79 of "competences of the future" is provided. Conclusions on competences which heads of the hi-tech enterprises need to develop during a new era and recommendations to pay attention to need of preparation and retraining of personnel with necessary competences are given.

Keywords: *personnel potential, management, hi-tech enterprises, the sixth technological way*

Стремительное развитие в развитых странах цифровой экономики и следующая за ней цифровизация производств многое меняет в принципах построения информационных и логистических связей, кадровой политики, выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Высокотехнологичное предприятие – это предприятие, имеющее высокую компетентность персонала и выпускающее не менее 50% высокотехнологичной продукции. Высокотехнологичная продукция – это продукция пятого и более высоких технологических укладов. Здесь будет уместно заметить, что суждения о высокотехнологичности услуг также базируются на названных выше принципах и поэтому, например, услуги сервисного сопровождения высокотехнологичной техники не могут быть другого уровня, чем сама техника.

Появление высоких технологий оказало значительное влияние на все сферы общества: материально-производственную, социальную, духовную и политическую. Изменениям подвергаются и профессиональная среда, и повседневная жизнь современного человека развитого общества. Все это, в свою очередь, оказывает значительное влияние на функционирование современного рынка труда, формирует новые требования к конкурентоспособным специалистам, их компетентности. Последняя относится не только к тем специалистам, которые трудятся непосредственно в высокотехнологичных отраслях экономики и занимаются разработкой высоких технологий, но и к тем, которые готовят кадры для высокотехнологичного производства [1].

Высокотехнологичный сектор вносит значимый вклад в российскую экономику (около 22,3% ВВП, 36,6% числа работников). К высокотехнологичной продукции с учетом приоритетных направлений модернизации российской экономики относится промышленная продукция, соответствующая 64 товарным кодам товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности Евразийского экономического союза (ТН ВЭД ЕАЭС). В частности, принадлежность продукции к одной из следующих агрегированных групп:

– фармацевтическая продукция;

– ядерные реакторы, котлы, оборудование и механические устройства;

– электрические машины и оборудование, их части;

– средства наземного транспорта, кроме железнодорожного;

– летательные и космические аппараты, их части;

– суда, лодки и плавучие конструкции;

– инструменты и аппараты оптические, измерительные, контрольные, их части.

Основу российского высокотехнологичного экспорта формирует энергетическое оборудование: ядерные реакторы, тепловыделяющие элементы для АЭС (ТВЭЛ), реактивные и турбореактивные двигатели, газовые турбины [2].

Согласно исследованию «Производительность труда крупнейших промышленных компаний России по численности сотрудников за 2017 год» производительность труда Госкорпорации «Росатом» с численностью работников 247 000 человек составляет 3,91 млн руб. на человека в год. Производительность труда Группы ЛУКОЙЛ с численность работников 103 600 человек составляет 57,3 млн руб. на человека в год, АНК «Башнефть» 81,29 млн руб. на человека в год.

Это говорит о явно преобладающих в российской экономике сырьевой модели и значительном потенциале повышения производительности труда [3].

Трансформационные процессы, происходящие в современной промышленности, в том числе российской, связанны с переходом в шестой технологический уклад. Этот уклад предполагает возрастание скорости и объема данных и информации, воздействующих на систему «человек – машина – среда», цифровизацию, пронизывающую все сферы жизнедеятельности человека, изменение в принципах построения информационных и логистических связей, кадровой политики, выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Каждый уклад – это целостное и устойчивое образование, в рамках которого происходит полный макропроизводственный цикл, состоящий из добычи и получения первичных ресурсов, всех стадий их переработки и выпуска набора конечных продуктов, удовлетворяющих соответствующему типу общественного потребления [4].

Переход развитых стран к шестому технологическому укладу и сопутствующая этому переходу цифровизация производств многое меняет в принципах построения информационных и логистических связей, кадровой политики, выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Технологические уклады – это группы технологических совокупностей, выделяемые в технологической структуре экономики, связанные друг с другом однотипными технологическими цепями и образующие воспроизводящиеся целостности. Объективно существующему пятому и начинающемуся шестому технологическому укладу присуще увеличение объема информации и усложнение процессов, происходящих в мире, которое обусловливает повышение требований к качеству управленческой деятельности организациями. Основу любой управленческой деятельности составляют решения, которые принимаются единоличными или коллегиальными органами управления, направленные на достижение определенных задач, стоящих перед организацией.

На современном этапе доля инновационной продукции в России в общем выпуске составляет всего 8–9%; инвестиции в нематериальные активы в России в 3–10 раз ниже, чем в ведущих государствах; доля экспорта российской высокотехнологичной продукции в мировом объеме экспорта составляет около 0,4%.

По словам главы Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК) Сергея Плуготаренко, «отечественной IT-отрасли не хватает 400 тыс. специалистов», Глава Регионального общественного центра интернет-тех-

нологий (РОЦИТ, защищает интересы интернет-сообщества) Сергей Гребенников заявил, что «через 5–7 лет не будет ни одной профессии, где не нужно знание технологий и умение обращаться с роботом» [5].

Согласно п. 2.8.3 (Программы «Цифровая экономика») к IV кварталу 2020 года компании цифровой экономики законодательно имеют возможность опираться исключительно на модель компетенций при принятии кадровых решений, до этого момента необходимо объяснить собственникам, управляющим и работникам высокотехнологичных производств о принципах функционирования «цифровой экономики» и необходимости повышения своих компетенций до нормативных требований, на что и направлена практическая часть исследования.

Стратегической целью исследования, можно обозначить: повышение конкурентоспособности производственных компаний Российской Федерации за счет создания эффективной системы совершенствования кадровых и, как следствие, технологических решений.

Среди базовых задач исследования необходимо выделить следующие:

1. Анализ системы переподготовки и повышения квалификации кадров в промышленности в условиях цифровой экономики.

2. Анализ технологических решений на промышленных предприятиях в России и за рубежом и степени их адаптации к новым условиям шестого технологического уклада (в условиях цифровизации).

3. Разработка подходов к адаптации кадровой политики российской промышленности к цифровой экономике.

Программа развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года, рассматриваются вопросы, во многом связанные с экономическими или технологическими преобразованиями на производственных предприятиях, без учета преобразований в кадровой политике.

Наиболее полно заявляемая проблематика описана в научном докладе С. Ю. Глазьева на научном совете РАН по комплексным проблемам евразийской экономической интеграции, конкурентоспособности и устойчивому развитию Российской академии наук 29 января 2013 года «Стратегия опережающего развития и интеграции на основе становления шестого технологического уклада», опубликованном в журнале «Партнерство цивилизаций» № 1–2/2013. Но в этом докладе речь идет о институциональной системе подготовки кадров, вопрос же, связанный с переподготовкой и повышением квалификации кадров в промышленности в условиях цифровой экономики не рассматривается.

В последнее время в бизнес-сообществе производителей и предпринимателей активно обсуждают модели требуемых на предприятиях «компетенций будущего». Приоритетность и популярность данной тематики продолжает расти и, как следствие, появляются вопросы, связанные с научной обоснованностью и системностью предлагаемых на рынке решений. С другой стороны, способные ли имеющиеся решения с минимальными потерями помочь адаптироваться к условиям шестого технологического уклада [6].

Среди основных трудностей при планировании и реализации процесса переподготовки кадров мы можем выявить следующие:

– сложность в проведении исследований, выявляющих связь между «компетенциями будущего» и возможными результатами труда, переподготовленных специалистов;

– высокий уровень неопределенности в отношении качества и характеристик конкретного рабочего места;

– возрастающее воздействие информационно-технологического фактора непосредственно на персонал и на рабочее пространство;

– ориентация экономики на сырьевую модель.

Таблица 1

Обобщенные компетенции

Количество видов компетенций в рамках обобщенной компетенции				Упоминаемость компетенции в источниках
№	Обобщенные компетенции	Общее количество	%	Количество источников
1	Мышление и решение задач	17	21,5	6
2	Цифровые знания и навыки	15	19	6
3	Взаимодействие и сотрудничество	13	17	6
4	Междисциплинарность и межкультурность	8	10	6
5	Управление и самоменеджмент	7	8,5	4
6	Обучаемость	7	8,5	4
7	Креативность	5	6,5	3
8	Этичность	4	5	2
9	Результативность	3	4	2

Анализ шести международных источников, определяющих направленность и структуру «компетенций будущего», позволил сделать ряд обобщений (табл.1).

Обобщение 79 компетенций в единый табличный вид позволило провести их приоретизацию по количеству упоминаний в источниках и проценту от общего количества заявленных компетенций.

«Мышление и решение задач», «Цифровые знания и навыки», «Взаимодействие и сотрудничество», «Междисциплинарность и межкультурность», данные 4 обобщенных категорий упоминаются во всех 6 источниках и составляют более 65% всех компетенций, необходимых по мнению экспертных сообществ на предприятиях будущего в эпоху шесстого технологического уклада. Среди наиболее упоминаемых в этих группах можно выделить следующие компетенции:

– системное мышление;

– способность сотрудничать;

– эмоциональный интеллект;

– критическое мышление (умение корректно оценивать и анализировать факты и утверждения, принимать решения о том, чему доверять и что делать);

– программирование;

– знание основ робототехники;

– умение понимать и использовать новые технологии;

– машинное обучение;

– мультидисциплинарность;

– мультикультурные многоязыковые среды.

Обучение потенциальных кадров и персонала этим компетенциям является важнейшей задачей руководителей ВУЗов и высокотехнологичных предприятий для формирования задела по развитию шестого технологического уклада.

В связи с увеличивающимся разрывом большинства ВУЗов России с предприятиями возможным выходом видится создание совместных образовательных программ, открытие базовых кафедр предприятия в ВУЗе и создание корпоративных университетов.

При этом важно отметить, что попытки полностью переложить бремя финансовой ответственности по подготовке таких кадров на предприятия ни к чему хорошему не приведет. Выходом является создание механизмов государственного финансирования, субсидирования или снижения налоговой нагрузки на предприятия, занимающиеся такой работой.

Понимание руководителями технологических предприятий роли своевременного совершенствования навыков специалиста в цифровой экономике дает возможность выстраивать устойчивость предприятия на рынке. Важный момент – это понимание технологических вызовов, в частности к заводской инфраструктуре; необходимость формирования цифровых навыков. Большое внимание необходимо уделять разработке корпоративных программ по формированию фундаментальных, базовых и прикладных навыков, а также построению гибких образовательных стратегий посредством разработки карт развития компетенций специалистов.

В связи с изменением спроса на специалистов, необходимых для создания перспективной инфраструктуры для развития цифровой экономики, можно сделать вывод о совокупном увеличении спроса на них, не смотря на массовые сокращения рутинных рабочих мест, при условии развития цифровой экономики на отечественной интеллектуально-технологической базе.

Библиографический список

1. *Комаров Н. М., Иванова Н. В., Сафронов В. М.* Влияние высокотехнологичности на формирование требований к профессиональной компетентности специалистов // Науковедение. 2012. № 4. С. 4.

2. Национальный доклад «Высокотехнологичный бизнес в регионах России» / *В. А. Баринова, С. П. Земцов, Р. И. Семенова, И. В. Федотов* / РАНХиГС и АИРР; Группа «Интерфакс», 2017. С. 5–38.

3. Деловой портал «Управление производством». Всероссийская премия «Производительность труда-2018». С. 123. URL: http://www.up-pro.ru/imgs/specprojects/lidery-promyshlennosti/2018/Productivity_2018.pdf (дата обращения: 28.02.2019).

4. URL: http://www.glazev.ru/articles/6-jekonomika/54923-velikaja-tsifrovaja-revoljutsija-vyzovy-i-perspektivy-dlja-jekonomiki-i-veka (дата обращения: 08.01.2018).

5. URL: https://iz.ru/615970/rossiiane-smogut-besplatno-pereobuchitsia-v-intern
ete (дата обращения: 18.02.2019).

6. *Армашова-Тельник Г. С., Канавцев М. В., Сердитов В. А.* Новые знания и компетенции, востребованные на технологических предприятия // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 217–221.

УДК 338.1

Г. С. Армашова-Тельник*
кандидат экономических наук, доцент
А. Н. Зубкова*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

В статье рассматриваются альтернативные варианты оценки эффективности проектов в энергоотрасли. Отмечаются преимущество и недостаточность различного инструментария оценки, с учетом отраслевой специфики инновационных проектов.

Ключевые слова: *инновационный проект, оценка эффективности, конкурентоспособность, развитие энергоотрасли.*

G. S Armashova-Telnik*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
A. N. Zubkova*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aaerospace Instrumentation*

FEATURES OF ASSESSMENT TOOLS OF THE INNOVATION SYSTEM EFFICENCY

Abstract the article discusses alternative options for evaluating the effectiveness of projects in the energy sector. The advantages and insufficiency of various assessment tools, taking into account the sectoral specifics of innovative projects, are noted.

Keywords: *innovative project, performance evaluation, competitiveness, energy industry development.*

Развитие рыночных отношений в России в значительной степени было детерминировано развитием экономических реформ. Сильным фактором, определяющим развитие экономики страны, стал усиленный переход от конкуренции за товары и ресурсы к конкуренции за потребителя. С практической стороны можно отметить, что имеющаяся конкурентоспособная продукция, а также свободные финансовые средства предприятия далеко не всегда позволяют субъектам хозяйствования использовать такую выгоду в связи с недостаточно оптимизированным процессом оценки экономической эффективности внедрения нового продукта и механизма прогноза и оценки реализации нововведения.

Вместе с тем с каждым годом ситуация усугубляется незаметным расширением границ рынка и привлечением в него иностранных компаний, которые владеют достаточным опытом работы в условиях жесточайшей конкуренции, тем самым занимают доминирующие позиции на рынке. Применение данного опыта отечественными компаниями зачастую является достаточно сложным из-за присутствия довольно специфических черт развития российского рынка [2].

Закономерность продвижения экономической ситуации в России нуждается в равноценном развитии форм и методов управления производством, которые основаны на идеи маркетинга и направлены на детальную оценку экономического обоснования того или иного нового продукта, что способствует активному росту концептуальных методологических положений и разработок подходов к оценке экономической результативности нововведения, используя результаты исследования опыта иностранных компаний и учитывая отраслевую специфичность инновационной деятельности российского предпринимательства [4].

Необходимо отметить, что в среде динамичности рынков, отсутствия стабильности социально-экономического положения, оперативного усовершенствования технологий и техники процесс управления инновационными проекта-

ми на региональном уровне приобретает особое значение.

В современной ситуации риска и неопределенности вопрос экономического обоснования эффективности инновационных проектов относится к исследованиям отечественных и иностранных ученых как на этапах проектирования, так и на этапах внедрения, однако исследования, относящиеся к региональным инновационным проектам, неполноценны [6]. Отметим, что инновационный проект представляет собой систему мероприятий по подтверждению экономической целесообразности разработки и внедрения усовершенствованных или совершенно новых продуктов, которые реализуются на рынке, а также аналогичных технологических процессов, которые используются в практической работе. Точное определение эффективности инноваций относится к ключевым элементам в регулировании инновационными проектами на микро- и макроуровнях управления. Мониторинг эффективности инновационного проекта независимо от его происхождения создается на базе единых методологических принципов выявления эффективности инвестиционных вложений в инновационную деятельность. На данный момент выявлено достаточное многообразие методов оценки эффективности инновационных проектов, что говорит о том, что основная задача оценки эффективности инновационного проекта находится в использовании совокупного подхода к определению «эффективность», соответственно, кроме показателей, которые характеризуют экономический эффект инновационного проекта, нужно определить ценность уровня достижений целей проекта в бюджетной, финансовой, экономической, научно-технической, информационной, экологической, социальной, ресурсной и других сферах деятельности; сопоставлять качественные и количественные показатели; принимать во внимание цели и интересы всех участников инновационного проекта.

Следует подчеркнуть, что основой экономики в постиндустриальном обществе считается инновационный сектор, который относится к ключевым источникам развития и роста. В системе увеличения глобализации постиндустриальных обществ, конкуренция между странами отходит на уровень технологии с уровня товаров, что значительно увеличивает влияние инновационного сектора на конкурентоспособность страны.

Желание России развивать инновационную активность предприятий методом разработки инновационной стратегии, производства инновационных технопарков (таких, как Сколково, центры трансферта технологий и др.), создание малого наукоемкого бизнеса (инновационно-промышленный комплекс, бизнес-инкубаторы), особых экономических зон – все вышеперечисленное позволяет отметить, что государство подходит осознанно к вопросам значимости инноваций в современном мире. С развитием глобальных экономических процессов все более актуальным становится вопрос о выборе оптимальных методик оценки экономической эффективности инвестиционных проектов. Грамотные управленческие соображения лежат в основе принятия решения по оценке эффективности и отбору инвестиционных проектов. Чтобы получить представление о проекте, а именно его степени развитости, эффективности деятельности структур разного уровня, следует перейти к объему необходимых инвестиций.

Оценка работы инвестиционных проектов заключается не только в анализе финансовой (коммерческой) эффективности и согласовании отдельных участников инвестиционного процесса, но и в расширении рамок классического микроэкономического анализа, параллельного использования межуровневых и междисциплинарных подходов к выявлению результатов инвестиционной деятельности, которые появляются за институциональными границами некоторых проектов. Это определяется как учет и количественное измерение экономической (общественной) и одновременно финансовой эффективности.

Однако и при наличии благоприятных факторов для внедрения инновационных продуктов владелец проекта не может получить пояснений в части определения эффективности инновационных проектов на этапе его запуска, а также преимуществ и недостатков вариативных способов их оценки. Включая в себя опытно-конструкторские, научно-исследовательские, производственные и другие мероприятия (направленные на разработку, производство и сбыт инновационных продуктов), инновационный проект характеризуется рядом особенностей: достаточно высокой степенью неопределенности; слабо прогнозируемым и длительным сроком окупаемости; строгой организацией работы участников проекта; отсутствием точно обозначенных стандартов проекта. Вследствие указанных особенностей инновационных проектов и многообразия их видов (таких как долгосрочные и краткосрочные; конечные и промежуточные; новые и существующие; федеральные, региональные и отраслевые; моно-, мульти- и мегапроекты) становится невозможным использование какой-либо универсальной системы критериев оценки их эффективности.

В практике иностранных компаний при оценке эффективности инновации самыми распространенными методиками являются [7]:

– STAR (*Strategic technology assesment review*) – совокупность стратегических технологических оценок, демонстрирующая возмож-

ность влияния на степень реализации и коммерциализации.

– BSC (*Balanced Scorecard*) – метод сбалансированной системы показателей для изучения ориентации инновационных проектов (совокупная оценка потенциала инновационного проекта посредством расчета двенадцати показателей-драйверов по четырем направлениям: маркетинговая, финансовая, обучение, бизнес-процессы).

– IRI (*Industrial Research Institute Technique*) – методика, позволяющая повышать эффективность технологических инноваций при помощи объединения передовых мировых компаний в области инноваций с помощью обучения, поиска и обмена информацией.

В России получили популярность два основных подхода для определения способов оценки инновационных проектов [5]:

1. Те же инструменты, что и для оценки инвестиционных проектов (различия между долгосрочными инвестициями и инновационной деятельностью не делаются).

2. Инструменты оценки эффективности, учитывающие условия и факторы влияния как особенности инновационных проектов (товарные, региональные, отраслевые и пр.) (рис. 1).

Так, группа учетных инструментов оценки эффективности включает в себя: показатель окупаемости инвестиций, позволяющий построить сравнительный анализ экономичности проекта, определив отношение чистой прибыли к общему объему вложенных затрат; простой срок окупаемости инвестиций (должен иметь низкие значения); коэффициент эффективности инвестиций, позволяющий определить экономическую выгоду вложенных средств). В совокупности расчет данных показателей обеспечивает первоначальную оценку проекта (в том числе отказ от наименее стоящих идей вложения средств), однако они не включают в себя динамический аспект, влияющий на эффективность инновационного проекта.

Тогда как группа динамических (дисконтированных) инструментов оценки эффективности проекта (чистый дисконтированный доход, индекс прибыльности, внутренняя норма доходности, дисконтированный срок окупаемости) позволяет определить ряд значений, демонстрирующих итоговую стоимость инновационного проекта.

Кроме того, при помощи сравнения ключевых инструментов оценки эффективности инновационных проектов в промышленной сфере (табл. 1) можно отметить превосходство метода реальных опционов, который предоставляет возможность наиболее гибко провести оценку будущего потенциала проекта как с экономической стороны, так и относительно качества управления и рыночной перспективности, а следовательно, позволяет эффективнее управлять инновационным проектом в отрасли [3].

Также метод реальных опционов помогает учитывать, что управленческая гибкость и риск далеко не всегда способны привести к потерям, а только имеют возможность быть факторами, приносящим ценность. Как правило, руководящее звено субъекта хозяйствования достаточно оперативно реагирует на изменения внешней среды. И менеджер проекта в рамках своих полномочий может: уменьшить влияние отрица-

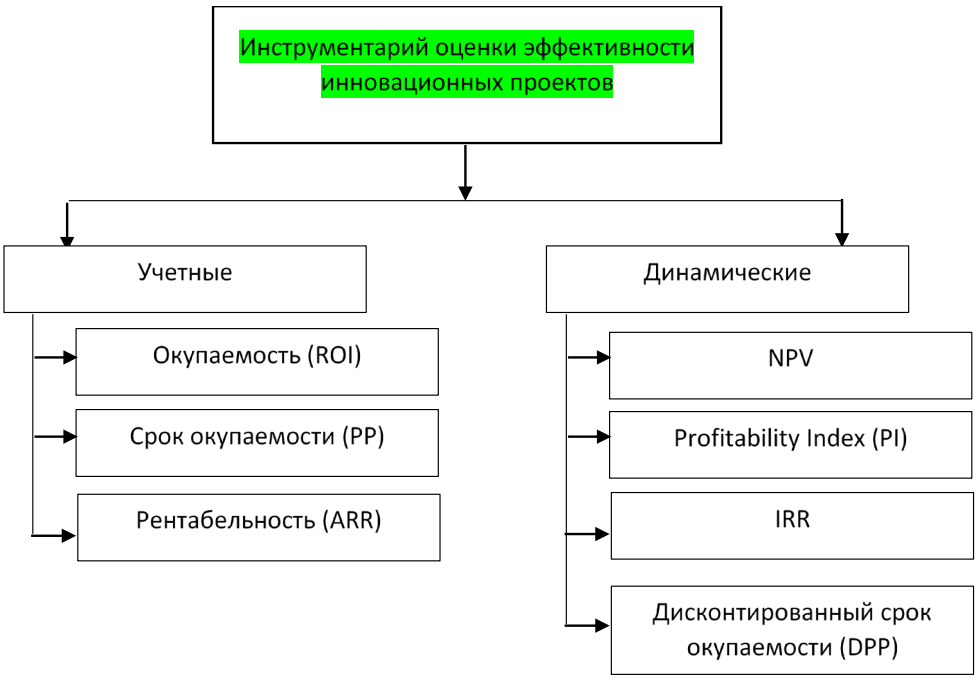


Рис. 1. Инструментарий оценки эффективности инновационных проектов

Таблица 1

Сравнение ключевых инструментов оценки эффективности инновационных проектов

Метод	Критерий сравнения			
	Ориентированность на денежные потоки	Учет риска	Многопериодность	Гибкость в принятии решений
NPV	+	+/–	+	–
PI	+	–	+	–
IRR	+	+/–	+	–
DPP	+	–	+	–
Реальные опционы	+	+	+	+

тельных процессов, которые происходят в ходе реализации проекта; отложить сроки исполнения проекта до момента получения необходимой информации; управлять стратегическими направлениями под влиянием различных факторов; совершенствовать решения в контексте роста положительного эффекта проекта.

Подчеркнем, что при помощи данного инструментария владелец проекта имеет возможность разработать оптимистичный и пессимистичный варианты его развития. А также благодаря опционам «колл» или «пут» максимизировать или минимизировать возможные потери прибыли в зависимости от использования того или иного варианта.

Таким образом, можно говорить о целесообразности применения инструмента реальных опционов в рамках реализации оценки эффективности инновационных проектов, принимая во внимание специфические характеристики инновационных проектов (высокую степень оригинальности, уникальности целей и задач проекта, «разовость, однократность» реализации проекта; общий вектор направленности проекта (предполагающий необходимость исполнения ряда объединенных и разнородных операций с привлечением разнопрофильных специалистов; высокий уровень сложности и низкая степень технологической регламентации; корреляционная составляющая результата инновационного проекта с качеством имеющихся ресурсов; ограниченный бюджет и сроки реализации проекта; рисковый характер (как следствие, сложности в инвестициях), отраслевую специфику, территориальную принадлежность, общее положительное решение по реализации проекта в энергоотрасли. Все это позволит осуществить комплексную оценку эффективности инновационных проектов, минимизируя потенциальные риски, повышая конкурентоспособность субъекта хозяйствования на отраслевом рынке, создавая благоприятные условия как для экономического и технологического развития электроэнергетической отрасли, так и для развития экономики страны в целом.

Библиографический список

1. *Елькин Б. П., Иванов В. А.* Повышение надежности оценки экономической эффективности инноваций // Газовая промышленность. 2016. № 3. С. 12–14.

2. *Ерохина Е. А.* Проблемы оценки эффективности управленческих инноваций // Состояние, проблемы и перспективы развития социально ориентированного строительного комплекса на региональном уровне. 2016. С. 278–280.

3. *Зайцев Д. А., Зайцев А. Н., Борисов С. А.* Рынок интернет-проектов для бизнеса: состояние, динамика и перспективы // Тр. Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. № 2 (99). Н. Новгород, 2016. С. 282–289.

4. *Коу С., Ван Г.* Эффективность инновационных проектов: анализ понятийного аппарата // Апробация. 2015. № 3 (6). С. 71–74.

5. *Маркова Г. И.* Повышения эффективности деятельности предприятия через управленческие инновации // Науч. тр. Вольного экономического общества России. 2017. Т. 169. С. 191–201.

6. *Огурцов С. В.* Базовые критерии эффективности функционирования рынка инноваций // Инновации и инвестиции. 2015. № 2. С. 117–121.

7. *Пешков А. В.* Логистические процессы при реализации инновационных энергосберегающих проектов и их экономическая эффективность // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 10 (92). С. 374–380.

8. Становление информационного общества в условиях инновационного развития телекоммуникационных услуг / Д. В. Проскура, Н. В. Проскура, Н. А. Мурашова, Д. А. Зайцев // Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева. Н. Новгород, 2017. 177 с.

УДК 620.9

Г. С. Армашова-Тельник*
кандидат экономических наук, доцент
П. Н. Соколова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СПЕЦИФИКА ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА В ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

В статье проанализирована специфика внедрения энергетического менеджмента в российских промышленных предприятиях.

Ключевые слова: *энергетический менеджмент, промышленные предприятия, повышение энергосбережения, внедрение.*

G. S. Armashova-Telnik*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
P. N. Sokolova*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SPECIFICITY OF ENERGY MANAGEMENT IMPLEMENTATION IN INDUSTRIAL ENTERPRISES OF RUSSIA

The article analyzes the specifics of the implementation of energy management in Russian industrial enterprises.

Keywords: *energy management, industrial enterprises, energy saving increase, implementation.*

В современных экономических условиях при управлении промышленным предприятием наиболее остро уделяется внимание повышению эффективности использования энергии. В России специфика внедрения подобных проектов является одним из главных направлений развития промышленных предприятий. Так, предприняты активные меры по разработке, укреплению и реализации проектов по повышению энергоэффективности на региональном и государственном уровнях.

Потребность в оптимизации международной системы стандартизации в направлении энергетического менеджмента в рамках эффективного регулирования и раскрытия принципов развития энергетических процессов управления деятельностью промышленных предприятий и формирования рациональной политики организации в направлении энергоменеджмента актуализируют необходимость развития повышения энергосбережения в различных направлениях функционирования предприятий.

Управление энергоэффективностью на предприятии подразумевает широкий спектр функций, выполнение которых дает подробную информацию о крупных потребителях топлива и электроэнергии, о промышленных процессах энергоэффективности, о снижении потребления электроэнергии, что включено в систему энергетического менеджмента [1].

Без энергоменеджмента сложно сказать о системных снижениях расходов на энергетические ресурсы. Введение на предприятиях системы энергоменеджмента позволяет находить и соблюдать баланс оптимального потребления энергоресурсов при заданных задачах производства.

Энергетический менеджмент представляет собой управленческий процесс, позволяющий делать прогнозы и контролирование процессов выработки, использование определенного количества энергетических ресурсов для обеспечения деятельности организации.

Подчеркнем, что развитие энергоменеджмента тесно связано с экономическим кризисом, в ходе которого наиболее остро выделяются вопросы конкурентоспособности в сфере производства, а также распределение или потребление топливно-энергетических ресурсов.

Одним из значительных факторов, обусловивших переход к современному этапу развития энергосбережения, был энергетический кризис

1970-х годов, что вызвало повышение цен на нефть и, соответственно, увеличение темпа инфляции. Наиболее серьезное значение последствий кризиса – это стимулирование развития энергосберегающих технологий, которые являются одним из главных инструментов повышения конкурентоспособности продукции промышленных организаций.

К концу 70-х годов правительствами ряда стран (Германия, Япония, США) стали внедряться правовые механизмы стимулирования энергосбережения в национальном масштабе, что привело к появлению отдельных направлений в сфере потребления топливно-энергетических ресурсов. В это же период была сформирована первая концепция управления энергоэффективностью в параллели с экологическими проблемами регионов, где аккумулировано промышленное производство в целом.

В результате крупные промышленные организации приходят к идее энергетического менеджмента, что является ключевой необходимостью в экономии ресурсов, минимизации косвенных расходов на производство и повышении экологичности производства.

Постепенная реализация отдельных направлений в сфере энергосбережения становится более систематизированной на промышленных предприятиях, которые ведут к разработке международного стандарта энергетического менеджмента. Систематизированная идея представления об энергоменеджменте тесно взаимосвязана с другими типами менеджмента: управлением производственными процессами, производственной логистикой, человеческими ресурсами. Таким образом, современное энергетическое управление является предложением концепции раннего энергосбережения.

Проблематика внедрения системы энергетического менеджмента в российские промышленные организации связана с особенностями современного этапа социально-экономического развития (появление частной собственности в промышленном секторе) и переходом на децентрализованное планирование. Ряд исследователей полагают, что энергетический кризис негативно повлиял на процессы формирования внутренних подходов к энергосбережению и привел к открытию экспортных каналов для местных энергетических ресурсов.

Автор солидарен с учеными, которые отмечают, что растущая значимость энергосбережения в России связана с переходом к рыночной экономике в начале 1990-х годов, когда изменение ценовой политики на энергоресурсы в децентрализованной системе промышленного производства повлекло рост цен в среднем на 15–20% с общим уровнем энергоемкости промышленной продукции.

Особенности развития российской энергетической инфраструктуры также определяются инвестиционной политикой. В 90-х годах объем финансирования в области энергетики значительно снизился, несмотря на значительные моральные и физические устаревания оборудования на предприятиях данной отрасли. Это также отразилось на информационных и технических объектах мониторинга, которые обеспечивают анализ текущего и будущего состояния элементов энергетической инфраструктуры. При этом ряд производителей реализуют свои функции с низкой эффективностью, и их цены и тарифы на международном уровне не являются конкурентоспособными.

Отметим, что одним из ключевых факторов развития и реализации системы энергетического менеджмента в современной России является ее вступление во Всемирную торговую организацию (ВТО), что демонстрирует низкую степень конкурентоспособности отечественной продукции на международных рынках и, как следствие, неразвитости энергоэффективности промышленности. В настоящее время в отрасли энергосбережения действует основополагающий базовый документ о том, что энергетическая стратегия до 2030 года имеет перспективы на долгосрочное развитие энергетического сектора России, преимущества и недостатки, в том числе механизмы инструментария в энергетической политике, которая обеспечивает достижение поставленных целей.

Как правило, реализация системы энергетического менеджмента реализуется при подходе к систематизации управления топливно-энергетическими ресурсами. Однако для большинства промышленных предприятий России внедрение системы энергетического менеджмента в большей степени зависит от законодательства Российской Федерации, а в меньшей – от фактического намерения повысить энергоэффективность посредством такой реализации. Это обусловлено не только низким опытом реализации такой системы, но и отсутствием четких алгоритмов оценки результатов эффективности внедрения системы энергетического менеджмента в компании.

Среди основных проблем в реализации энергетического менеджмента в России выделяют отсутствие понимания руководства промышленных предприятий значимости энергетической политики, размытые границы ответственности в процессе ее реализации, недостаточно конкретную техническую документацию, связанную с реализацией и внедрением энергоменеджмента. Данные противоречия приводят к низкой эффективности организации системы энергетического менеджмента на промышленных предприятиях.

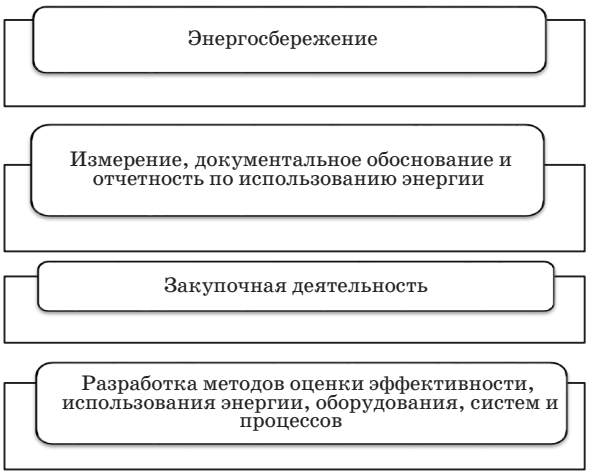


Рис. 1. Положения системы энергоменеджмента

Таким образом, в процессе интеграции системы энергетического менеджмента на российских предприятиях актуализируется задача создания эффективной энергетической политики.

Ряд крупных российских промышленных компаний, реализующих проекты внедрения системы энергетического менеджмента на основе требований международного стандарта ISO 50001:2011 (ГОСТ Р ИСО 50001-2012) [2]: ОАО «Сургутнефтегаз», ОАО «АК Транснефть», ПАО «Лукойл», ОАО «НК Роснефть», ОАО «РЖД», ГК «Газпромнефть» и др.

Данный стандарт определяет требования к системе энергетического менеджмента по разработке и реализации энергетической политики, к постановке задачи, цели и планов действий, в которых правовые требования и информацию рассматривают непосредственно в контексте использования энергии.

Целью разработанного стандарта ISO 50001 является предоставление компаниям рационально структурированного и всеобъемлющего руководства по оптимизации потребления энергетических ресурсов и системному управлению этими процессами в рамках обеспечения перманентного процесса роста уровня энергоэффективности деятельности предприятия.

Интегрирование системы энергетического менеджмента в структуру хозяйствующих субъектов характеризуется рядом положений (рис. 1).

Рис. 2 демонстрирует модель системы энергетического менеджмента в соответствии со стандартом ISO 50001, функционирующий на основе цикла: план (Планирование) – делать (внедрение и эксплуатация) – чек (проверка) – акт (внутренний аудит, анализ со стороны руководства, постоянное улучшение). Это позволяет характеризовать энергетическую политику как базовую позицию в основе любой системы энергетического менеджмента. Стандарт ISO 50001 определяет энергетическую политику предприятия (официально сформулированную высшим руководством) как совокупность общих намерений и направлений деятельности организации, связанных с ее энергетической эффективностью.

В целях исследования передового опыта и эффективности внедрения системы энергетического менеджмента в соответствии с положениями стандарта ISO 50001 Минэнерго России при участии ФГБУ «Российское энергетическое агентство» в 2017 году был проведен мониторинг управления энергоэффективностью и внедрения систем энергетического менеджмента в промышленные компании.

Более 80 крупных промышленных предприятий России участвуют в направлении энергетики, нефтегазовой, металлургической, добывающей, химической и нефтехимической промышленности, а также в транспортной и коммуникационной сферах.

Информация о доле компаний в рамках опроса, которые реализуют систему энергетического менеджмента в 2017 году, представлена на рис. 3.

Рис. 3 демонстрирует, что систему энергетического менеджмента внедрили на 23% опрошенных предприятий. Это означает заинтересованность Минэнерго России и большой части компаний энергетической, газовой, нефтяной отраслей к этому вопросу.

Во всех остальных компаниях, которые внедрили систему энергетического менеджмента,

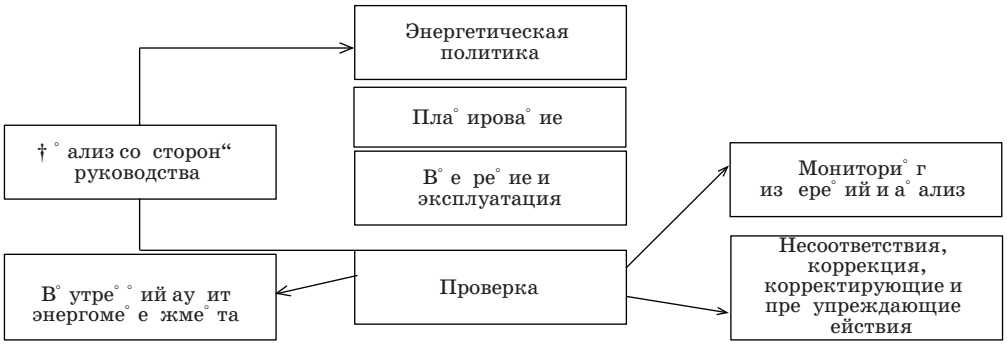


Рис. 2. Модель системы энергетического менеджмента

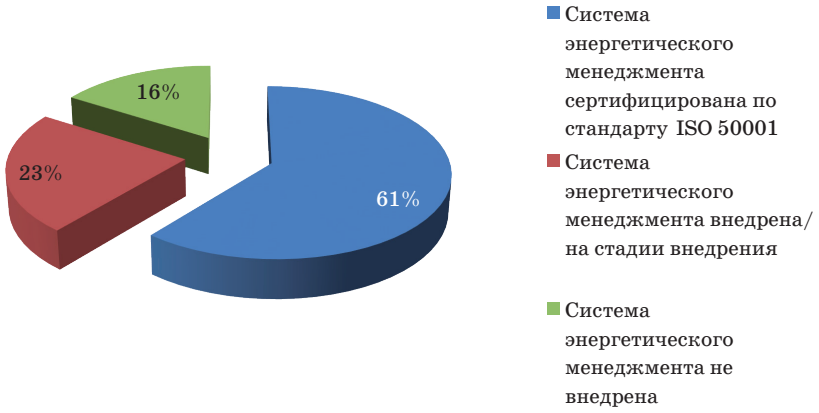


Рис. 3. Доля компаний из числа опрошенных, внедривших систему энергетического менеджмента в 2017 году, % [3]

существует разработанная энергетическая политика, программы по сохранению и экономии энергии: 61% предприятий используют методику оценки мероприятий по повышению энергоэффективности.

В компаниях, которые соблюдают требования законодательства, энергетическая политика была разработана только в 6% случаев, а методы оценки эффективности мероприятий по повышению энергоэффективности разрабатываются в 10% компаний. Стандарты экономии энергии на предприятиях разрабатываются в одной трети компаний, каждая пятая организация не имеет программы энергосбережения.

Исследования позволяют сделать вывод о том, что результаты обязательного энергетического обследования применяются в основном на промышленных предприятиях, которые внедрили систему энергетического менеджмента, на что указывает 100%-ное наличие энергосберегающих программ.

Оценка эффективности внедрения системы энергетического менеджмента была проведена экспертами (давался балл за каждый критерий). В то же время значимость влияния показателя на общую эффективность энергосбережения была определена деятельностью и повышением энергоэффективности. После оценки определяется рейтинг эффективности, который показывает эффективность или неэффективность внедрения системы энергетического менеджмента в компании. Далее компании распределили по количеству набранных %, которые представлены на рис. 4.

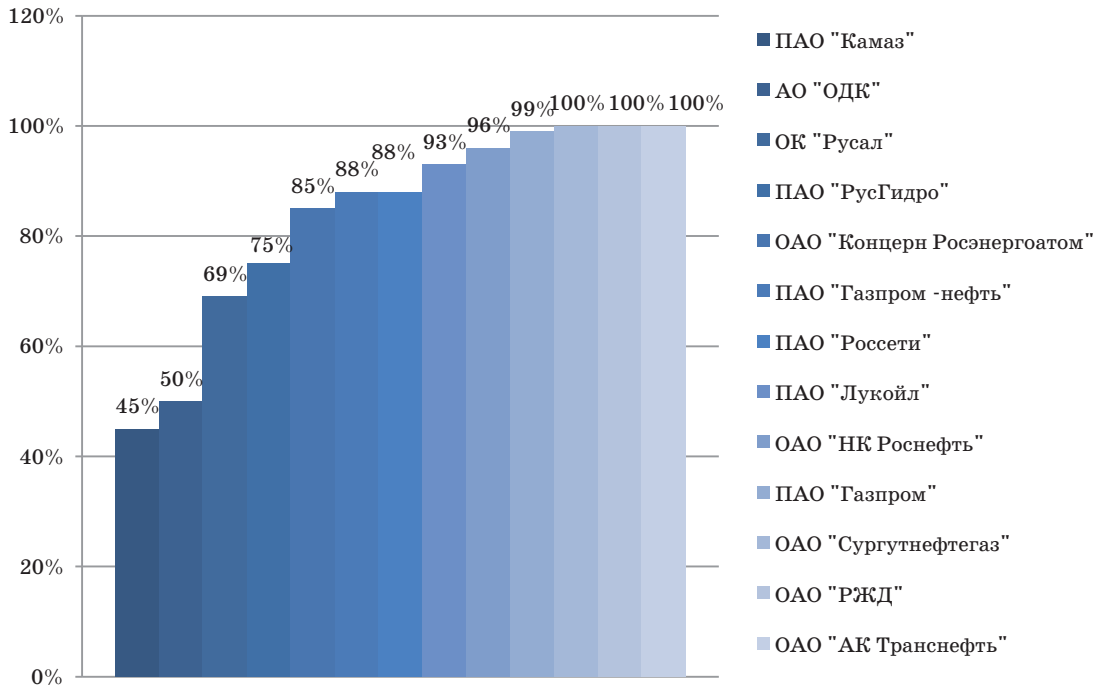


Рис. 4. Результативность опрошенных промышленных компаний в 2017 году [4]

Результаты исследования показали, что в процессе повышения энергоэффективности руководство многих компаний, прошедших энергетическое обследование, определило их цели и задачи в области энергосбережения и энергоэффективности. Также был проведен мониторинг показателей, и выделены те, с помощью которых компания может добиться увеличения эффективности использования энергии с минимальными усилиями и низкими инвестициями (коэффициент производительности находится в пределах 40–67%).

Ряд предприятий пошли еще дальше и назначили ответственных за повышение энергоэффективности и экономию энергоресурсами, ввели ключевые факторы энергетической эффективности, началось обучение персонала, реализация среднесрочных мероприятий, состоящих в повышении энергетической эффективности (коэффициент производительности находится в пределах 67–90%).

Однако несмотря на значительный уровень популярности системы энергетического менеджмента в промышленных компаниях России, они сталкиваются с рядом факторов, тормозящих реализацию мероприятий по разработке и внедрению системы энергетического менеджмента. Так, среди основных препятствий можно выделить:

– недостаточную разработку методологической базы для обоснования целесообразности энергосбережения и повышения энергетической эффективности деятельности;

– низкую степень финансовой поддержки мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение эффективности;

– отсутствие мотивации для роста эффективности и результативности системы энергетического менеджмента среди администрации и персонала организации;

– отсутствие стимулирующей политики на предприятии для персонала в рамках разработки и внедрения системы энергетического менеджмента;

– недостаточное информирование о потенциальных предприятиях-партнерах, предоставляющих услуги (анализ, рекомендации по деятельности в области энергоэффективности, аудита и автоматизации) в разработке и внедрении системы энергетического менеджмента.

Таким образом, данные теоретического анализа демонстрируют, что система энергоменеджмента является одной из функциональных систем управления промышленного предприятия. Осуществлением этой системы является деятельность, направленная на планирование, организацию и контроль использования топливно-энергетических потерь на предприятиях и мотивацию энергосбережения на основе создания вышеперечисленных элементов энергетической инфраструктуры и персонала.

Необходимо отметить, что процесс реализации системы энергетического менеджмента представляет собой деятельность, ориентированную на решение задач планирования, организации деятельности предприятия, контроля распределения и расходования топливно-энергетических ресурсов предприятия, а также по разработке мотивационных и стимулирующих персонал программ и мероприятий в контексте повышения уровня энергосбережения на базе формирования комплекса взаимодействующих элементов энергетической инфраструктуры субъекта хозяйствования.

Ориентируясь на оптимизацию управления энергоэффективностью, предприятию целесообразно интегрировать систему энергетического менеджмента, которая, являясь одной из подсистем общей системы управления предприятием, объединяет стратегические цели компании и развитие энергетической политики (в том числе энергетический аудит и энергетическую систему учета ресурсов, подготовку кадров в области энергосбережения, формирование и мониторинг эффективности реализации программ энергосбережения и автоматизации энергетики).

Разработка энергетической политики включает в себя:

– выявление источников резерва энергосбережения (в рамках технологической сферы к управлению человеческими ресурсами, экологических решений в производственном процессе, разработки методик поиска резервов энергосбережения);

– поднятие проблем внедрения системы энергетического менеджмента на уровень стратегического анализа для поиска фундаментальных проблем энергосбережения;

– совершенствование системы энергетического менеджмента для развития внутренней научно-технической и организационно-управленческой структур, отвечающих за планирование инноваций в энергосбережении.

Важную роль в системе энергетического менеджмента играет персонал предприятия, который показывает инициативу энергосбережения, является основой для формирования внутренней базы знаний управления энергетики и выполняет инновационные функции. Для повышения эффективности работы в области энергосбережения предприятия проводят многоступенчатую подготовку персонала, используют внешние интеллектуальные ресурсы.

В первую очередь внедрение системы энергетического менеджмента должно быть инициировано управляющим аппаратом промышленного предприятия, которое назначает лицо, ответственное за введение и внедрение системы

энергетического менеджмента. Далее необходимо внести изменения в организационную структуру предприятия с созданием специального органа (например, отдела энергетического менеджмента).

К отделу энергетического менеджмента относят [5]:

1) энергоаудит промышленных и вспомогательных участков предприятия;

2) разработку, внедрение и контроль проектов по энергосбережению и повышению энергоэффективности;

3) управление энергосервисными контрактами;

4) поддержку процессов закупки энергоресурсов;

5) выполнение программ системы энергетического менеджмента;

6) обучение персонала компании;

7) постоянный поиск ключевых решений.

В настоящее время рост актуальности энергосбережения связан с повышением цен энергоресурсов. Учитывая этот фактор, предприятия выработали подходы к управлению энергией. Основные из них отражаю отдельные направления энергосбережения, которые в дальнейшем соединены в одну систему с помощью стратегического управления энергии.

Традиционным подходом является формирование оперативного управления процессов, режимов энергосбережения в силу технического контроля производства параметров, установления стандартов в рамках энергетической базы, разработки принципов мотивации персонала предприятия. Такой подход вносит значительный вклад, поскольку обеспечивает начальную установку задач энергосбережения, требует внимания администрации компании для создания единой системы.

Развитие традиционных подходов приводит к формированию идеи энергетического менеджмента как совокупности элементов, составляющих основу регулярных бизнес-процессов с развитой системой обучения и мотивации персонала [6].

В целях повышения качества реализации системы энергоменеджмента в российских промышленных компаниях необходимо:

– реализовать мониторинг, анализ, популяризацию и распространение передового опыта внедрения энергоменджмента на основе ISO 50001:2011;

– совершенствовать методологическую и нормативно-техническую базу системы энергоменеджмента;

— развивать профессиональные и образовательные стандарты в сфере энергетического менеджмента;

— формировать единый реестр компаний, которые подтвердили их введение в систему энергоменеджмента;

— расширять поддержку мер и стимулирование компаний для реализации системы энергоменеджмента.

Таким образом, при выполнении вышеуказанных условий станет возможен переход на широкомасштабное внедрение системы энергетического менеджмента. Это свою очередь будет способствовать реализации государственной политики в сфере энергосбережения и энергоэффективности, позволит быстро организовывать изменения в структуре на всех уровнях управления предприятием.

Библиографический список

1. *Кухарук А. Д.* Содержание организационно-экономического механизма повышения конкурентоспособности предприятия // Вестник Кемеровского государственного университета. 2016. № 2 (54). С. 283–287.

2. Стандарт ISO 50001:2011 Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению. М.: Стандартинформ, 2012. 52 с.

3. Организация энергосбережения (энергоменеджмент). Решения ЗСМК – НКМК – НТМК – ЕВРАЗ / Под ред. В. В. Кондратьева. М.: Инфра-М, 2016. 108 с.

4. Центр энергоэффективности Министерства образования и науки РФ. URL: http://energoeducation.ru/ehnergomenedzhment.php (дата обращения: 10.02.2019).

5. *Мазурик В. В., Красов А. В.* Основные проблемы реализации энергетической стратегии Российской Федерации // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 2. № 10. С. 151–152.

6. *Антонов Г. Д., Иванова О. П., Тумин В. М.* Управление конкурентоспособностью организации: учеб. пособие / Под общ. ред. Г. Д. Антонова. М.: ИНФРА-М, 2017. 513 с.

УДК 005.5

В. А. Семёнова*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В статье исследованы вопросы технико-экономического обоснования проектов в сфере электроэнергетики.

Ключевые слова: *инвестиции, обоснование эффективности, электроэнергетика.*

V. A. Semenova*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF THE DEVELOPMENT FEASIBILITY OF PROJECTS IN THE POWER INDUSTRY

The article investigates the issues of feasibility study of projects in the field of electricity.

Keywords: *investment, substantiation of efficiency, power.*

В современных условиях инновационного развития сферы электроэнергетики актуальными становятся вопросы создания и экономического обоснования разрабатываемых технических проектов, которые, как правило, характеризуются высокотехнологичностью и капиталоемкостью. Такие проекты преимущественно реализуются на базе уже существующих крупных предприятий энергетической отрасли. Для их описания и оценки целесообразно разрабатывать технико-экономическое обоснование.

Технико-экономическое обоснование (ТЭО) – это изучение экономической выгодности, анализ и расчет технических и экономических показателей создаваемого проекта. Цель проекта – создание или развитие продукта, процесса или объекта [1].

Главной задачей при составлении ТЭО является оценка затрат на инвестиционный проект и его результатов, анализ срока окупаемости проекта. Составить ТЭО необходимо самому предпринимателю для понимания того, что стоит ждать от проекта, а для инвестора ТЭО – для понимания сроков окупаемости вложенных денег. Разработка ТЭО может быть поручена как группе специалистов (в сложных проектах), так и выполнена самостоятельно предпринимателем.

Что же является основными отличиями ТЭО от бизнес-плана?

Теоретики определяют технико-экономическое обоснование как результат разнообразных экономических и маркетинговых исследований. Но при этом делается вывод о реалистичности проекта, и определяется круг экономических, организационных и других предполагаемых решений для оптимизации производственного процесса. И нередко технико-экономическое обоснование является составной частью бизнес-плана.

Существует мнение, что технико-экономическое обоснование в какой-то мере представляет собой либо сокращенный вариант бизнес-плана, либо обычный бизнес-план, который назвали технико-экономическим обоснованием.

Необходимо отметить, что если порядок составления и структуры бизнес-плана четко прописаны в стандартах UNIDO, то при составлении ТЭО можно найти несколько различных вариантов написания, которые различаются в зависимости от рассматриваемых проблем.

Обычно ТЭО составляется для новых проектов на уже существующем предприятии, поэтому такие блоки, как маркетинговые исследования, анализ рынка, описание предприятия и продукта, не описываются в ТЭО. Но иногда возникает ситуация, когда в ТЭО дополнительно приводятся подробные данные об анализе технологий и оборудования, а также причины их выбора.

Таким образом, технико-экономическое обоснование (ТЭО) является более коротким и содержательным документом, чем полноценный бизнес-план, и содержит: описание отрасли, в которой работает предприятие; обоснование выбора территориального и географического положения, действующего и предполагаемого

бизнеса; описание вида выпускаемой продукции; обоснование цен на выпускаемую продукцию. При этом финансовая часть ТЭО содержит информацию об источниках финансирования и сроки погашения задолженности, условия использования заемных средств. Расчеты в ТЭО состоят из таблиц, в которых представлено движение денежных средств и баланс.

Существуют следующие варианты технико-экономического обоснования на практике:

Пример № 1

1) реальное состояние предприятия;

2) анализ рынка и оценка производственных мощностей предприятия;

3) техническая документация;

4) положение дел с трудовыми ресурсами;

5) организационные и накладные расходы предприятия;

6) оценка длительности проекта;

7) анализ финансовой привлекательности и экономической обоснованности проекта.

Пример № 2

1) суть предлагаемого проекта, представление основ проекта и принципов его воплощения в жизнь;

2) небольшой обзор рынка, изложение результатов различных исследований с целью изучения спроса на новую услугу или товар;

3) технологические и инженерные аспекты проекта:

а) описание процесса производства;

б) доказательства необходимости приобретения нового оборудования или модернизации старого;

в) сравнение нового продукта с действующими стандартами качества;

г) обзор сильных и слабых сторон нового товара или услуги;

4) финансовые и экономические показатели, включающие в себя:

а) предполагаемые и необходимые инвестиции в проект;

б) предполагаемые внутренние и внешние финансовые источники;

в) производственные издержки;

5) оценка эффективности и окупаемости продвигаемого проекта, гарантия возврата внешних заимствований;

6) восприимчивость предлагаемого нового продукта, услуги к существующим на рынках рискам, а также стойкость к возможным рискам в будущем;

7) общая оценка эффективности возможного внешнего заимствования.

Отметим, что многие из существующих примеров технико-экономического обоснования напоминают детально составленный бизнес-план. Можно проводить ТЭО и в рамках бизнес-плана, но его объемность часто усложняет понимание сути проекта, в то же время недостаточно освещая вопросы внедрения проекта в действующее предприятие.

Таким образом, при составлении ТЭО существует определенная грань его отличия от бизнес-плана, а в сфере электроэнергетики необходимо особое значение уделять вопросам оценки инвестиций и производственного потенциала предприятия, реализующего проект. Для технических проектов, а также в сфере электроэнергетики целесообразно придерживаться следующей методики составления технико-экономического обоснования (ТЭО):

1. Общее описание проекта, вводные данные о проекте. Информация об исследованиях, которые были проведены предварительно.

2. Описание рынка, где планируется реализация создаваемого продукта, оценка спроса и прогноз будущих продаж.

3. Описание предприятия, в рамках которого реализуется проект, оценка его производственного потенциала.

4. Проектная документация и производственный план. Описание технологии производства нового продукта, характеристики необходимого оборудования, сырья, материалов, прогноз и описание поставок ресурсов на предприятие, анализ цен на них.

5. Организационный план и план-график реализации проекта. Оценка необходимых трудовых ресурсов. Описание организационно-структурных изменений на предприятии, реализующем проект, накладные расходы.

6. Экономические расчеты. Бюджеты проекта. Оценка инвестиционных издержек, производственные издержки, финансовая оценка проекта. Планирование источников и сроков инвестирования проекта.

Библиографический список

1. *Семёнова В. А.* Технико-экономическое обоснование принятия решений: практикум. СПб.: ГУАП, 2018.

УДК 676.012.43

Е. А. Кривчун*
кандидат химических наук, доцент
Е. А. Романова*
студентка
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОЛОКА

Рассмотрены показатели качества молока. Проведена предварительная оценка физико-химических показателей качества молока.

Ключевые слова: *качество, оценка качества, физико-химические методы анализа.*

E. A. Krivchun*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. A. Romanova*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

EXPRESS ASSESSMENT OF THE MAIN PHYSICAL AND CHEMICAL INDICATORS OF MILK

Considered indicators of milk quality. Preliminary assessment of the physico-chemical indicators of milk quality.

Keywords: *quality, quality assessment, physical and chemical methods of analysis.*

Под оценкой качества продукции (услуги) понимают совокупность операций, включающих выбор номенклатуры показателей качества оцениваемой продукции, определение значений этих показателей и сопоставление их с базовыми (эталонными) значениями.

Методика оценки качества учитывает следующие этапы:

1) определение перечня (номенклатуры) тех показателей, совокупность которых в достаточно полной мере характеризует качество;

2) измерение показателя (определение их численных значений);

3) аналитическое сопоставление полученных данных с подобными характеристиками другого объекта, принимаемого за базовый (эталонный);

4) принятие управленческого решения.

Целью данной научно-исследовательской работы являлось экспресс-определение показателей качества молока. В качестве объекта исследования выбрано молоко марки «Простоквашино» 2,5% жирности фирмы Danone.

Молоко – это продукт нормальной секреции молочной железы коровы. Оно представляет собой сложную полидисперсную систему, в которой дисперсной средой является вода, а дисперсной фазой – вещества, находящиеся в молекулярном, коллоидном и эмульсионном состоянии. Молочный сахар и минеральные соли образуют молекулярные и ионные растворы. Белки находятся в растворенном (альбумин и глобулин) и коллоидном (казеин) состоянии, молочный жир – в виде эмульсии.

Молочный жир в чистом виде – сложный эфир трехатомного спирта глицерина и предельных (и/или непредельных) жирных кислот (преобладают C_3H_7 – масляная, $C_{17}H_{35}$ – стеариновая, $C_{17}H_{33}$ – олеиновая). Кроме нейтральных жиров в молоке содержатся жироподобные вещества – фосфатиды (фосфолипиды) лецитин, кефалин и стерины – холестерин и эргостерин [1].

Белки молока – это высокомолекулярные соединения, состоящие из аминокислот, связанных между собой характерной для белков пептидной связью. Белки молока делят на две основные группы – казеины и сывороточные белки.

Лактоза (4-O-β-D-галактопиранозил-D-глюкоза $C_{12}H_{22}O_{11}$) относится к классу олигосахаридов. Этот дисахарид играет важную роль в физиологии развития живых организмов, так как является практически единственным угле-

Таблица 1

Физико-химические показатели молока жирностью 2,5%

Наименование показателя	Полученные экспериментальные данные	Значение показателя для продукта с массовой долей жира 2,5%, не менее
Плотность, кг/м^3, не менее	0,980	1028
Кислотность, Т, не более	14	21

водом, получаемым новорожденными млекопитающими с пищей. Лактоза расщепляется ферментом лактазой, выступает источником энергии и регулирует кальциевый обмен [2].

Требования к физико-химическим показателям питьевого молока приведены в стандарте ГОСТ 31450-2013 [3]. Для молока жирностью 2,5% показатели должны соответствовать следующим нормам (табл. 1).

Общая (титруемая) кислотность является важнейшим показателем свежести молока и отражает концентрацию составных частей молока, имеющих кислотный характер. Она выражается в градусах Тернера Т. Основными компонентами молока, обусловливающими титруемую кислотность, выступают кислые фосфорнокислые соли кальция, натрия, калия, лимоннокислые соли, углекислота, белки. На долю белков в создании титруемой кислотности молока приходится 3–4 Т. При хранении молока титруемая кислотность увеличивается за счет образования молочной кислоты из лактозы.

Активная кислотность pH является одним из показателей качества молока и определяется концентрацией водородных ионов. Для свежего молока значение pH находится в пределах 6,4–6,8, то есть у молока слабокислая реакция. От значения pH зависит коллоидное состояние белков молока, развитие полезной и вредной микрофлоры, термоустойчивость молока, активность ферментов.

Плотность молока – это отношение массы молока при температуре 20 °С к массе того же объема воды при температуре 4 °С. Плотность сборного коровьего молока находится в диапазоне 1027–1032 кг/м^3.

В ходе эксперимента были получены следующие значения показателей (табл. 2).

В ходе эксперимента получено значение жирности 3%. На упаковке молока «Простоквашино» указана жирность 2,5%, несоответствие может быть получено из-за погрешностей в ходе измерений.

Для определения белка в исследуемом образце использовали биуретовую реакцию. Качественная реакция на обнаружение белков с фиолетовым окрашиванием при действии солей

Таблица 2

Экспериментальные значения физико-химических показателей молока «Простоквашино» жирностью 2,5%

Анализируемое свойство	Полученные экспериментальные данные
Титруемая кислотность молока (градусы Тернера)	14 Т
Активная кислотность молока (pH) (датчик pH лаборатории EINSTEIN) универсальная индикаторная бумага	6,15 6,5
Плотность (г/см)	0,980 г/см

меди (II) в щелочном растворе. Фиолетовый цвет дают образовавшиеся комплексные соединения меди с белками. Такая реакция характерна для всех соединений с пептидной связью.

Экспериментальная часть

Определение титруемой кислотности молока проводилось по следующей методике. К 10 мл молока было добавлено 20 мл воды и 3–4 капли 1% раствора фенолфталеина. С последующим титрованием 0,1 н раствором гидроксида натрия до слабо-розового окрашивания раствора, которое не исчезает в течение 1 мин, умножить количество мл гидроксида натрия на 10, получаем кислотность в градусах Тернера. Результат эксперимента – 14 Т.

Определение активной кислотности молока (*pH*) проводили с помощью датчика pH, входящего в комплект цифровой лаборатории EINSTEIN. Активная кислотность молока составила pH 6,15. Измерение pH с помощью универсальной индикаторной бумаги показало значение 6,5.

Определение плотности проводили, измерив массу мерной колбы на 250 мл. Молоко перелили в мерную колбу до риски. Провели измерение массы колбы с молоком. Разделили значение массы на объем. Результат эксперимента – 0,98 г/см^3.

Извлечение жира, определение процента жирности проводили, отобрав около 30 г молока с помощью взвешивания. В колбу с молоком добавили 20 мл растворителя (ацетона), закрыли пробкой, сильно взболтали (жидкость расслоилась, жир перешел в растворитель). Использовав делительную воронку, отделили слой обезжиренного молока и определили его массу с помощью взвешивания. Вычислили массу жиров. Рассчитали процентное содержание жира (Ж) в молоке по формуле:

$$\omega = m \text{ (жира)} / m \text{ (молока)}.$$

Процентное содержание жира (Ж) ~ 3%.

Извлечение молочного белка высаливанием проводили, поместив 4 мл исследуемого образца

молока. Добавляли 4 мл насыщенного раствора сульфата аммония, слегка встряхивали полученную смесь. Наблюдалось осаждение казеина и молочного глобулина (пробирка 1). Провели фильтрование раствора. Переливали 1 мл полученного раствора в чистую пробирку, добавили 3 мл воды, наблюдали растворение осадка белка (пробирка 2). Отфильтровывали осадок из пробирки 1. К фильтрату добавляли 2 г порошка сульфата аммония до прекращения его растворения. Наблюдалось появление мути высоленного белка молочного альбумина. При добавлении двойного объема воды произошло растворение осадка.

Осадок с фильтра использовали для проведения качественной реакции на наличие белка. Осадок перенесли в пробирку, добавили 1 мл раствора гидроксида натрия и 3 капли 1%-ного раствора сульфата меди (II). Наблюдалось розово-фиолетовое окрашивание раствора (биуретовая реакция).

Удаление молочного белка с помощью кислоты проводили путем добавления к 20 мл исследуемого образца молока нескольких капель 9%-ной уксусной кислоты до прекращения образования хлопьев. В результате в осадок выпали содержащиеся в молоке белки (в основном казеин). Полученную смесь фильтровали, казеин проверили на его растворимость в воде, белок не растворялся. Доказали наличие белка с помощью биуретовой реакции.

Обнаружение углеводов проводилось с помощью нейтрализации фильтрата, содержащего в основном молочный сахар и уксусную кислоту, с помощью мела. Добавили мел и перемешивали содержимое стакана стеклянной палочкой до тех пор, пока не прекратилось выделение углекислого газа. Раствор фильтровали через бумажный фильтр. Для определения наличия лактозы в фильтрате провели реакцию с гидроксидом меди (II). К 2 мл фильтрата добавить 2 мл раствора гидроксида натрия и 5 капель раствора сульфата меди (II), получили ярко-синий раствор.

Предложен ряд показателей и методик их определения для предварительной экспресс-оценки качества партии молока.

Библиографический список

1. *Личко Н. М.* Стандартизация и подтверждение соответствия сельскохозяйственной продукции: учебник для вузов. М.: ДеЛи плюс, 2013. 512 с.

2. Лактоза и ее производные / Б. М. Синельников, А. Г. Храмцов, И. А. Евдокимов и др. СПб.: Профессия, 2007. 768 с.

3. ГОСТ 31450-2013 Молоко питьевое. Технические условия М.: Стандартинформ, 2014.

4. ГОСТ Р 52054-2003 Молоко коровье сырое. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008.

УДК 547.44:669.094.3:541.12.012

Т. Е. Крылова*
старший преподаватель
Ю. Т. Вираненко**
доктор химических наук, профессор
А. В. де Векки**
доктор химических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова*

КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ 3-МЕТИЛБУТАНАЛЯ В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЬ – ЖИДКОСТЬ

Изучено получение 3-метилбутановой кислоты из 3-метилбутаналя с высокой селективностью. Выбран эффективный катализатор и выявлено влияние температуры, состава и концентрации кислородсодержащего газа на скорость реакции.

Ключевые слова: *3-метилбутаналь, 3-метилбутановая кислота, окисление, двухфазная система.*

T. E. Krylova*
Senior Lecturer
J. T. Vigranenko**
Dr. Sc., Schem., Professor
A. V. de Vekki**
Dr. Sc., Schem., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State Forest Technical University*

CATALYTIC OXIDATION OF 3-METHYLBUTANAL IN TWO-PHASE SYSTEM LIQUID – LIQUID

The preparation of 3-methylbutanoic acid from 3-methylbutanal with high selectivity has been studied. An effective catalyst was chosen and the effect of temperature, composition and concentration of oxygen-containing gas on the reaction rate was revealed.

Keywords: *3-methylbutanal, 3-methylbutanoic acid, oxidation, two-phase system.*

3-Метилбутановая (изовалериановая) кислота используется для получения лекарственных препаратов седативного действия – валидола (раствор ментола в ментиловом эфире изовалериановой кислоты), бромурала (бромизовалериановая кислота); валокардина, валосердина, корвалола (содержат этиловый эфир α-бромизовалериановой кислоты) [1].

Многие сложные эфиры изовалериановой кислоты обладают фруктовыми запахами и используются как ароматизаторы в пищевой и парфюмерной промышленности [2]. Этиловый эфир имеет фруктово-винный запах, при разбавлении – яблочный, изоамиловый – спелых яблок, гексиловый – недозрелых фруктов или табачных листьев, бензиловый – фруктово-цветочный, фенилэтиловый – фруктовый с нотой розы.

Также находит практическое применение в качестве компонента экстрагентов [3, 4], косметических композиций [5–7] и сиккативов [8]. Аминоэтиловый эфир 3-метилбутановой кислоты используется как пятновыводитель [9]. Подобно высшим спиртам эта разветвленная кислота входит в состав ряда пластификаторов [10] и моющих средств [11].

Химический синтез 3-метилбутановой кислоты возможен окислением изоамилового спирта (перманганатом или дихроматом калия в присутствии серной кислоты, воздухом в присутствии катализаторов, электрохимическим методом и др.); из малонового эфира; из изобутилбромида магнийорганическим синтезом [12]. У бактерий биосинтез изовалериановой кислоты происходит из лейцина путем его дезаминирования с образованием кетокислоты и ее последующим окислительным декарбоксилированием [13]. Также ее получают экстракцией из корневищ валерианы лекарственной (*Valeriana officinalis*).

В качестве метода синтеза 3-метилбутановой кислоты нами был выбран промышленно значимый способ окисления альдегидов с использованием в данном случае 3-метилбутаналя (1):

$$C_4H_9CHO + 0{,}5O_2 \xrightarrow{t,\ cat} C_4H_9COOH. \quad (1)$$

Сходный процесс производства 2-этилгексановой кислоты из 2-этил-2-гексеналя реализован в промышленном масштабе в России на заводе АО «Сибурхимпром» в Перми [14].

В качестве катализаторов окисления альдегидов используются соли меди, никеля, марганца, палладия, серебра, платины, кобальта [15, 16]. Имеются сведения о применении карбоксилатов щелочных и щелочноземельных металлов [17], а также водных растворов гидроксида натрия [18], которые ускоряют реакцию окисления *н*-гексадекана.

Экспериментальная часть

Исследование реакции окисления 3-метилбутаналя проводили в реакторе [18], изготовленном из нержавеющей стали, объемом 0,5 дм^3, снабженным мешалкой, электропечью, карманом для термопары, вентилем для подачи кислородсодержащего газа и отсекаемой емкостью объемом 10 см^3 для отбора проб жидкой фазы. Высокая скорость вращения мешалки (~2800 об./мин) обеспечивала протекание реакции окисления 3-метилбутаналя в кинетической области и интенсивное перемешивание водной и органической фаз. В реактор, продутый аргоном, заливали смесь исходного альдегида и растворителя – гексана, включали нагрев и перемешивание.

При проведении реакции с добавками водных растворов гидроксида натрия, последний заливали в реактор вместе со смесью 3-метилбутаналя и гексана. Затем в реактор подавали кислородсодержащий газ. Момент его подачи считался началом реакции.

В ходе опытов производили отбор проб жидкой фазы. При наличии в реакционной смеси водного раствора NaOH нижняя (водная) фаза отделялась в делительной воронке, а верхняя (органическая) анализировалась методом газожидкостной хроматографии в следующих условиях. Длина колонки 4 м, внутренний диаметр колонки 3 мм, материал колонки – нержавеющая сталь. Неподвижная фаза – полиэтиленгликоль ПЭГ-40М, нанесенный на твердый носитель ЦВЕТОХРОМ, – 10% от массы носителя. Детектор – пламенно-ионизационный. Газохроматографический анализ проводился с программированием температуры. Начальная температура колонки 50 °С, конечная – 200 °С. Скорость подъема температуры 3К/мин. Температура детектора 140 °С, испарителя – 170 °С; газ-носитель – аргон. Скорость подачи аргона 3,9·10^{-4} дм^3/с, скорость подачи воздуха 6,5·10^{-4} дм^3/с, скорость подачи водорода 5,7·10^{-4} дм^3/с.

Кислородсодержащий газ готовили смешением в стеклянной калиброванной емкости кислорода и азота. Анализ кислородсодержащего газа осуществляли методом газожидкостной хроматографии на колонке длиной 3 м и внутренним диаметром 4 мм, изготовленной из нержавеющей стали. Неподвижная фаза – сложный эфир триэтиленглиголя и *н*-масляной кислоты ТЭГН, нанесенный на твердый носитель – ИНЗ-600, 8% от его массы. Детектор пламенно-ионизационный. Температура испарителя 30 °С, температура колонки 20 °С, температура детектора 60 °С. Скорости подачи аргона и воздуха – такие же, как и при анализе продуктов окисления 3-метилбутаналя.

В качестве катализаторов были испытаны соли марганца и калия как наиболее доступные и важные для промышленного применения. В присутствии соединений Mn^{2+} и ацетата калия выход 3-метилбутановой кислоты не превышал 65% из-за недостаточной активности этих катализаторов. Более высокие результаты были достигнуты при проведении реакции (1) в гетерофазной системе жидкость – жидкость в присутствии раствора NaOH. Поэтому все дальнейшие исследования выполнялись в его присутствии.

Было изучено влияние температуры, состава кислородсодержащего газа и концентрации исходного 3-метилбутаналя на скорость реакции его окисления. Температура оказывала существенное влияние на характер протекания реакции (табл. 1). В интервале температур 20–40 °С, хотя окисление альдегида C_5 и протекало с высокой селективностью (93–96%), конверсия 3-метилбутаналя не превышала 53%. Из побочных продуктов его окисления были идентифицированы надкислота C_5 и продукты конденсации – ВКП, образующиеся согласно уравнений (2) и (3).

$$C_4H_9CHO + O_2 \rightarrow C_4H_9CO_3H; \quad (2)$$

$$2C_4H_9CHO + O_2 \rightarrow C_{10}H_{18}O + H_2O. \quad (3)$$

Более высокие показатели по конверсии (95%) и селективности (86%) наблюдались при 80 °С. Повышение концентрации кислорода в кислородсодержащем газе с 20,9 до 65,9% об. (табл. 2) приводило к ускорению реакции. Одновременно возрастают и скорости побочных реакций (2) и (3), которые понижают селективность по целевому продукту, – 3-метилбутановой кислоте с 91 до 80%. Селективность по 3-метилбутановой кислоте практически не изменяется при увеличении начальной концентрации исходного альдегида с 28,3 до 74% мас. в загрузке (табл. 3). Независимость конверсии альдегида C_5 от его начальной концентрации в загрузке (органиче-

Таблица 1

Влияние температуры на скорость и селективность окисления 3-метилбутаналя кислородсодержащим газом в присутствии 10% водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1: 1. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл альдегида C_5 . Время реакции – 90 мин, скорость подачи кислородсодержащего газа 8 дм^3/ч; [O2] в кислородсодержащем газе 20,9% об.

Температура, °С	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия, %	Селективность по 3-метилбутановой кислоте, %
	гексан	альдегид C_5	надкислота C_5	3-бутил-бутановая кислота	ВКП		
20	44,3	31,0	0,8	23,8	0,1	40	96
40	43,7	24,5	1,9	29,6	0,3	52	93
60	42,7	11,9	3,4	41,3	0,7	76	91
80	41,9	2,4	2,6	47,9	4,9	95	86

Таблица 2

Влияние состава кислородосодержащего газа на скорость и селективность реакции окисления 3-метилбутаналя в присутствии 10%-ного водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фазы 1: 1. Температура 60 °С. Время реакции 90 мин. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл альдегида C_5. Скорость кислородосодержащего газа 8 дм^3/ч

[O_2] в кислородосодержащем газе, % об.	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия, %	Селективность по 3-метил-бутановой кислоте, %
	гексан	альдегид C_5	надкислоты C_5	3-метил-бутановая кислота	ВКП		
20,9	42,7	11,9	3,0	41,3	1,1	76	91
49,3	42,2	5,9	4,5	45,2	2,2	88	87
65,9	41,7	0,5	6,7	46,2	4,9	99	80

Таблица 3

Влияние концентрации исходного альдегида на скорость и селективность реакции окисления 3-метилбутаналя кислородосодержащим газом в присутствии 10%-ного водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1: 1. Объем загрузки жидкой фазы (органической слой) 280 мл. Время реакции – 90 мин; скорость подачи кислородосодержащего газа 8 дм^3/ч [O_2] в кислородосодержащем газе 20,9% об. Температура 60 °С

[альдегид C_5], % мас. в загрузке	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия альдегида C_5, %	Селективность по 3-метилбутановой кислоте, %
	гексан	альдегид C_5	надкислоты C_5	3-метилбутановая кислота	ВКП		
22,8	68,9	7,3	1,3	22,1	0,4	73	93
53,8	42,7	11,9	3,4	41,3	0,7	76	91
74,6	22,5	16,6	4,9	55,4	0,6	75	92

ский слой) указывает на первый порядок реакции окисления 3-метилбутаналя по исходному альдегиду [19].

Выводы

1. Найдены приемлемые условия синтеза 3-метилбутановой кислоты окислением 3-метилбутаналя в присутствии водного раствора NaOH, обеспечивающие выход целевого продукта более 80% .

2. Реакция окисления 3-метилбутаналя в исследованных условиях имеет первый порядок по альдегиду в интервале его концентраций 22,8–74,6% мас. и положительный порядок по кислороду.

Библиографический список

1. *Пронченко Г. Е.* Лекарственные растительные средства / Под ред. А. П. Арзамасцева, И. А. Самылиной. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2002. 288с.

2. *Войткевич С. А.* 865 душистых веществ для парфюмерии и бытовой химии. М.: Пищевая промышленность, 1994. 594 с.

3. *Kurilovich Y.* Extraction of metals by means of easy melting organic substances and its analytical application // ISES 99: Int. Solvent Extract. / Conf. Solvent Extraction for 21th century. Barcelona, 1999. P. 281.

4. *Tetsuyoshi N., Hiromichi Y.* Influence molecules long chain of carboxylic acids and alcohols on extraction Cu^{2+} acids using alcohols as

solvent // Bull. Chem. Soc. Jap. 2000. V. 7. N 1. P. 107–113.

5. Заявка 2740334 Франция. МКИ A61, K7/48, 7/15. Косметические составы, содержание моноэфиры C_4–C_{10} кислот и C_{16}–C_{18} кислот / B. Lavand, S. Oreal.; заявл. 25.10.95; опубл. 30.04.97. 5 с.

6. Заявка 19601104 Германия. МПК^6 A61K7/44. Косметические и дерматологические составы, содержащие производные триазина и алканкарбоновые кислоты / H. Gers-Berlag, R. Kroper; заявл. 13.01.96; опубл. 17.07.97. 6 с.

7. Способ получения жидких мыльных и аэрозольных кремов для бритья с пониженным расходом энергии // SOFW Journal. 1989. V. 115. N 56. P. 557–578.

8. *Береснев В. В., Гайфутдинова Э. К.* Сиккативы на основе карбоновых кислот, полученные озонолизом α-олефинов фракций C_{20}–C_{26} // Лакокрасочные материалы и их применение. Уфа, 1999. № 9. С. 13–14.

9. Заявка 19607824 Германия. МПК^6 C07, C 219/06, B01F, 17/18. Низкоплавкая сложноэфирная четвертичная система / O. Eypish, R. Aignez; заявл. 01.03.96; опубл. 04.09.97. 5 с.

10. А. с. 262399 ЧССР, МКИ^4 C08, 63/64. Способ получения высокомолекулярного пластификатора / J. Kroupa, T. Vogel; заявл. 27.05.88; опубл. 15.06.89. 5 с.

11. Заявка 2315761 Великобритания. МПК^6 C11 3/00, C11 3/10. Моющие средства, содержащие источники кислот и щелочей / R. G. Hail, C. M. Vermote; заявл. 31.07.96; опубл. 11.02.98. 5 с.

12. *Голодников Г. В., Мандельштам Т. В.* Практикум по органическому синтезу / Под ред. К. А. Оглоблина. Л.: Ленинградский ун-т, 1976. 376 с.

13. *Племенков В. В.* Химия изопреноидов. Гл. 4. Гемитерпены // Химия растительного сырья. 2005. № 4. С. 93–103.

14. *Ганкин В. Ю., Гуревич Г. С.* Технология оксосинтеза. Л.: Химия, 1981. 272 с.

15. Заявка 1201637 ЕПВ, МПК-1 C07, C51/27; заявл. 24.10.01; опубл. 02.06.02. 5 с.

16. *Debashic C., Ravikumap G., Payal M.* // Tetrahedron Lett. 2009. V. 50. N 47. P. 6553–6556.

17. Заявка 10200455252 Германия, МПК^7 C07 C5235, B01J 31/04; заявл. 16.11.04; опубл. 24.05.06. 5 с.

18. *Ганкин В. Ю., Рудковский В. М., Рыбаков В. А.* Выбор кинетической области реакции окисления н-гексаналя в двухфазной системе жидкость – жидкость. ЖПХ. 1971. Т. 6. С. 1347–1351.

19. *Проскуряков В. А., Потехин В. М.* Окисление *н*-петаналя в водно-щелочной среде // Прикладная химия. 1996. Т. 39. № 80. С. 2389–2393.

20. *Денисов Е. Т.* Химическая кинетика. М.: Наука, 2000. 565 с.

УДК 664. 1

В. Я. Мищенко*
кандидат технических наук, доцент
Е. В. Мищенко**
кандидат технических наук, доцент
**Юго-Западный государственный университет*
***Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина*

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ

В статье рассматривается применение комбинированного (вибрационного и ультразвукового) воздействия для интенсификации процесса экстрагирования растительного сырья.

Ключевые слова: *вибрация, виброударное воздействие, кавитация, ультразвук, экстрагирование.*

V. Y. Mishchenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. V. Mishchenko**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Southwest State University*
***Orel State Agrarian University*

THE APPLICATION OF THE COMBINED VIBRATION EFFECTS IN THE EXTRACTION PROCESS

The article discusses the use of the combined (vibration and ultrasound) effects to intensify the extraction process of plant materials.

Keywords: *vibration, vibration impact, cavitation, ultrasound, extraction.*

В настоящее время вибрационные методы интенсификации технологических процессов получают все более широкое распространение. Это обусловлено тем, что при использовании вибрационного воздействия на обрабатываемые материалы (твердые, жидкие, газообразные) повышаются производительность оборудования, уменьшается энергонапряженность процесса, значительно снижаются эксплуатационные затраты и улучшаются санитарно-гигиенические условия труда. В биотехнологической, пищевой, перерабатывающей промышленности вибрационная техника применяется для интенсификации таких процессов, как транспортирование и дозирование материалов, разделение смеси по фракциям, измельчение и уплотнение, фильтрование, перемешивание, экстракция и др. [1–8].

Способы выделения активных (биологически активных) веществ из растительного сырья, в частности лекарственных растений, методом экстракции как надземной, так и подземной частей этих растений широко известны в химико-фармацевтической, косметической, пищевой отраслях промышленности и медицине. Обычные способы, применяемые в фитохимической промышленности, основаны на экстракции из измельченных растений или растительных организмов водой или паром, органическим растворителем или смесью воды и органических растворителей, таких как вода и спирты. Включение стадии мацерации также хорошо известно в данной области. Наконец, отделение водного экстракта от твердой фазы осуществляется обычными способами, такими как декантация, центрифугирование или фильтрация. Также могут применяться дополнительные химические обработки для модификации структуры соединений, находящихся в растениях. Однако применение таких способов имеет довольно низкую эффективность и не способствует наиболее полному извлечению активных веществ из растительного сырья.

Авторами была разработана технология экстрагирования водорастворимых веществ из растительного сырья путем обработки водных суспензий с одновременным воздействием виброударного нагружения и ультразвукового воздействия на обрабатываемую среду.

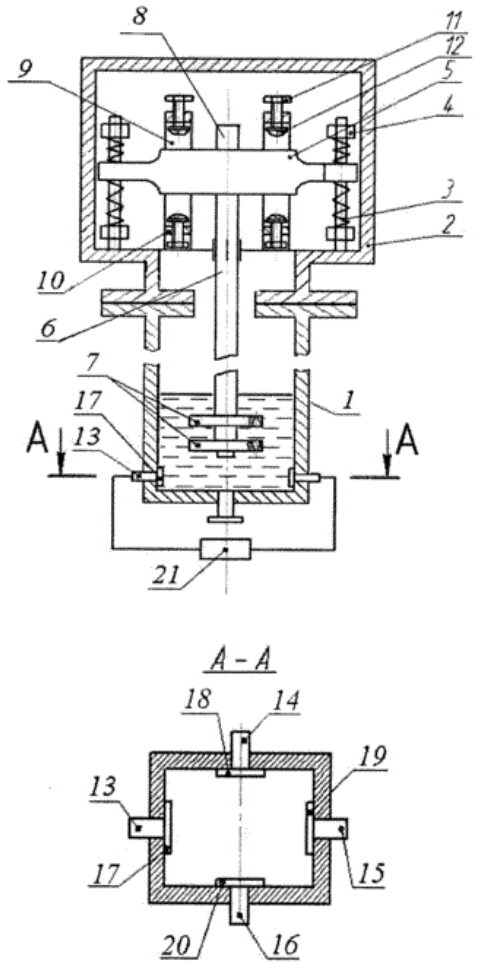


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – рабочая камера; 2 – корпус; 3 – регулирующие гайки; 5 – вибрирующая рама; 6 – рабочий орган; 7 – перфорированные диски; 8 – возбудитель колебаний; 9 – направляющие; 10 – кронштейн; 11 – регуляторы зазора; 12 – ограничители; 13, 14, 15, 16 – пьезокерамические преобразователи; 17, 18, 19, 20 – излучающие пластины; 21 – система питания

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки [9].

Установка состоит из вибрационного модуля, создающего виброударный режим, и модуля для возбуждения ультразвуковых колебаний. При виброударном воздействии на камеру рабочей смеси сообщается турбулентное движение, при этом происходит интенсификация обменных процессов на границах раздела фаз и равномерное распределение смеси по рабочему объему. Одновременно с наложением виброударного нагружения происходит излучение ультразвуковой энергии от излучающих пластин в обрабатываемый раствор, и в звуковой акустической волне образуются кавитационные пузырьки, при захлопывании которых выделяется значительное количество энергии.

Были проведены экспериментальные исследования по извлечению сахарозы из растительного сырья [10], в качестве которого использовались плоды рябины обыкновенной, собранные в Орловской области в осенний период после заморозков и предварительно высушенные. В качестве экстрагента применялась дистиллированная вода. Экстрагирование проводили при одновременном воздействии полигармонического вибрационного воздействия с частотой 15–50 Гц и ультразвуковом воздействии с частотой 22 кГц и интенсивностью излучения 1 Вт/см^2 при температуре 60 и 76 °С. На рис. 2 приведены зависимости процентного извлечения сахарозы от времени воздействия при различной температуре.

Одновременно с наложением вибрации происходит излучение ультразвуковой энергии от излучающих пластин, установленных на внутренней поверхности реактора, в рабочий раствор, при этом в звуковой акустической волне

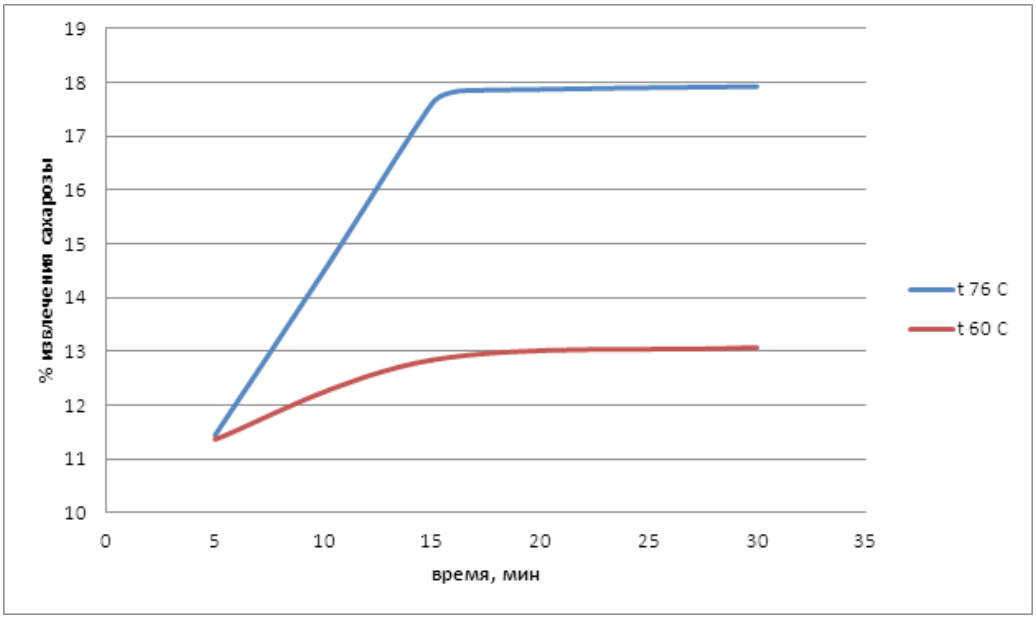


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований

образуются кавитационные пузырьки, при захлопывании которых выделяется значительное количество энергии. За счет резонанса амплитуда колебаний дисперсных включений резко усиливается, происходит дробление дисперсной фазы (пузырьков, капель), увеличиваются коэффициенты массообмена, ускоряются диффузионные процессы в гетерогенных химических реакциях. Все это приводит к интенсификации реакционных и массообменных процессов и повышению выхода целевого продукта.

Библиографический список

1. *Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Яцун С. М.* Исследование процесса фильтрации жидких сред через пористую поверхность при вибрационных воздействиях // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 5. С. 67–74.

2. *Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Использование вибрационного воздействия в процессах массообмена // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № 5. С. 99–101.

3. *Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Влияние вибрационного воздействия на процесс экстракции в пищевой промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 4. С. 70–72.

4. *Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Вибрационное экстрагирование пектиновых веществ из свекловичного жома // LAP Lambert Academic Publishing. 92 с.

5. *Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Новые подходы к проектированию вибрационного технологического оборудования в пищевой и перерабатывающей промышленности // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4 (52). С. 116–121.

6. *Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Вибрационная техника в пищевой и перерабатывающей промышленности: учеб. пособие / Курский гос. техн. ун-т. Курск, 2009. 148 с.

7. *Мищенко В. Я., Мищенко Е. В., Егельский И. В.* Мехатронные вибрационные системы для перемешивания дисперсных сред // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: Сб. науч. трудов Междунар. научно-технической конф. Курск: Университетская книга, 2017. С. 42–45.

8. *Mishchenko E. V.* Use of ultrasound for the extraction of components from plant materials – a review // Vestnik OrelGAU. 2015. № 2 (53). С. 51–61.

9. Патент на полезную модель № 154888, Россия. МПК B01J 19/10.10.09. 2015, БИ № 25. Устройство для интенсификации реакционных и массообменных процессов. № 2014148451/05; заяв. 01.12.2014; опубл. 10.09.2015; бюл. № 25. 5 с.

10. *Мищенко В. Я., Мищенко Е. В.* Исследование кинетики процесса экстрагирования растворимых веществ из плодов рябины // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 2. С. 352–357.

УДК 621.01, 519.7

А. И. Полунин*
кандидат технических наук, профессор
**Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова*

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ НА ОПОРАХ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОЛЬЦА

В статье осуществляется анализ математических моделей, используемых при расчете динамики вращающегося на опорах крупногабаритного кольца для выбора технологических режимов процесса его формообразования. Рассматриваются подходы, основанные на гипотезе нерастяжимой и растяжимой средней линии кольца. Анализируются сложности, возникающие при использовании гипотезы нерастяжимой средней линии. Рассматриваются результаты расчетов по модели, использующей гипотезу растяжимой средней линии, в которой скорость вращения кольца считается постоянной, и по модели, учитывающей динамику привода и углового движения кольца. Приведены результаты расчетов по этим моделям.

Ключевые слова: *уравнения вращающегося на опорах кольца, динамика вращающегося на опорах кольца, мобильная технология обработки крупногабаритных колец, прецессионное движение стоячих волн во вращающемся кольце.*

A. I. Polunin*
PhD Sc. Tech., Professor
**Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*

COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS OF DYNAMICS ROTATING ON A SUPPORT OF A LARGE-SIZE RING

The article analyzes the mathematical models used in the calculation of the dynamics of a large-sized ring rotating on supports to select the technological modes of the process of its formation. The approaches based on the hypothesis of inextensible and tensile center line of the ring are considered. The difficulties arising from the use of the inextensible midline hypothesis are analyzed. The results of calculations are considered using a model that uses the hypothesis of a tensile centerline, in which the ring rotation speed is considered constant, and a model that takes into account the dynamics of the drive and the angular motion of the ring. The results of calculations for these models are given

Keywords: *equations of rotating on ring supports, dynamics of rotating on ring supports, mobile technology for processing large-sized rings, precessional motion of standing waves in a rotating ring.*

Одним из способов обработки крупногабаритных колец, оболочек с целью придания им требуемой формы является использование мобильной технологии. В этом случае тело ставится в вертикальной плоскости на два опорных ролика, приводится во вращение электроприводом и обрабатывается приставным станочным модулем (рис. 1). В процессе такой обработки возникают колебания тела вследствие возмущающих факторов, влияющие на качество формообразования, что необходимо учитывать при выборе технологических режимов обработки. Осуществить это можно только используя математическую модель динамики кольца и процесса формообразования для каждого конкретного случая.

В настоящее время существуют два подхода к математическому моделированию динамики вращающихся на опорах колец и оболочек при их обработке по мобильной технологии [1]–[11]. В первом используется гипотеза нерастяжимой средней линии для кольца и срединной поверхности для оболочки, а во втором – что они растяжимы. В обоих случаях получают систему линейных дифференциальных уравнений.

При использовании гипотезы нерастяжимой средней линии, широко применяемой в теории упругости для невращающегося кольца, осуществляют линеаризацию уравнения нерастяжимости средней линии кольца и получают уравнения связи между радиальным и тангенциальным перемещениями точек средней линии кольца. Величины этих перемещений наиболее удобно описывать рядом Фурье, что позволяет свести систему уравнений в частных произво-

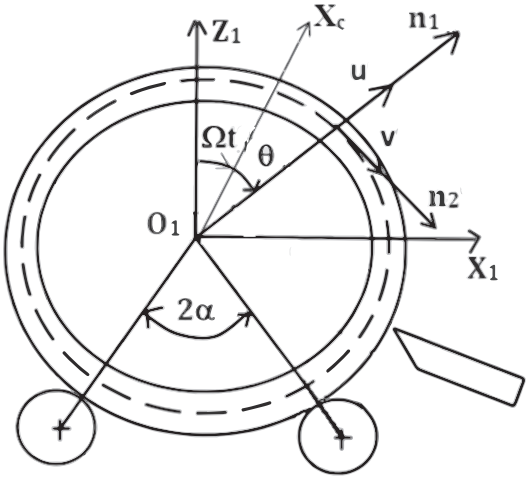


Рис. 1. Схема обработки

дных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с обобщенными координатами. Подставляя полученные линеаризацией обобщенные координаты в уравнение Лагранжа, получают дифференциальные уравнения поведения кольца в обобщенных координатах. Такой подход позволяет легко учесть уравнение связи между переменными и дает хорошую точность в задачах теории упругости для невращающихся колец. Применение его для вращающихся дает парадокс, заключающийся в том, что получаемая система уравнений является меньше по числу переменных, а следовательно, и проще, чем полученная с использованием гипотезы растяжимой средней линии. В то время как наличие связей на переменные всегда усложняет решение задачи.

Некорректность такого подхода заключается в том, что правильным является линеаризация условия связи только после подстановки его в дифференциальное уравнение динамики кольца [12]. Это может дать принципиальные ошибки в решении поставленной задачи. Исследования по влиянию такой некорректности на точность получаемого решения динамики вращающегося кольца с опорами в имеющихся научных работах отсутствуют.

Рассмотрим целесообразность применения гипотезы нерастяжимой средней линии при использовании более корректного подхода для получения уравнений динамики вращающегося на опорах кольца. Радиальное U и тангенциальное V перемещение точек кольца с радиусом средней линии r_0 запишем с использованием базисных функций

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_{ui}\cos\left(i\left(\theta+\varphi_{uj}\right)\right) + \sum_{i=1}^{N} b_{ui}\sin\left(i\left(\theta+\varphi_{uj}\right)\right), \quad (1)$$

$$V = \sum_{i=1}^{N} a_{vi}\cos\left(i\left(\theta+\varphi_{vj}\right)\right) + \sum_{i=1}^{N} b_{vi}\sin\left(i\left(\theta+\varphi_{vj}\right)\right). \quad (2)$$

Здесь обобщенными координатами являются коэффициенты ряда Фурье $a_0(t)$, $a_{ui}(t)$, $b_{ui}(t)$, $a_{vi}(t)$, $b_{vi}(t)$ (i=1, 2, ..., N); t – время; переменная θ задает угловую координату точки средней линии кольца. Функции $\varphi_{ui}(t)$, $\varphi_{vi}(t)$ – задают прецессию стоячей волны, возникающей вследствие действия возмущений. Для них имеем $\dot{\varphi}_{ui} = -\Omega$, $\dot{\varphi}_{vi} = -\Omega$, ($i$=1, 2, ..., N), где Ω – угловая скорость вращения кольца [13].

Условие нерастяжимости средней линии имеет вид:

$$S = 2r_0\left(V'+U\right)+\left(V'+U\right)^2+\left(V-U'\right)^2 = 0. \quad (3)$$

При подстановке в это уравнение выражений для U, V и их производных по θ получим функцию, зависящую от обобщенных координат и угла θ, в то время как уравнения динамики кольца зависят только от обобщенных координат и не зависят от угла θ. Для исключения из условия связи угла θ используем следующий прием. Выражение (3) тождественно равно нулю на фазовых траекториях кольца при любых значениях обобщенных координат и угле θ. Поэтому на этих траекториях равны нулю и выражения

$$S_n = \int_0^{2\pi}\left[2r_0\left(V'+U\right)+\left(V'+U\right)^2+\left(V-U'\right)^2\right]d\theta = 0, \quad (4)$$

$$S_{ci} = \int_0^{2\pi}\left[2r_0\left(V'+U\right)+\left(V'+U\right)^2+\left(V-U'\right)^2\right]\times \cos\left(i\theta\right)d\theta = 0, \quad (5)$$

$$S_{si} = \int_0^{2\pi}\left[2r_0\left(V'+U\right)+\left(V'+U\right)^2+\left(V-U'\right)^2\right]\times \sin\left(i\theta\right)d\theta = 0, \quad (6)$$

(i=1, 2, ..., N).

Эти зависимости содержат обобщенные координаты, и в них отсутствует угол θ. Таким образом, вместо одного уравнения связи получили $2N+1$ условий связи. Обозначим их левые части соответственно векторами S_C, S_S, а уравнения $S_{ci} = 0$, $S_{si} = 0$, (i=1, 2, ..., N).

Докажем, что получаемая система уравнений поведения кольца в обобщенных координатах с уравнениями связи (4), (5), (6) эквивалентна исходной системе уравнений в частных производных.

Равенство $S = 0$ выполняется на всех траекториях координат $U(t)$, $V(t)$. При замене этих переменных обобщенными координатами получим

$$S\left(a_0(t), a_u(t), b_u(t), a_v(t), b_v(t), \theta\right) = 0, \quad (7)$$

где $a_u(t), b_u(t), a_v(t), b_v(t)$ – вектора введенных обобщенных координат.

На всех траекториях $a_0(t)$, $a_u(t)$, $b_u(t)$, $a_v(t)$, $b_v(t)$ – решениях уравнений динамики кольца равенство (7) выполняется для любого t и θ.

Допустим, на каком-то интервале θ равенство (7) не выполняется, то есть не равно нулю. Тогда эту функцию, как периодическую на интервале $0 - 2\varpi$, можно разложить в ряд Фурье, используя систему ортогональных функций *sin(iθ), cos(iθ) (i=1, 2, ..., N)*. Коэффициенты этого разложения равны

$$a_{si} = \int_0^{2\pi} S\cos(i\theta)d\theta,\ b_{si} = \int_0^{2\pi} S\sin(i\theta)d\theta,\ c_0 = \int_0^{2\pi} Sd\theta, \quad (8)$$

и какие-то из них не должны быть равны нулю. Но выражения (8) совпадают с (4)–(6), из равенства нулю которых находим решение уравнений динамики кольца с опорами в обобщенных координатах. Отсюда следует, что новые условия связи (4)–(6) правильно учитывают нерастяжимость средней линии при использовании обобщенных координат для описания динамики вращающегося на опорах кольца. В этом случае уравнения динамики вращающегося на опорах кольца в обобщенных координатах имеют вид:

$$A_2\ddot{W} + A_1\dot{W} + A_0 W = M_H\lambda_H + M_0\lambda_0 + Q, \quad (9)$$

$$S_n = a_0^2 + 2r_0a_0 + 0{,}5\sum_{i=1}^{N}\left(1+i^2\right)[a_{ui}^2 + b_{ui}^2 + a_{vi}^2 + b_{vi}^2] + $$

$$+2\sum_{i=1}^{N}[ia_{ui}b_{vi} - ia_{vi}b_{ui}] = 0; \quad (10)$$

$$S_{ci} = 2\pi r_0\left(b_{ui} - a_{vi}i\right)\sin\left(i\varphi_{vi}\right) + 2\pi r_0\left(ib_{vi} + a_{ui}\right)\times$$

$$\times\cos\left(i\varphi_{vi}\right) + 2\pi a_0\left(ib_{vi} + a_{ui}\right)\cos\left(i\varphi_{vi}\right) + $$

$$+2\pi a_0\left(b_{ui} - ia_{vi}\right)\sin\left(i\varphi_{vi}\right) = 0; \quad (11)$$

$$S_{si} = 2\pi r_0\left(b_{ui} - ia_{vi}\right)\cos\left(i\varphi_{vi}\right) - 2\pi r_0\left(ib_{vi} + a_{ui}\right)\times$$

$$\times\sin\left(i\varphi_{vi}\right) + 2\pi a_0\left(b_{ui} - ia_{vi}\right)\cos\left(i\varphi_{vi}\right) - $$

$$-2\pi a_0\left(ib_{vi} + a_{ui}\right)\sin\left(i\varphi_{vi}\right) = 0, \quad (12)$$

$$(i=1, ..., N);$$

$$S_{01} = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_{ui}\cos\left(i\left(\pi - \alpha\right)\right) + $$

$$+\sum_{i=1}^{N} b_{ui}\sin\left(i\left(\pi - \alpha\right)\right) = 0, \quad (13)$$

$$S_{02} = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_{ui}\cos\left(i\left(\pi + \alpha\right)\right) + $$

$$+\sum_{i=1}^{N} b_{ui}\sin\left(i\left(\pi + \alpha\right)\right) = 0. \quad (14)$$

Здесь

$$W^T = [a_0, a_{u1}\ldots a_{un}\ \ b_{u1}\ldots b_{un}\ \ a_{v1}\ldots a_{vn}\ \ b_{v1}\ldots b_{vn}];$$

A_1, A_2, A_3 – матрицы размера $(4N+1)\times(4N+1)$; M_H – матрица размера $(4N+1)\times(2N+1)$ частных производных условий связи вследствие нерастяжимости средней линии S_n, S_{Ci}, S_{Si} по вектору W; M_0 – матрица $4N\times 2$ частных производных условий связи S_{01}, S_{02}, обусловленных наличием опор, по вектору W; S_{01}, S_{02} _ условия нулевых радиальных перемещений кольца на двух опорах; 2α – угол между опорами; λ_H, λ_0 – неопределенные множители Лагранжа; Q – вектор обобщенных внешних сил.

Условия связи (11)–(14) дают линейные зависимости между обобщенными координатами. Формулы (11)–(12) справедливы для разных φ_{vi} при выполнении условий $a_{vi} = i^{-1}b_{ui}$, $b_{vi} = -i^{-1}a_{ui}$, что совпадает с условиями, используемыми при получении упрощенной системы уравнений динамики вращающегося на опорах кольца. Условие связи (10) является нелинейным по всем обобщенным координатам, это усложняет получение решения. Нелинейность вносит и матрица M_H уравнения (9). Таким образом, использование гипотезы нерастяжимости средней линии при получении более точного решения не дает упрощения в решении задачи математического моделирования динамики вращающегося на опорах кольца по сравнению с растяжимой средней линией, а только усложняет ее.

При использовании гипотезы растяжимой средней линии возможны два подхода. Первый использует предположение, что тело вращается с постоянной скоростью, то есть изменение формы тела из-за колебаний, наличие сил резания в процессе формообразования не влияют на угловую скорость вращения. При втором подходе учитывается динамика угловой скорости вращения якоря электропривода и динамика углового вращения кольца вследствие действия сил резания и возмущающих сил.

Динамика вращающегося на опорах кольца описывается уравнениями в частных производных, получение которых и их решение проблематично по причине наличия опор и действия сил резания. Поэтому используем переход к системе обыкновенных дифференциальных уравнений путем введения базисных функций – ряда Фурье. В случае использования гипотезы растяжимой средней линии радиальные и тангенциальные перемещения точек средней линии кольца задаем соответственно в виде (1), (2).

Поскольку в точках опор радиальные перемещения U равны нулю, имеем условия связи на обобщенные координаты (13), (14).

Кроме обобщенных координат, коэффициентов ряда Фурье зададим координату x_p перемещения упругого станочного модуля.

Для получения уравнений динамики вращающегося на опорах кольца используем уравнение Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_j}+\frac{\partial Ð}{\partial q_j}=\sum_{i=1}^{2}\lambda_i f_{ij}+G_j,$$

где $T=T_к+T_с$ – кинетическая энергия кольца и станочного модуля; $П$ – потенциальная энергия кольца; q_j – j-я обобщенная координата; λ_i – неопределенные множители Лагранжа; f_{ij} – производная i-го условия связи S_{0i} по j-й координате q_j; G_j – обобщенная сила, действующая по j-й обобщенной координате q_j.

Кинетическую энергию кольца вычисляем по формуле

$$T_к=\frac{r\rho F}{2}\int_0^{2\pi}\left[\left(\dot{V}+\dot{U}r+\dot{U}U\right)^2+\left(\dot{U}-\dot{U}V\right)^2\right]d\theta,$$

где r,ρ,F – соответственно радиус средней линии кольца толщиной h; удельная плотность материала; площадь поперечного сечения.

Кинетическая энергия станочного модуля

$$T_с=\frac{m_с\dot{X}_P^2}{2},$$

где m_c – масса станочного модуля; $\dot{X}_P$ – скорость движения станочного модуля и резца.

В выражении потенциальной энергии $П=П_к+П_с$, , $П_к=П_1+П_2$ для изгиба кольца и растяжения соответственно имеем

$$П_1=\frac{\mu}{2}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\partial V}{\partial\theta}-\frac{\partial^2U}{\partial\theta^2}\right)^2d\theta,\ П_2=\frac{\nu}{2}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\partial V}{\partial\theta}+U\right)^2d\theta,$$

для потенциальной энергии станочного модуля

$$П_с=\frac{K_с X_p^2}{2},$$

где $\mu=\frac{EI}{r^3}$; $\nu=\frac{EF}{r}$; E – модуль упругости Юнга; I – момент инерции сечения кольца; K_c – коэффициент упругости станочного модуля; X_P – линейная координата перемещения резца и станочного модуля в радиальном направлении при формообразовании кольца.

Величину силы резания в радиальном направлении определяем по формуле [14]

$$P_R=10C_p^p t_R^{XP}S^{YP}V^{np},$$

а в тангенциальном

$$P_T=10C_p^T t_R^{XT}S^{YT}V^{nT},$$

где t_R – глубина резания; S – величина подачи; V – скорость резания; $C_p^p,XP,YP,nP,C_p^T,XT,YT,nT$ – коэффициенты.

Для глубины резания получим

$$t_R=t_{R0}+U(t,\theta_R)+X_P, \qquad (15)$$

где t_{R0} – расчетная глубина резания; $U(t,\theta_R)$ – радиальное перемещение кольца в месте расположения резца; X_P – перемещение резца вследствие упругости станочного модуля.

Величины силы резания в радиальном и тангенциальном направлениях обозначим соответственно $P_R(t_R),P_\tau(t_R)$. Для величины их элементарной работы в соответствии с (1), (2), (15) получим

$$\delta A^0=\delta A_R^0+\delta A_\tau^0=-P_R\left(\delta X_P+\delta U(\theta_R)\right)-P_\tau\delta V(\theta_R)=$$

$$=-P_R\delta X_P-P_R\delta a_0-\sum_{j=1}^{N}P_R\delta a_{uj}\cos\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{uj}\right)\right)-$$

$$-\sum_{j=1}^{N}P_R\delta b_{uj}\sin\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{uj}\right)\right)-$$

$$-\sum_{j=1}^{N}P_\tau\delta a_{vj}\cos\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{vj}\right)\right)-$$

$$-\sum_{j=1}^{N}P_\tau\delta b_{vj}\sin\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{vj}\right)\right).$$

Тогда формулы для обобщенных сил резания, действующих по обобщенным координатам в радиальном направлении, – верхний индекс R; в тангенциальном – индекс τ имеют вид:

$$Q_{XP}^R=-P_R,\ Q_{a0}^R=-P_R,\ Q_{auj}^R=$$

$$=-P_R\cos\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{uj}\right)\right);$$

$$Q_{buj}^R=-P_R\sin\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{uj}\right)\right);$$

$$Q_{avj}^\tau=-P_\tau\cos\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{uj}\right)\right);$$

$$Q_{bvj}^\tau=-P_\tau\sin\left(j\left(\theta_R+\Omega t+\varphi_{vj}\right)\right).$$

Действие возмущающей силы на колебания кольца, дополнительной к силе резания, задано отклонением ее сторон от параллельности

$$a_1=\sum_{i=1}^{N}\left[a_{1i}\cos(i\theta)+b_{1i}\sin(i\theta)\right],$$

$$a_2=\sum_{i=1}^{N}\left[a_{2i}\cos(i\theta)+b_{2i}\sin(i\theta)\right].$$

Ширина кольца равна $a=a_1+a_0+a_2$, где a_0 – расчетная постоянная ширина кольца.

Используя эти зависимости, получим окончательную систему уравнений формообразования кольца при постоянной скорости его вращения с исключенными неопределенными множителями и учтенными условиями связи

$$\ddot{a}_0-\frac{1}{2\cos(\pi-\alpha)}\ddot{a}_{u1}+\frac{K_T\nu}{\chi}\dot{a}_0-\frac{K_T(\mu+\nu)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}\dot{a}_{u1}+$$

$$+\frac{\Omega}{\cos(\pi-\alpha)}\dot{b}_{u1}++\frac{\Omega}{\cos(\pi-\alpha)}\dot{a}_{v1}-$$

$$-\frac{K_T(\mu+\nu)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}\dot{b}_{v1}+\frac{\left(\nu-\chi\Omega^2\right)}{\chi}a_0-\frac{\left(\nu+\mu-2\chi\Omega^2\right)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}a_{u1}+$$

$$+\frac{K_T\Omega(\mu+\nu)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}b_{u1}-\frac{K_T\Omega(\mu+\nu)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}a_{v1}-$$

$$-\frac{\left(\nu+\mu+2\chi\Omega^2\right)}{2\chi\cos(\pi-\alpha)}b_{v1}=\Omega^2 r+\frac{P_R}{2\pi\chi}\left(\frac{\cos(\theta_R)}{\cos(\pi-\alpha)}-1\right);$$

$$c_j\ddot{a}_{u1}+\ddot{a}_{uj}+K_T c_j\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{a}_{u1}+K_T\frac{\left(\mu j^4+\nu\right)}{\chi}\dot{a}_{uj}-$$

$$-2\Omega c_j\dot{b}_{u1}-2\Omega j\dot{b}_{uj}-2\Omega c_j\dot{a}_{v1}-2\Omega\dot{a}_{vj}+K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_j\dot{b}_{v1}+$$

$$+K_T j\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}\dot{b}_{vj}+\frac{\left(\nu+\mu-2\chi\Omega^2\right)}{\chi}c_j a_{u1}+$$

$$+\frac{\left(\nu+\mu j^4-\chi\Omega^2\left(1+j^2\right)\right)}{\chi}a_{uj}-K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_j b_{u1}-$$

$$-K_T\Omega j\frac{\left(\mu j^4+\nu\right)}{\chi}b_{uj}+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_j a_{v1}+$$

$$+K_T\Omega j^2\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}a_{vj}+\frac{\left(\nu+\mu+2\chi\Omega^2\right)}{\chi}c_j b_{v1}+$$

$$+j\frac{\left(\nu+\mu j^2+2\chi\Omega^2\right)}{\chi}b_{vj}=-\frac{P_R}{\pi\chi}\left(c_j\cos(\theta_R)+\cos(j\theta_R)\right);$$

$$s_j\ddot{b}_{u1}+\ddot{b}_{uj}+2\Omega s_j\dot{a}_{u1}+2\Omega j\dot{a}_{uj}+K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_j\dot{b}_{u1}+$$

$$+K_T\frac{\left(\mu j^4+\nu\right)}{\chi}\dot{b}_{uj}-K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_j\dot{a}_{v1}-K_T j\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}\dot{a}_{vj}-$$

$$-2\Omega s_j\dot{b}_{v1}-2\Omega\dot{b}_{vj}+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_j a_{u1}+$$

$$+K_T j\Omega\frac{\left(\mu j^4+\nu\right)}{\chi}a_{uj}+\frac{\left(\nu+\mu-2\chi\Omega^2\right)}{\chi}s_j b_{u1}+$$

$$+\frac{\left(\nu+\mu j^4-\chi\Omega^2\left(1+j^2\right)\right)}{\chi}b_{uj}-\frac{\left(2\chi\Omega^2+\nu+\mu\right)}{\chi}s_j a_{v1}-$$

$$-j\frac{\left(2\chi\Omega^2+\nu+\mu j^2\right)}{\chi}a_{vj}+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_j b_{v1}+$$

$$+K_T\Omega j^2\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}b_{vj}=-\frac{P_R}{\pi\chi}\left(s_j\sin(\theta_R)+\sin(j\theta_R)\right),$$

$$(j=2,3,\ldots,N-1);$$

$$c_N\ddot{a}_{u1}+W_1\ddot{p}+K_T c_N\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{a}_{u1}+K_T\frac{\left(\mu N^4+\nu\right)}{\chi}W_1\dot{p}-$$

$$-2\Omega c_N\dot{b}_{u1}-2\Omega NW_2\dot{p}-2\Omega c_N\dot{a}_{v1}-2\Omega\dot{a}_{vN}+$$

$$+K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_N\dot{b}_{v1}+K_T N\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}\dot{b}_{vN}+$$

$$+\frac{\left(\nu+\mu-2\chi\Omega^2\right)}{\chi}c_N a_{u1}+\frac{\left(\nu+\mu N^4-\chi\Omega^2\left(1+N^2\right)\right)}{\chi}W_1 p-$$

$$-K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_N b_{u1}-K_T\Omega N\frac{\left(\mu N^4+\nu\right)}{\chi}W_2 p+$$

$$+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}c_N a_{v1}+K_T\Omega N^2\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}a_{vN}+$$

$$+\frac{\left(\nu+\mu+2\chi\Omega^2\right)}{\chi}c_N b_{v1}+N\frac{\left(\nu+\mu N^2+2\chi\Omega^2\right)}{\chi}b_{vN}=$$

$$=-\frac{P_R}{\pi\chi}\left(c_N\cos(\theta_R)+\cos(N\theta_R)\right);$$

$$s_N\ddot{b}_{U1}+W_2\ddot{p}+2\Omega s_N\dot{a}_{u1}+2\Omega NW_1\dot{p}+K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_N\dot{b}_{u1}+$$

$$+K_T\frac{\left(\mu N^4+\nu\right)}{\chi}W_2\dot{p}-K_T\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_N\dot{a}_{v1}-$$

$$-K_T N\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}\dot{a}_{vN}-2\Omega s_N\dot{b}_{v1}-2\Omega\dot{b}_{vN}+$$

$$+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_N a_{u1}+K_T N\Omega\frac{\left(\mu N^4+\nu\right)}{\chi}W_1 p+$$

$$+\frac{\left(\nu+\mu-2\chi\Omega^2\right)}{\chi}s_N b_{u1}+\frac{\left(\nu+\mu N^4-\chi\Omega^2\left(1+N^2\right)\right)}{\chi}W_2 p-$$

$$-\frac{\left(2\chi\Omega^2+\nu+\mu\right)}{\chi}s_N a_{v1}-N\frac{\left(2\chi\Omega^2+\nu+\mu N^2\right)}{\chi}a_{vN}+$$

$$+K_T\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}s_N b_{v1}+K_T\Omega N^2\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}b_{vN}=$$

$$=-\frac{P_R}{\pi\chi}\left(s_N\sin(\theta_R)+\sin(N\theta_R)\right),\ (j=2,3,\ldots,N-1);$$

$$\ddot{a}_{vj}+2\Omega\dot{a}_{uj}-K_T j\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}\dot{b}_{uj}+K_T j^2\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{a}_{vj}-$$

$$-2j\Omega\dot{b}_{vj}-K_T j^2\Omega\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}a_{uj}-j\frac{\left(2\chi\Omega^2+\left(\mu j^2+\nu\right)\right)}{\chi}b_{uj}+$$

$$+\frac{\left(j^2(\nu+\mu)-\chi\Omega^2\left(1+j^2\right)\right)}{\chi}a_{vj}-K_T j^3\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}b_{vj}=$$

$$=-\frac{P_\tau\cos(j\theta_R)}{\pi\chi};$$

$$\ddot{b}_{vj}+K_T j\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}\dot{a}_{uj}+2\Omega\dot{b}_{uj}+2j\Omega\dot{a}_{vj}+$$

$$+K_T j^2\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{b}_{vj}+j\frac{\left(\mu j^2+\nu+2\chi\Omega^2\right)}{\chi}a_{uj}-$$

$$-K_T j^2\Omega\frac{\left(\mu j^2+\nu\right)}{\chi}b_{uj}+K_T j^3\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}a_{vj}+$$

$$+\frac{\left(j^2(\nu+\mu)-\chi\Omega^2\left(1+j^2\right)\right)}{\chi}b_{vj}=-\frac{P_\tau\sin(j\theta_R)}{\pi\chi},$$

$$(j=1,2,\ldots,N-1);$$

$$\ddot{a}_{vN}+2\dot{\Omega}W_1\dot{p}-K_TN\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}W_2\dot{p}+$$

$$+K_TN^2\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{a}_{vN}-2N\dot{\Omega}\dot{b}_{vN}-K_TN^2\Omega\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}W_1p-$$

$$-N\frac{\left(2\chi\Omega^2+\left(\mu N^2+\nu\right)\right)}{\chi}W_2p+$$

$$+\frac{\left(N^2(\nu+\mu)-\chi\Omega^2\left(1+N^2\right)\right)}{\chi}a_{vN}-K_TN^3\Omega\frac{(\mu+\nu)}{\chi}b_{vN}=$$

$$=-\frac{P_\tau\cos(N\theta_R)}{\pi\chi};$$

$$\ddot{b}_{vN}+K_TN\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}W_1\dot{p}+2\dot{\Omega}W_2\dot{p}+2N\dot{\Omega}\dot{a}_{vN}+$$

$$+K_TN^2\frac{(\mu+\nu)}{\chi}\dot{b}_{vN}+N\frac{\left(\mu N^2+\nu+2\chi\dot{\Omega}^2\right)}{\chi}W_1p-$$

$$-K_TN^2\dot{\Omega}\frac{\left(\mu N^2+\nu\right)}{\chi}W_2p+K_TN^3\dot{\Omega}\frac{(\mu+\nu)}{\chi}a_{vN}+$$

$$+\frac{\left(N^2(\nu+\mu)-\chi\dot{\Omega}^2\left(1+N^2\right)\right)}{\chi}b_{VN}=-\frac{P_\tau\sin(N\theta_R)}{\pi\chi};$$

$$m_C\ddot{x}_P+K_{xP}^T\dot{x}_P+K_Cx_P=-P_R.$$

Здесь

$$P^T=\left[a_0,a_{u1},a_{u2},\ldots,a_{u,N-1},b_{u1},b_{u2},\ldots,b_{u,N-1}\right];$$

K_T – коэффициент внутреннего трения кольца.

Математическая модель поведения кольца, учитывающая динамику его углового движения и привода, содержит дополнительные элементы и фазовые переменные. Это асинхронный электродвигатель и упругая муфта, соединяющая электродвигатель и опорные ролики. Фазовые переменные задают угловую координату поворота кольца γ, его скорость Ω, угловую координату поворота ротора электродвигателя γ_g и скорость Ω_g. Считая, что кольцо вращается на опорах радиуса r_0 и с моментом инерции I_0 без проскальзывания, определяем угол поворота опорных роликов γ_0 и скорость Ω_0. Кинетическая и потенциальная энергии имеют вид:

$$T=T_K+T_0+T_g+T_c,\Pi=\Pi_K+\Pi_M+\Pi_c,$$

где T_K – кинетическая энергия колебаний кольца; T_0 – кинетическая энергия вращающихся опор; T_g – кинетическая энергия ротора двигателя; T_c – кинетическая энергия станочного модуля; Π_K – потенциальная энергия кольца; Π_M – потенциальная энергия упругой муфты; Π_c – потенциальная энергия станочного модуля.

Упругий момент, создаваемый упругой муфтой, равен

$$M_y=K_m\left(\gamma_gK_{pe\partial}^{-1}-\frac{r_R}{r_0}\gamma\right),$$

где K_m – коэффициент упругости муфты; $K_{pe\partial}$ – коэффициент передачи редуктора; $r_R=r+h/2$.

Момент силы, создаваемый электродвигателем, равен

$$M_g=\frac{K_g\left(\Omega_m-\Omega_g\right)}{1+n_g\left(\dot{\Omega}_m-\dot{\Omega}_g\right)^2},$$

где K_g,n_g – коэффициенты, характеризующие мощность двигателя; Ω_m – угловая скорость вращения магнитного поля в статоре двигателя; I_g – момент инерции ротора двигателя.

Используя эти зависимости и уравнение Лагранжа второго рода, получим систему дифференциальных уравнений динамики обрабатываемого по мобильной технологии кольца, для которого используется гипотеза растяжимой средней линии, учитывающая колебания кольца, динамику углового движения кольца, привода и станочного модуля.

$$2\pi\chi\ddot{a}_0+2\pi\left(\nu-\chi\dot{\gamma}^2\right)a_0=-P_R+2\pi\chi\dot{\gamma}^2r+\lambda_1+\lambda_2;$$

$$\pi\chi\ddot{a}_{uj}-\pi\chi jb_{uj}\ddot{\gamma}-2\pi\chi j\dot{\gamma}\dot{b}_{uj}-2\pi\chi\dot{\gamma}\dot{a}_{vj}-\pi\chi\left(1+j^2\right)a_{uj}\dot{\gamma}^2+$$

$$+2\pi\chi jb_{vj}\dot{\gamma}^2+\pi\left(\mu j^4+\nu\right)a_{uj}+\pi j\left(\mu j^2+\nu\right)b_{vj}+$$

$$+\pi\chi_Prj^{-1}\ddot{\gamma}\left[a_{Hj}\sin(j\gamma)+b_{Hj}\cos(j\gamma)\right]+$$

$$=\pi\chi_Pr\dot{\gamma}^2\left[a_{Hj}\cos(j\gamma)-b_{Hj}\sin(j\gamma)\right]-$$

$$-2\pi\chi_Pr\Omega^2\left[a_{Hj}\cos(j\gamma)+b_{Hj}\sin(j\gamma)\right]=$$

$$=-P_R\cos(j\theta_R)+\lambda_1\cos\left(j(\pi-\alpha)\right)+\lambda_2\cos\left(j(\pi+\alpha)\right);$$

$$\pi\chi\ddot{b}_{uj}+\pi\chi ja_{uj}\ddot{\gamma}+2\pi\chi j\dot{a}_{uj}\dot{\gamma}-\pi\chi\left(1+j^2\right)b_{uj}\dot{\gamma}^2-2\pi\chi\dot{\gamma}\dot{b}_{vj}-$$

$$-2\pi\chi j\dot{\gamma}^2a_{vj}+\pi\left(\mu j^4+\nu\right)b_{uj}-\pi j\left(\mu j^2+\nu\right)a_{vj}+$$

$$+\pi\chi_Prj^{-1}\ddot{\gamma}\left[a_{Hj}\cos(j\gamma)-b_{Hj}\sin(j\gamma)\right]+$$

$$+\pi\chi_Pr\dot{\gamma}^2\left[a_{Hj}\sin(j\gamma)+b_{Hj}\cos(j\gamma)\right]-$$

$$-2\pi\chi_Pr\Omega^2\left[-a_{Hj}\sin(j\gamma)+b_{Hj}\cos(j\gamma)\right]=$$

$$=-P_R\sin(j\theta_R)+\lambda_1\sin\left(j(\pi-\alpha)\right)+\lambda_2\sin\left(j(\pi+\alpha)\right);$$

$$\pi\chi\ddot{a}_{vj}-\pi\chi jb_{vj}\ddot{\gamma}-2\pi\chi j\dot{\gamma}\dot{b}_{vj}-\pi\chi\left(1+j^2\right)a_{vj}\dot{\gamma}^2+2\pi\chi\dot{a}_{uj}\dot{\gamma}-$$

$$-2\pi\chi j\dot{\gamma}^2b_{uj}-\pi j\left(\mu j^2+\nu\right)b_{uj}+\pi j^2(\mu+\nu)a_{vj}=$$

$$=-P_\tau\cos(j\theta_R);$$

$$\pi\chi\ddot{b}_{vj}+\pi\chi j a_{vj}\ddot{\gamma}+2\pi\chi j\dot{a}_{vj}\dot{\gamma}-\pi\chi\left(1+j^2\right)\dot{\gamma}^2 b_{vj}+2\pi\chi\dot{\gamma}\dot{b}_{uj}+$$

$$+2\pi\chi j\dot{\gamma}^2 a_{uj}+\pi j\left(\mu j^2+\nu\right)a_{uj}+\pi j^2(\mu+\nu)b_{vj}=$$

$$=-P_\tau\sin\left(j\theta_R\right);$$

$$(j=1,\ 2,\ ...,\ N);$$

$$-\pi\chi\sum_{i=1}^{N}\ddot{a}_{ui}\,a_{vi}-\pi\chi\sum_{i=1}^{N}\ddot{b}_{ui}\,b_{vi}+\pi\chi\sum_{i=1}^{N}\ddot{a}_{vi}\,a_{ui}+\pi\chi\sum_{i=1}^{N}\ddot{b}_{vi}\,b_{ui}+$$

$$+\pi\chi(2r^2+4ra_0+2a_0^2+2\sum_{i=1}^{N}ia_{vi}b_{ui}-2\sum_{i=1}^{N}ia_{ui}b_{vi}+\sum_{i=1}^{N}a_{ui}^2+$$

$$+\sum_{i=1}^{N}b_{ui}^2+\sum_{i=1}^{N}a_{vi}^2+\sum_{i=1}^{N}b_{vi}^2)\ddot{\gamma}+4\pi\chi\left(r+a_0\right)\dot{a}_0\dot{\gamma}+$$

$$+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}i\dot{a}_{vi}b_{ui}+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}ia_{vi}\dot{b}_{ui}-2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}ia_{ui}\dot{b}_{vi}-$$

$$-2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}i\dot{a}_{ui}b_{vi}+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}a_{ui}\dot{a}_{ui}+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}b_{ui}\dot{b}_{ui}+$$

$$+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}a_{vi}\dot{a}_{vi}+2\pi\chi\dot{\gamma}\sum_{i=1}^{N}b_{vi}\dot{b}_{vi}+$$

$$\pi r\chi_P\sum_{i=1}^{N}[(a_{Hi}i^{-1}\sin(it)-b_{Hi}i^{-1}\cos(i\Omega t))\ddot{a}_{ui}+$$

$$+(a_{Hi}i^{-1}\cos(i\Omega t)+b_{Hi}i^{-1}\sin(i\Omega t))\ddot{b}_{ui}+$$

$$+(-a_{Hi}b_{ui}\sin(i\Omega t)+a_{Hi}a_{ui}\cos(i\Omega t)+b_{Hi}b_{ui}\cos(i\Omega t)+$$

$$+b_{Hi}a_{ui}\sin(i\Omega t))\ddot{\gamma}+4a_{Hi}\dot{a}_{ui}\Omega\cos(i\Omega t)-$$

$$-4a_{Hi}\dot{b}_{ui}\Omega\sin(i\Omega t)-3a_{Hi}{b_{ui}}^2 i\Omega\cos(i\Omega t)-$$

$$-3a_{Hi}{a_{ui}}^2 i\Omega\sin(i\Omega t)+4b_{Hi}\dot{a}_{ui}\Omega\sin(i\Omega t)+$$

$$+b_{Hi}\dot{b}_{ui}\Omega\cos(i\Omega t)-3b_{Hi}{b_{ui}}^2\Omega\sin(i\Omega t)+$$

$$3b_{Hi}{a_{ui}}^2 i\Omega\cos(i\Omega t)]-\pi r\chi_p\dot{\gamma}[\sum_{i=1}^{N}a_{Hi}\dot{a}_{ui}\cos(i\gamma)-$$

$$-\sum_{i=1}^{N}a_{Hi}\dot{b}_{ui}\sin(i\gamma)+\sum_{i=1}^{N}b_{Hi}\dot{a}_{ui}\sin(i\gamma)+$$

$$+\sum_{i=1}^{N}b_{Hi}\dot{b}_{ui}\cos(i\gamma)]=K_M r r_0^{-1}\gamma_g-K_M r^2 r_0^{-2}\gamma+Q_\gamma;$$

$$J_g\ddot{\gamma}_g-K_m K_{pe\partial}^{-1}\left(\gamma r_R r_0^{-1}-\gamma_g K_{pe\partial}^{-1}\right)=M_g;$$

$$m_c\ddot{X}_p=-K_c X_p+Q_{Xp}.$$

Полученные дифференциальные уравнения являются существенно нелинейными, с неопределенными множителями и решаются с условиями связи. Исключение неопределенных множителей и учет условий связи этой нелинейной системы можно осуществить следующим образом. Запишем систему дифференциальных уравнений в общем виде:

$$A\left(X,\dot{X}\right)\ddot{X}=L\lambda+P. \qquad (16)$$

Здесь X-вектор – столбец переменных a_0, a_{ui}, b_{ui}, (i=1, 2, ..., N), a_{vi}, b_{vi}, (i=1, 2, ..., N); γ, γ_g. Матрица A размера (4N+3) × (4N+3); матрица L размера $(4N+3)\times 2$ имеет вид $L^T=\left[L_u^T\ L_v^T\right]$. Вектор L_u ненулевой размера 2N+1; вектор L_2 нулевой. Вектор λ неопределенных множителей Лагранжа из 2 компонент; вектор правых частей, содержащий внутренние и внешние силы. На элементы подвектора $X_u^T=\left[a_0, a_{ui}, b_{ui}\,(i=1,2,\ldots,N)\right]$ вектора X наложены связи (13), (14). Обозначим их $SX_u=0$. Матрица S размера 2 × (2N+1). Представим (13) в виде:

$$\begin{bmatrix}A_1\\A_2\end{bmatrix}\ddot{X}=\begin{bmatrix}L_1\\L_2\end{bmatrix}\lambda+\begin{bmatrix}P_1\\P_2\end{bmatrix},$$

где A_1 – матрица размера 2 × (4N + 3); L_1 размера 2 × 2; L_1 размера (2 × 2); P_1 состоит из двух элементов; A_2 размера (4N + 1) × (4N + 3); L_2 размера (4N + 1) × 2; P_2 состоит из 4N + 1 элементов.

Из зависимости $A_1\ddot{X}=L_1\lambda+P_1$ найдем

$$\lambda=L_1^{-1}A_1\ddot{X}-L_1^{-1}P_1.$$

Подставляя эту зависимость в уравнение

$$A_2\ddot{X}=L_2\lambda+P_2.$$

Получим

$$M\ddot{X}=Q, \qquad (17)$$

где $M=L_2L_1^{-1}A_1-A_2$, $Q=L_2L_1^{-1}P_1-P_2$.

Исключим с помощью условий связи (13), (14) зависимые переменные.

Получим

$$W_{UN}=S_1S_2W_U,\ \dot{W}_{UN}=S_1S_2\dot{W}_U,$$

где

$$W_{UN}=\begin{bmatrix}a_{uN}\\b_{uN}\end{bmatrix};$$

$$S_1=\begin{bmatrix}\cos\left(N(\pi-\alpha)\right)&\sin\left(N(\pi-\alpha)\right)\\\cos\left(N(\pi+\alpha)\right)&\sin\left(N(\pi-\alpha)\right)\end{bmatrix}^{-1};$$

$$S_2=\begin{bmatrix}-1&-\cos\left(i(\pi-\alpha)\right)&-\sin\left(i(\pi-\alpha)\right)(i=1,2,\ldots N-1)\\-1&-\cos\left(i(\pi+\alpha)\right)&-\sin\left(i(\pi+\alpha)\right)(i=1,2,\ldots N-1)\end{bmatrix};$$

$$W_U^T=\left[a_0\,a_{u1}\,b_{u1}\,a_{u2}\,b_{u2}\ldots a_{u,N-1}\,b_{u,N-1}\right].$$

Обозначим вектор $X^T=\left[W_U^T\,W_{UN}^T\,W_V^T\right]$, а матрицу M представим в виде:

$$M=\left[M_1\,M_2\,M_3\right],$$

где M_1 – матрица (4N + 1) × (2N − 1); M_2 – матрица (4N + 1) × 2; M_3 – матрица (4N + 1) × (2N + 2).

Таблица 1

Максимальная и минимальная глубина резания при Ω = 0,5рад/с

h, м	Модель	Глуб. рез., мм	$К_С$, н/м						
			10^4	510^4	10^5	510^5	10^6	510^6	10^7
0,1	1	U_{max}	2,01	1,97	1,99	2,01	2,01	2,01	2,01
		U_{min}	−4,41	−0,81	−0,01	1,34	1,64	1,92	1,95
	2	U_{max}	2,01	1,98	2,01	2,06	2,02	2,03	2,04
		U_{min}	−7,78	−2,29	−1,07	0,69	1,25	1,82	1,90
0,3	1	U_{max}	2,00	2,00	2,01	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−4,31	−0,82	−0,01	1,35	1,65	1,92	1,96
	2	U_{max}	2,00	2,00	2,02	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−7,69	−2,34	−1,10	0,73	1,25	1,82	1,91
0,5	1	U_{max}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−4,25	−0,79	0,02	1,36	1,65	1,92	1,96
	2	U_{max}	2,00	2,01	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−7,69	−2,34	−1,06	0,73	1,26	1,82	1,91

Таблица 2

Максимальная и минимальная глубина резания при Ω=5 рад/с

h, м	Модель	Глуб. рез., мм	$К_С$, н/м						
			10^4	510^4	10^5	510^5	10^6	510^6	10^7
0,1	1	U_{max}	2,08	2,36	1,98	2,00	2,01	2,01	2,01
		U_{min}	−2,67	−0,37	0,68	1,64	1,81	1,98	1,97
	2	U_{max}	2,04	1,76	1,92	2,85	2,03	2,03	2,03
		U_{min}	−4,97	−0,72	−0,08	0,44	1,58	1,90	1,95
0,3	1	U_{max}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−2,46	0,00	0,68	1,65	1,81	1,96	1,98
	2	U_{max}	2,00	2,00	2,07	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−4,85	−1,06	−0,24	1,25	1,59	1,91	1,95
0,5	1	U_{max}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−2,43	0,01	0,69	1,65	1,82	1,96	1,98
	2	U_{max}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		U_{min}	−4,85	−1,06	−0,16	1,25	1,59	1,91	1,95

Тогда для (17) получим

$$M_1 W_U + M_2 W_{UN} + M_3 W_V = Q.$$

Используя зависимость для W_{UN}, получим окончательную систему нелинейных дифференциальных уравнений для математического моделирования точности обработки вращающегося на опорах кольца с учетом динамики его углового движения

$$\left(M_1 + M_2 S_1 S_2\right)\ddot{W}_U + M_3 \ddot{W}_V = Q.$$

Решается она численным методом.

Результаты вычислений по рассмотренным моделям представлены в табл. 1, 2. Один для постоянной скорости вращения; второй для переменной, учитывающей динамику углового вращения. Исследовалось влияние упругости станочного модуля, угловой скорости вращения кольца, толщины кольца. Радиус кольца составляет 3 м, угол между опорами равен 50 градусам. Из таблиц следует, что использование этих моделей дает различие по глубине резания в несколько миллиметров, причем с увеличением угловой скорости вращения это различие уменьшается.

Использование второй модели позволяет определить характеристики кольца, параметры резания при формообразовании кольца и конструктивные параметры станочного модуля, при которых может возникнуть резонансный эффект вследствие наличия электропривода. Это позволяет использовать уравнения при выборе режимов процесса формообразования и при проектировании станочного оборудования для этой технологии.

Библиографический список

1. *Полунин А. И.* Математическое моделирование динамики упругого вращающегося кольца при наличии двух опор. Известия РАН. Механика твердого тела. 1999. № 6. С. 153–158.

2. *Полунин А. И.* Определение собственных частот колебаний вращающегося кольца с опорами при учете растяжимости средней линии.

Известия РАН. Механика твердого тела. 2001. № 2. С. 193–198.

3. *Полунин А. И.* О колебаниях анизотропного кольца с опорами. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2003. № 7. С. 59–61.

4. *Полунин А. И.* Об учете непараллельности сторон кольца в информационной системе поддержки выбора режима обработки. Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии. 2008. № 1–3/269(544). С.209–213.

5. *Полунин А. И.* О характере прецессионного движения стоячих волн во вращающемся кольце с опорами. Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 10. С. 27–33.

6. *Полунин А. И.* О периодической прецессии стоячих волн во вращающейся оболочке с опорами. Известия вузов. Машиностроение. 2009. № 1. С. 23–34.

7. *Полунин А. И.* Математическое моделирование влияния точечных масс на динамику вращающейся оболочки с опорами. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 3. С. 28–31.

8. *Полунин А. И.* Об эффекте прецессионного резонанса во вращающейся на опорах оболочке. Известия Курского государственного технического университета. 2010. № 3. С. 14–17.

9. *Полунин А. И.* Теоретические основы динамики вращающихся на опорах оболочек с особенностями. Минеральные Воды. СКФ БГТУ, 2011. 234 с.

10. *Полунин А. И.* Математическое моделирование динамики вращающегося на опорах кольца при действии сил резания. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки. 2013. № 1. С. 39–49.

11. *Полунин А. И.* Управление динамикой кольца при его обработке с использованием мобильной технологии. Приборы и системы управления. 2014. № 11. С. 23–28.

12. *Журавлёв В. Ф., Климов Д. М.* Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 126 с.

13. *Polunin A.* About The Motion Nature of Standing Waves with Supporting Ring Variable Speed. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973–4562. Vol. 10. No 24 (2015). P. 44992–45002.

14. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

УДК: 538.951

В. М. Полунин*
доктор физико-математических наук, профессор
П. А. Ряполов*
кандидат физико-математических наук, доцент
Е. В. Шельдешова*
аспирант
А. В. Бридский*
кандидат технических наук
**Юго-Западный государственный университет, Курск*

ОСЦИЛЛЯЦИИ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В статье рассмотрено исследование вязкоупругих параметров системы на основе столбика магнитной жидкости, ограниченной поверхностью горизонтально трубки из оргстекла, находящейся в поле электромагнита. Столбик магнитной жидкости совершает затухающие колебания. Предложен механизм интерпретации результатов эксперимента с целью определения зависимости вязкости магнитной жидкости от напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: *магнитная жидкость, вязкость, частота колебаний, коэффициент пондеромоторной упругости, намагниченность насыщения.*

V. M. Polunin*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
P. A. Ryapolov*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
E. V. Shel'deshova*
PhD Student
A. V. Bridesky*
Phd Sc. Tech.
**South-West State University*

OSCILLATIONS OF THE MAGNETIC LIQUID ACTIVE ELEMENT IN STRONG MAGNETIC FIELDS

The article deals with the study of viscoelastic parameters of the system based on a column of magnetic fluid bounded by the horizontal surface of a tube of Plexiglas located in the field of an electromagnet. A column of magnetic fluid makes damped oscillations. The mechanism of interpretation of the experimental results to determine the dependence of the viscosity of the magnetic fluid on the magnetic field is proposed.

Keywords: *magnetic fluid, the viscosity, the oscillation frequency, the ratio of pon-deromotive elasticity, magnetization saturation.*

Благодаря возможности управления физическими параметрами, в первую очередь вязкостью и текучестью, с помощью внешнего магнитного поля магнитные жидкости (МЖ) получили широкое распространение в различных устройствах по виброгашению, управлению фрикционными характеристиками, амортизаторах и демпферах. Особенный интерес представляет изучение зависимости вязкости МЖ от напряженности внешнего магнитного поля. В большинстве работ для проведения исследований зависимости вязкости от величины магнитного поля основной приборной базой являлись ротационные реометры Брукфильда, в которых вал, диск или конус вращается в исследуемой жидкости [1–4]. В работе [5] исследованы различные феррожидкости при сдвиговом течении. Проведенные эксперименты показали, что увеличение напряженности магнитного поля приводит к увеличению вязкости жидкости, так называемому магнитовязкому эффекту. Однако в большинстве амортизирующих устройств на основе МЖ активный элемент (чаще всего цилиндр) совершает колебательные движения,

в связи с этим особый интерес представляет изучение зависимости вязкости МЖ от напряженности внешнего магнитного поля в подобных системах.

Для проведения эксперимента была создана установка, подробно описанная в работах [6, 7]. Перед началом проведения эксперимента трубка из оргстекла тщательно закреплялась между полюсами электромагнита ФЛ-1, затем катушка индуктивности, передающая исходящий сигнал на осциллограф GwINSTEK для регистрации колебаний магнитной жидкости, фиксировалась в определенном положении. Щуп тесламетра размещался в пространстве между полюсами электромагнита максимально близко к центру полюса. После этого включались источники питания электромагнита, напряжение на катушках увеличивалось до создания в межполюсном пространстве напряженности магнитного поля 100 кА/м для заполнения трубки образцом. После получения столбика магнитной жидкости длиной 115 мм напряженность поля увеличивалась для создания напряженности поля 200 кА/м. Упругие колебания магнитной жидкости возбуждались путем выдергивания резиновой пробки из свободного конца трубки. При проведении эксперимента для возбуждения колебаний использовалась пробка с отверстием, которое было открыто во время «ввинчивания» ее в трубку, затем отверстие герметично закрывалось, и пробка выдергивалась из трубки, возбуждая тем самым магнитную жидкость. Осциллограмма полученных колебаний записывалась с помощью цифрового осциллографа.

Исследовались образцы магнитного коллоида на основе высокодисперсного магнетита, стабилизированного поверхностно-активным веществом – олеиновой кислотой. В качестве дисперсионной среды – жидкости-носителя – использовался – ундекан и керосин. Объекты исследования были синтезированы в Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики Ивановского государственного энергетического университета и в лаборатории наномасштабной акустики Юго-Западного государственного университета.

Вязкость η образца МЖ измерена на вискозиметре «Brookfield DV2T», а плотность ρ – при помощи пикнометра. На основе «прямого» метода – путем измерения магнитного потока, пронизывающего длинную трубочку с МЖ, получена кривая намагничивания и значение намагниченности насыщения.

Таблица 1

Физические параметры образцов

Образец МЖ	ρ, кг/м^3	η, мПа·с	M_s, кА/м
МЖ ундекан Иваново	1227	32,04	42
МЖ керосин Иваново	1245	31,84	40,5
МЖ керосин ЮЗГУ	1580	16,45	56,7

Образцы, полученные в ПНИЛ ИГЭУ, отличаются относительно большей вязкостью.

Выражение (17) в [8] может быть переписано в виде:

$$\pi^3\nu^2\rho bd^2 + bd\sqrt{\pi^7\nu^3\eta\rho} = \mu_0\frac{\pi d^2}{2}\left(M_x\frac{\partial H_x}{\partial z}\right)_{z=b/2}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, M_x и $\frac{\partial H_x}{\partial z}$ – соответственно намагниченность и градиент напряженности магнитного поля в месте расположения основания МЖ-столбика.

В левой части (1) первое слагаемое представляет динамический коэффициент упругости $k_{d\omega}$; второе – поправку на движение вязкой жидкости $|\delta_\eta|$; правая часть – коэффициент пондеромоторной упругости k_p, полученный в [9].

Коэффициент пондеромоторной упругости k_p обусловлен взаимодействием МЖ с неоднородным магнитным полем [10–11].

В работах [12, 13] получена поправка к коэффициенту упругости, связанная с течением вязкой жидкости:

$$\delta_\eta = -h_f d\sqrt{\pi^7\nu^3\eta\rho}.$$

Однако полученная для δ_η формула дает оценку «сверху» (максимальное по истечении четверти периода значение). Коэффициент вязкой упругости k_η представляет «среднее полупериодное» гармонической функции от максимального значения, то есть $k_\eta = \frac{2}{\pi}\delta_\eta$.

Поэтому:

$$k_\eta = -\frac{2}{\pi}h_f d\sqrt{\pi^7\nu^3\eta\rho}.$$

Кроме того, ранее полагалось, что вязкость МЖ не зависит от напряженности магнитного поля. Допуская такую зависимость, совершим замену η на η_H:

$$k_\eta = -2h_f d\sqrt{\pi^5\nu^3\eta_H\rho}.$$

Тогда выражение (1) примет вид:

$$\pi^3\nu^2\rho bd^2 + 2bd\sqrt{\pi^5\nu^3\eta_H\rho} = \\ = \mu_0\frac{\pi d^2}{2}\left(M_x\frac{\partial H_x}{\partial z}\right)_{z=b/2}, \quad (2)$$

Откуда, учитывая эффективную часть смещающейся поверхности столбика и совершив переход $M_S \to M_x$, воспользовавшись графиком кривой намагничивания в части зависимости M_x от 1/H, получим

Таблица 2

Расчетные значения вязкости образцов

H_0, кА/м	МЖ ундекан Иваново		МЖ керосин Иваново		МЖ керосин ЮЗГУ	
	ν, Гц	η_H, Па·с	ν, Гц	η_H, Па·с	ν, Гц	η_H, Па·с
200	6,68	0,5439	6,86	0,3378	8,27	0,0324
300	8,82	0,3105	8,4	0,3917	10,02	0,0613
400	9,91	0,4551	9,86	0,3643	11,77	0,0422
500	11,31	0,2344	11	0,2391	12,9	0,0208
600	12,36	0,3209	12,22	0,2655	14,3	0,0270
700	12,89	0,4866	13,13	0,2865	15,57	0,0169
800	14,12	0,4443	13,98	0,3659	16,75	0,0222

$$\eta_H = \frac{1}{\nu^3}\left[\frac{\mu_0 d \cdot M_x}{4b\pi\sqrt{\pi\rho}} \cdot \left(\partial H_x / \partial z\right)_{z=b/2} - \frac{\sqrt{\pi\rho} \cdot d_{ef}^2 \nu^2}{2d}\right]^2. \quad (3)$$

Воспользовавшись формулой (3), получим оценку зависимости от напряженности магнитного поля, результаты которой представлены в табл. 2.

Полученные результаты имеют предварительный характер и нуждаются в продолжении экспериментальных и теоретических исследованиях, прежде всего в методическом аспекте. Они рассматриваются нами в качестве дискуссионного материала на конференции.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ. Код проекта 3.2751.2017/ПЧ.

Библиографический список

1. *Odenbach S., Rylewicz T., Heyen M.* Arheometer dedicated for the investigation of viscoelastic effects in commercial magnetic fluids // Journal of Magnetismand Magnetic Materials. 1999. V. 201. P. 198.

2. Microstructure and rheology of ferrofluids / L. Pop, S. Odenbach, A. Wiedenmann et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. V. 289. P. 303.

3. *Nowak J., Wolf D., Odenbach S.* Arheological and microscopical characterization of biocompatible ferrofluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2014. Vol. 354. P. 98–104.

4. *Arantes F., Odenbach S.* The magnetoviscous effect of micellar solutions doped with water based ferrofluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. T. 390. C. 91–95.

5. *Pop L., Odenbach S.* Capillary viscosimetry on ferrofluids // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. N. 20.

6. Elasticity of a Magnetic Fluid in a Strong Magnetic Field / V Polunin, P. Ryapolov, V. Platonov // Acoustical Physics. 2017. Vol. 63. No. 4. P. 416–423.

7. Shear and oscillations of the magnetic fluid column in a strong magnetic field / V. Polunin, S. Yemelyanov, P. Ryapolov, E. Shel'deshova // Magnetohydrodynamics 53, 2017. No. 3. P. 471–481.

8. *Полунин В. М., Ряполов П. А., Платонов В. В.* Упругость магнитной жидкости в сильном магнитном поле // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 4. С. 371–379.

9. Свободные колебания магнитной жидкости в сильном магнитном поле / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, В. В. Платонов, А. Е. Кузько // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 302–307.

10. *Odenbach S.* (Ed.). Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids, Lect. Notes Phys. Berlin: Springer, 2009. 430 p.

11. *Polunin V., Storozhenko A., Ryapolov P.* Mechanics of liquid nano- and microdispersed magnetic media. New York – London: CRC Press, CISP, 2017. P. 210.

12. *Polunin V.* Acoustics of nanodispersed magnetic fluids. London – New York: CRC Press, CISP, 2015. 472 p.

13. Упругие свойства магнитной жидкости с воздушной полостью, удерживаемой силами левитации / В. М. Полунин, М. Л. Боев, Тан М. М. и др. // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 63–69.

УДК 541.128.12:542.941.7:547.521

Т. И. Фомичева*
кандидат технических наук, доцент
Т. Е. Крылова*
старший преподаватель
Ю. Т. Вираненко**
доктор химических наук, профессор
Е. В. Колужникова**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова*

КАРБОНИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МЕТАЛЛОВ 8 ГРУППЫ – КАТАЛИЗАТОРЫ РЕАКЦИИ ГИДРОКАРБОКСИЛИРОВАНИЯ ФУРФУРОЛА

В статье приведены данные о каталитическом гидрокарбоксилировании фурфурола с помощью карбонильных комплексов металлов 8 группы.

Ключевые слова: *фурфурол, каталитическое гидрокарбоксилирование.*

T. I. Fomicheva*
Phd Sc. Tech., Associate Professor
T. E. Krylova*
Senior Lecturer
Y. T. Vigranenko**
Dr. Sc. Chem., Professor
E. V. Koluzhnikova**
Phd Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State Forest Technical University C. M. Kirov*

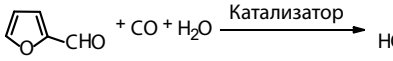
CARBONYL COMPLEXES OF 8TH GROUP METALS – CATALYSTS FOR THE FURFUROL HYDROCARBOXYLATION REACTIONS

The article presents data on the catalytic hydrocarboxylation with the help of 8th group metals carbonyl complexes.

Keywords: *furfural, catalytic hydrocarboxylation.*

Фурфурол является продуктом, получаемым из пентозансодержащего растительного сырья (древесных и растительных отходов), широко используемым для очистки масляных дистиллятов и нефтепродуктов путем экстракции. Фурфурол применяют для получения пластмасс (фенол-фурфурольные смолы) фурана, фурфурилового спирта, фурановых смол, сильвана, тетрагидрофурана, фумаровой кислоты и многих соединений с фурановым кольцом, к которым относятся лекарственные препараты, например, фурацилин.

Эффективным методом получения из фурфурола продуктов, обладающих ценными потребительскими свойствами, может явиться реакция гидрокарбоксилирования (1):



(1)

Иодид никеля (II), ацетат железа (II) и карбонат кобальта (II) были выбраны в качестве предшественников катализаторов на основании литературных и собственных данных.

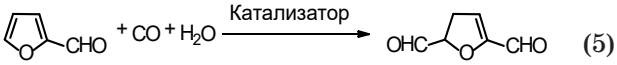
Гидрокарбонилы этих металлов, образующиеся по реакциям активации (2), (3) и (4) предшественников катализаторов, являются истинными катализаторами реакции гидрокарбоксилирования (1):

$$2NiI_2 + 6CO + 3H_2 \xrightarrow{150–170°C;\ 28.4\ МПа} H_2Ni_2(CO)_6 + 4HI\,, \quad (2)$$

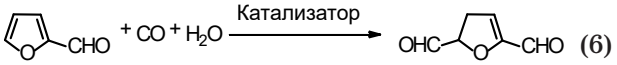
$$Fe(CH_3COO)_2 + 4CO + H_2 \xrightarrow{130–160^\circ C;\,29.0\ МПа} H_2Fe(CO)_4 + 2CH_3COOH, \quad (3)$$

$$CoCO_3 + 4CO + 3/2H_2 \xrightarrow{110–140^\circ C;\,29.4\ МПа} HCo(CO)_4 + H_2CO_3. \quad (4)$$

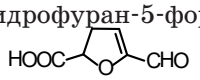
Исследование реакции гидрокарбоксилирования фурфурола выполняли в реакторе идеального смешения объемом 0,5 дм^3, снабженным загрузочной емкостью для ненасыщенного субстрата буферными емкостями для оксида углерода и синтез-газа, а также отсекаемым пробоотборником высокого давления объемом 8 см^3 для отбора проб жидкой фазы. В реактор, продутый аргоном, засыпали соли никеля (II), железа (II), кобальта (II) (предшественники катализаторов) и добавляли смесь воды и ацетона, используемого в качестве растворителя, подавали оксид углерода из буферной емкости до давления 15,0 Мпа, включая нагрев и перемешивание. В загрузочную емкость заливали фурфурол. По достижении рабочей температуры передавливали фурфурол оксидом углерода в реактор, доведя давление до 29,0 Мпа [7]. В ходе опытов производили отбор проб жидкой фазы, которые анализировали методом ГЖХ в следующих условиях: неподвижная фаза-твин-80, нанесенная на хроматон N-AW-DMCS, зернение 0,16–0,20 мм (15% от массы носителя). Длина хроматографической колонки 4 м, внутренний диаметр 3 мм, материал колонки – нержавеющая сталь. Температура колонки 150 ^{0}C. Температура испарителя 210 ^{0}C. Детектор ДИП. Температура детектора 160 ^{0}C. Газ-носитель – аргон, скорость его подачи $3{,}5\cdot10^{-5}$ м^3/мин, расход водорода $4{,}0\cdot10^{-5}$ м^3/мин, расход воздуха $7{,}0\cdot10^{-5}$ м^3/мин, наряду с основной реакцией гидрокарбоксилирования протекали побочные превращения: гидроформилирования (5) и гидрирования фурфурола (6):



(5)



(6)

Кроме того, были идентифицированы продукты бензоиновой конденсации фурфурола и фурановые смолы. Наиболее высокий выход целевого продукта – альдегидокислоты 2,3 дигидрофуран-5-формил-2-карбоновая кислота –  – 70% наблюдался при использовании иодида никеля в качестве предшественника катализатора. Наименее активным оказался ацетат железа (II). Карбонат кобальта занимает по активности промежуточное положение. Выявленные нами закономерности каталитической активности солей металлов первой триады VIII группы Периодической системы элементов сходны с полученными ранее данными для реакции гидрокарбоксилирования формальдегида, где наиболее активными оказались также соли никеля (II).

В странах ЕС реализован промышленный процесс производства пропионовой кислоты гидрокарбоксилированием этилена на катализаторе $Ni(CO)_4$, однако карбонилы никеля являются высокотоксичными, и требуется очень тщательная технологическая и проектная проработка будущего процесса, а также специальная подготовка обслуживающего персонала.

Процесс, проводимый по реакции (1), идеально подходит для практической реализации процесса переработки фурфурола.

Библиографический список

1. *Нестерова Е. В., Елкин В. А.* Получение фурфурола из гексозных гидролизатов // Химия растительного сырья. 2010. № 3.

2. *Клещевников Д. И.* Интенсификация технологии и переработки растительной биомассы с получением фурфурола: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Казань, 2018.

3. *Пономарев А. А.* Синтез и реакции фурановых веществ. Саратов, 1960. С. 39.

4. *Крешков А. П.* Физические и физико-химические (инструментальные) методы анализа. М., 1977.

5. *Ганкин В. Ю., Рудковский Д. М.* Оксосинтез. Исследование образования карбонилов кобальта из его солей. М.: Гостоптехиздат, 1963. С. 79–80.

6. *Белозерский Н. А.* Карбонилы металлов. М.: Металлургиздат, 1958. 437 с.

7. *Ганкин В. Ю., Гуревич Г. С.* Технология оксосинтеза. Л.: Химия, 1981. 272 с.

УДК 004.89; 004.942

С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОТОКОЛЫ МНОГОФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ В ИНТЕРНЕТЕ АВТОМОБИЛЕЙ

Интеграция автомобильного транспорта в сеть Интернет с использованием технологий Internet of things предоставляет комплекс возможностей, значительно повышающих уровень комфортности, надежности и безопасности жизни как водителя, так и пассажиров. Существует несколько вариантов взаимодействия в рамках интернета автомобилей. Однако при этом появляется необходимость решения проблем информационной безопасности, связанных с процедурами идентификации и аутентификации пользователя, передачей и хранением данных. Протоколы многофакторной аутентификации значительно повысят информационную безопасность данной системы.

Ключевые слова: *информационная безопасность, интернет вещей, аутентификация пользователя, автомобильный транспорт.*

S. V. Bezzateev*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROTOCOLS MULTI-FACTOR AUTHENTICATION ONLINE CAR THE INTEGRATION OF ROAD TRANSPORT INTO THE

Internet with the use of "Internet of things" technologies provides a range of opportunities that significantly increase the level of comfort, reliability and safety of life of both the driver and passengers. There are several options for interaction within the Internet of cars. However, there is a need to solve the problems of information security related to the procedures of identification and authentication of the user, transfer and storage of data. Multi-factor authentication protocols will significantly increase the information security of the system.

Keywords: *information security, Internet of things, user authentication, road transport.*

Современное автомобилестроение, безусловно, является одной из самых передовых отраслей промышленности. За последние несколько лет автомобиль из механического устройства передвижения превратился в мощный компьютер с системой искусственного интеллекта, эффективно управляющий электроприводом.

В настоящее время актуальными стали вопросы внедрения интернета вещей в современные автомобили, что продиктовано, в первую очередь, развитием и повсеместным распространением сети Интернет, а также вопросами надежности и безопасности автомобильного транспорта.

Виды взаимодействия автомобиля с другими устройствами можно условно разделить на несколько групп (рис. 1):

– V-2-V (Vehicle-to-vehicle) – взаимодействие автомобилей между собой в процессе дорожного движения;

– V-2-I (Vehicle-to-Infrastructure) – взаимодействие автомобиля с дорожной инфраструктурой;

– V-2-H (Vehicle-to-human) – взаимодействие автомобиля и человека;

– V-2-X (Vehicle-to-everything) – взаимодействие автомобиля и любых других объектов.

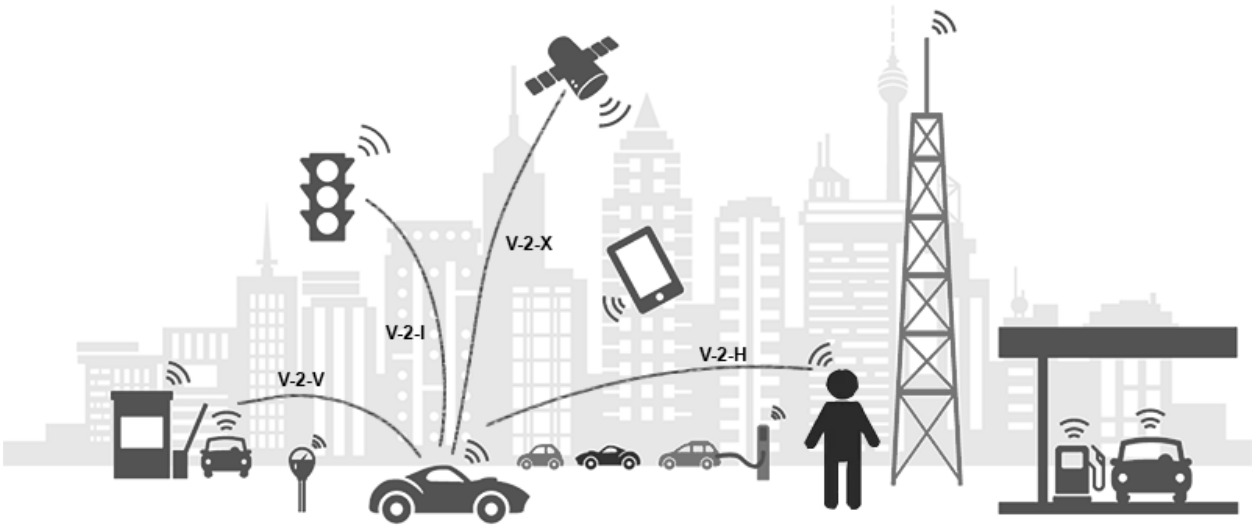


Рис. 1. Примеры взаимодействия в рамках интернета автомобилей

Для участия любого автомобиля в сети *Internet of things* необходимо наличие у него определенного программно-аппаратного решения на базе портативного устройства, подключаемого к автомобилю через разъем диагностики OBD [1], и соответствующее мобильное приложение с выходом в Интернет, позволяющее выполнять непрерывный мониторинг параметров работы автомобиля и его текущего места нахождения через GPS-приемник, а также 3-осевой датчик ускорений, совмещенный с гироскопом.

При реализации подобного взаимодействия неизбежно встают проблемы информационной безопасности и защиты передаваемых данных:

1. Идентификация и аутентификация пользователей и устройств.

2. Защита каналов связи, передающих большие объемы данных.

3. Необходимость безопасного хранения обрабатываемой информации [2].

В рассматриваемой системе взаимодействия автомобиля с различными объектами на основе технологии интернета вещей отдельные группы пользователей имеют различные уровни доступа. Процесс организации идентификации и аутентификации состоит из следующих задач:

– распределение объектов на зоны/группы;

– выделение в каждой группе аутентифицирующего узла;

– мониторинг выхода объекта за пределы зоны;

– аутентификация объекта в новой зоне;

– сохранение анонимности объекта.

При этом необходимо использовать несколько уровней защиты, включая аутентификацию (подтверждение личности), авторизацию (контроль доступа) и учет действий (логирование).

Доступ к любой критически важной информации или оборудованию должен осуществляться посредством многофакторной защиты. Большинство устройств, предоставляющие доступ к своим ресурсам, в том числе критически важным, запрашивает логин и пароль. Но в интернете автомобилей использование подобной аутентификации непрактично, поскольку пользователями могут также выступать и электронные устройства.

Одним из вариантов решения данной проблемы является использование метода, предложенного учеными Института исследований инфокоммуникаций (Institute for Infocomm Research), суть которого заключается в использовании небольшого фрагмента информации, в котором содержится в сжатом виде весь журнал событий о взаимодействии данного устройства с сервером. При этом фрагмент передаваемой информации уже содержит сведения текущего сеанса взаимодействия устройства с сервером до момента отправки.

Также возможно использование следующих протоколов аутентификации [3, 4]:

– протокол обмена ключами с аутентификацией посредством пароля [5];

– простой обмен степенью ключа;

– SRP протокол регистрации и аутентификации пользователей [6];

– аутентификация и выработка общего ключа с использованием пароля.

При выборе протоколов аутентификации необходимо учитывать режимы взаимодействия и временные ограничения сеанса связи, что объясняется следующими примерами взаимодействия:

– автомобиль при отсутствии движения;

– взаимодействие с попутным автомобилем;

– взаимодействие со встречным автомобилем;

– взаимодействие движущегося автомобиля с дорожными объектами.

Очевидно, что следствием такого взаимодействия будет являться поток большого количества данных, содержащих различную информацию, поступающую от активных и пассивных участников дорожного движения. Обработка таких данных позволит принимать решения об изменении характеристик автомобилей, транспортной инфраструктуры; получать актуальную информацию о «пробках», ДТП, качестве дорожного покрытия и т.п.

Дальнейшее развитие технологий включения автомобилей в интернет вещей неизменно приведет к реализации «умного дома» в автомобиле, включающего автопарковку, адаптивный круиз-контроль, системы аварийного торможения, технологии обнаружения пешеходов, системы предотвращения столкновения, распознавание дорожных знаков, предупреждение о выезде со своей полосы, предупреждение о перекрестном движении, обнаружение слепых зон, предупреждение о заднем столкновении и т. д.

Библиографический список

1. *Крон А.* Разъем диагностики OBD-II как интерфейс для IoT. URL: https://habr.com/ru/company/unet/blog/408941/ (дата обращения: 09.03.2019).

2. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Анализ причин нарушения устойчивости облачных систем с учетом требований надежности и оперативности // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 258–261.

3. *Андреев С. Д., Омётов А. Я., Беззатеев С. В.* Распространение носимых устройств в рамках интернета вещей // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2018). Материалы XXI Международной научной конференции. Российский университет дружбы народов / Под общ. ред. В. М. Вишневского и К. Е. Самуйлова. 2018. С. 311–316.

4. *Писарев И.* Протоколы аутентификации для интернета вещей. URL: http://cryptowiki.net/index.php?title (дата обращения: 09.03.2019).

5. ITU-T X.1035. Протокол обмена ключами с аутентификацией посредством пароля (PAK). URL: https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=9057&lang=ru (дата обращения: 09.03.2019).

6. IETF RFC 2945. The SRP Authentication and Key Exchange System. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/rfc2945 (дата обращения: 09.03.2019).

УДК 004.89; 004.942

С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАЩИЩЕННОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ

В статье предложена методика вычислений прогнозного значения параметра аварийности с использованием нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки при условии, что нейронная сеть находится в облачном сервисе, а данные клиента требуют высокого уровня защиты. Рассмотрен метод гомоморфного шифрования в качестве криптографической защиты входной и выходной информации. Приведена схема взаимодействия клиента и облачного сервера.

Ключевые слова: *облачные вычисления, нейронные сети, защита информации, криптография.*

S. V. Bezzateev*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTING SECURE DATA EXCHANGE

The article proposes a method of calculating the predicted value of the accident rate parameter using a neural network with direct signal propagation and reverse error propagation, provided that the neural network is in the cloud service, and the client data requires a high level of protection. The method of homomorphic encryption as a cryptographic protection of input and output information is considered. The scheme of interaction between the client and the cloud server is given.

Keywords: *cloud computing, neural networks, information security, cryptography.*

Широкое распространение облачных сервисов делает актуальной проблему повышения уровня информационной безопасности таких технологий [1]. Рассмотрим задачу прогнозирования показателей аварийности трубопроводного транспорта [2] с помощью нейронной сети, размещенной в облаке. Данные, которые подаются на вход сети, содержат значения количественных и качественных параметров как самого трубопровода, так и продукта, транспортируемого им. Как правило, данные сведения представляют собой объект коммерческой тайны и не могут быть переданы в открытом незашифрованном виде. Сама же модель сети, предоставляемая облачным сервисом для расчета прогнозных значений аварийности, также является объектом авторского права и часто предоставляется клиенту как сервис для периодических расчетов, а не как конечный продукт. Поэтому проблемы безопасной передачи и использования в расчетах данных по трубопроводному транспорту требуют реализации методов и моделей их защиты.

Структура нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки приведена на рис. 1. Сеть содержит набор входных параметров, три внутренних слоя, имеющие 10, 50, 1 нейрон соответственно, и один выходной параметр. Каждый слой использует гиперболический тангенс в качестве активационной функции.

Таким образом, в данной сети на каждом слое, то есть трижды, используются элементарные операции умножения и суммирования (1),

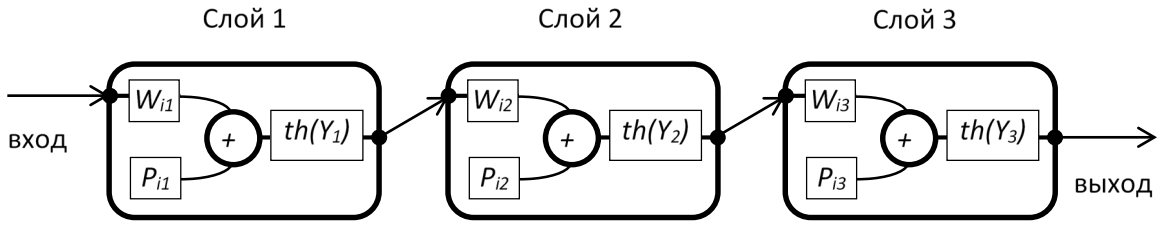


Рис. 1. Модель нейронной сети

а также проводится операция сравнения с пороговым значением b_j функции гиперболического тангенса (2) для каждого слоя j.

$$Y_j = \sum_{i=1}^{I_j} w_{ij} \cdot p_{ij} \quad , \qquad (1)$$

где Y_j – линейная комбинация входных воздействий, получаемая на каждом слое j; i – номер нейрона; I_j – количество нейронов на слое j; w_{ij} – синаптический вес нейрона i на слое j; p_{ij} – значение входного сигнала для нейрона i на слое j.

$$b_j \le f(Y_j) = th(Y_j) = \frac{(e^{Y_j} - e^{-Y_j})}{(e^{Y_j} + e^{-Y_j})} . \qquad (2)$$

Требования к хранению и обработке данного вида информации предполагают высокую степень защиты от возможного неконтролируемого доступа к ним со стороны владельца облачного сервиса, а также от риска вредоносных вторжений в облако. Поэтому с целью обеспечения информационной безопасности значения входных и выходных параметров перед передачей в облако данные должны быть зашифрованы. Следовательно, необходимо использовать алгоритмы шифрования, позволяющие производить математические операции над зашифрованными данными без их предварительного дешифрования. Данным свойством обладает полностью гомоморфное шифрование [3].

Гомоморфное шифрование позволяет работать с зашифрованной информацией и получать результат в зашифрованном виде. Клиент получает данные, которые легко может расшифровать, так как имеет необходимые ключи. Но такой вид шифрования накапливает ошибки на каждом шаге вычислений. Фильтрация шума требует дополнительной компьютерной обработки, и в результате скорость операций замедляется. Это типичная проблема, возникающая при шифровании данных. Подобную проблему может решить разделение вычислительных операций в сочетании с дешифрованием и новым шифрованием данных после каждого этапа вычислений.

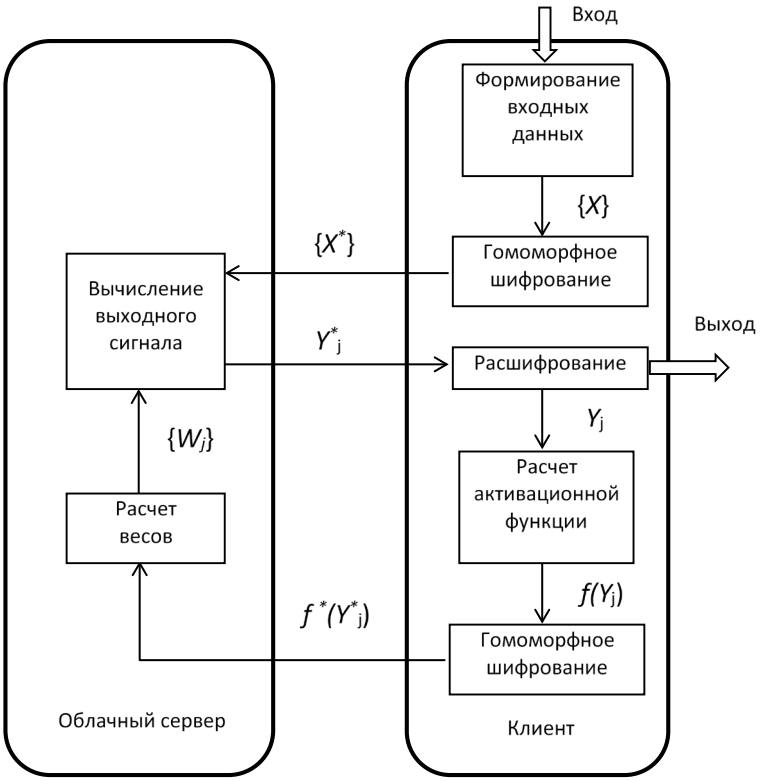


Рис. 2. Схема организации облачных вычислений

Для обеспечения защиты данных, участвующих в модели прогнозирования, предлагается использовать сочетание нескольких криптографических методов. Причем расчет необходимо распределить между облачным сервером и клиентской машиной (рис. 2). Механизм работы модели кратко можно описать следующим образом: зашифрованные данные отсылаются на сервер, который производит вычисление (1), вычисленное на первом слое сети значение передается клиенту для определения прохождения порога функции активации. Клиент расшифровывает полученные данные, проводит операцию сравнения, зашифровывает результат и отправляет его на сервер. Такая операция проводится несколько раз по количеству слоев нейронной сети. При этом сервер не имеет доступа к данным, а клиент – к параметрам сети.

Предлагается использовать схему полного гомоморфного шифрования на основе матричных полиномов [4]. Суть ее состоит в следующем. Пусть $Z_l^{N\times N}$ – кольцо $N\times N$ матриц с элементами из кольца Z_l целых чисел по модулю числа l.

Рассмотрим множество последовательностей матриц из $Z_l^{N\times N}$, $\mathrm{H} = \{A_0, A_1, A_2, ...\}$, $A_i \in Z_l^{N\times N}$ таких, что все A_i, кроме конечного их числа, равны нулевой матрице. $Z_l^{N\times N}(X)$ обозначает множество таких последовательностей.

Если $H, G \in Z_l^{N\times N}(X)$, $G = \{B_0, B_1, B_2, ...\}$, $B_i \in Z_l^{N\times N}$, тогда определим:

$$\mathrm{H} + \mathrm{G} = \{A_0+B_0, A_1+B_1, A_2+B_2, ...\};$$
$$\mathrm{H}\times\mathrm{G} = \{A_0\times B_0, A_0B_1+A_1B_0, A_0B_2+ +A_1B_1+A_2B_0, ...\} = \{C_k\}, \quad (3),$$

где $C_k = \sum_{i+j=k} A_i \cdot B_j$, $k = 0, 1, 2...$

Можно доказать, что при таких определениях операций сложения и умножения множество: $Z_l^{N\times N}(X)$ становится кольцом, а элементы этого кольца – матричными полиномами.

Данный алгоритм обеспечивает полную гомоморфность относительно операций сложения и умножения, определенных соотношениями (3), что реализовано в нейронной сети. Помимо этого, он обеспечивает некоторую фильтрацию математического шума, что позволяет проводить операции умножения и суммирования над зашифрованными данными.

Предложенная модель расчета на основе нейронной сети с использованием облачного сервиса и защитой данных гомоморфным шифрованием обеспечит высокую степень информационной безопасности системы и позволит проводить распределенную обработку данных.

Библиографический список

1. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Повышение оперативности и надежности облачной инфраструктуры на базе распределенной файловой системы / Актуальные вопросы естествознания // Сб. материалов III Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. 5 апреля 2018 года / Сост.: Н. Е. Егорова. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. 303 с.

2. Моделирование теплового состояния поперечного сечения трубопровода при промерзании теплоизоляции / В. Е. Мизонов, Н. Н. Елин, А. В. Попелышко, В. А. Мыльников // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 2. С. 67–70.

3. *Прокудин А. Н., Аксютина М. С.* Анализ применения гомоморфных схем шифрования в алгоритмах машинного обучения // Молодой ученый. 2017. № 23. С. 91–95.

4. Методы полностью гомоморфного шифрования на основе матричных полиномов / Л. К. Бабенко, Ф. Б. Буртыка, О. Б. Макаревич, А. В. Трепачева // Вопросы кибербезопасности. 2015. № 1. С. 17–20.

УДК 004.89; 004.942

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНОГО СЕРВИСА

В статье предложена экспертная система для оценки безопасности облачного сервиса на основе технологии нейро-нечетких сетей. Предложен сводный интегральный показатель информационной безопасности системы, рассчитываемый на основе групповых показателей, «взвешенных» с учетом их значимости.

Ключевые слова: *облачные вычисления, виртуализация, критерии оценки, нейро-нечеткое моделирование, кластеризация.*

V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD Sc. Econ., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AN EXPERT SYSTEM FOR EVALUATING INFORMATION SECURITY CLOUD SERVICE

The article proposes an expert system for assessing the security of cloud service based on the technology of neuro-fuzzy networks. The summary integral indicator of information security of system calculated on the basis of the group indicators "weighed" taking into account their importance is offered.

Keywords: *cloud computing, virtualization, evaluation criteria, neuro-fuzzy modeling, clustering.*

Конфигурирование облачного сервиса должно производиться не только в соответствии с процессами, планируемыми к реализации в его рамках, но и с учетом требований надежности и безопасности системы, ее устойчивости к внешним и внутренним угрозам [1]. Поэтому актуальными являются задачи первоначальной оценки информационной безопасности облачной системы, а также непрерывного ее мониторинга.

Процесс анализа безопасности облачного сервиса является сложной задачей [2], включающей в себя оценку множества показателей в разрезе различных измерений. При этом часть данных может быть представлена не в количественном, а в качественном измерении или исходная информация может быть неточной, неполной, недостоверной.

На сегодняшний день не существует единой методики оценки безопасности облачного сервиса, существующие подходы ограничиваются мониторингом и статистическим анализом динамики отдельных показателей, что, принимая во внимание характер анализируемой информации, очевидно, является недостаточным и не может являться основанием для принятия стратегических решений.

Система мониторинга информационной безопасности облачного сервиса позволит оперативно получать необходимую информацию, анализировать ее с целью отслеживания угроз и предотвращения возможных инцидентов [3]. В статье рассматривается экспертная система оценки информационной безопасности облачного сервиса на базе иерархических нейро-нечетких систем.

Безопасность системы во многом определяется формально через мониторинг ее показателей за определенный период времени [4]. Для построения адекватной системы оценки безопасности решаются две задачи: объективный выбор показателей информационной безопасности и оценка их влияния на общую безопасность системы, а также качественная интерпретация результатов оценки с перспективой формирования адекватного решения.

Для расчета интегрального показателя информационной безопасности облачного сервиса предлагается использовать метод аддитивной

сверки отдельных факторов информационной безопасности по каждой укрупненной группе [5]. При этом рассматривается с укрупненных групп критериев, каждый из которых содержит k обобщающих показателей, каждый из которых характеризуется m факторами, которые оцениваются значениями x. Сводный интегральный показатель информационной безопасности облачного сервиса рассчитывается на основе групповых показателей, «взвешенных» с учетом их значимости.

$$IR = \sum_{i=1}^{c}\left[L_i \cdot \sum_{j=1}^{k_i}\left(\beta_{ij} \cdot \sum_{p=1}^{m_{ij}} \left(\delta_{ijp} \cdot x_{ijp} \right) \right) \right],$$

где L_i , β_{ij} , δ_{ijp} – веса укрупненных групп критериев, обобщающих показателей и отдельных факторов.

Расчет показателей информационной безопасности проводится балльным методом. При этом выполнение показателя относительно нормированного значения, принятого в качестве критерия оценки информационной безопасности, приравнивается к одному баллу, невыполнение показателя считается равным нулю, а перевыполнение – к двум баллам. Учитывая балльную оценку каждого показателя и весовые коэффициенты показателей, их обобщающих и укрупненных групп, рассчитывается интеграль-

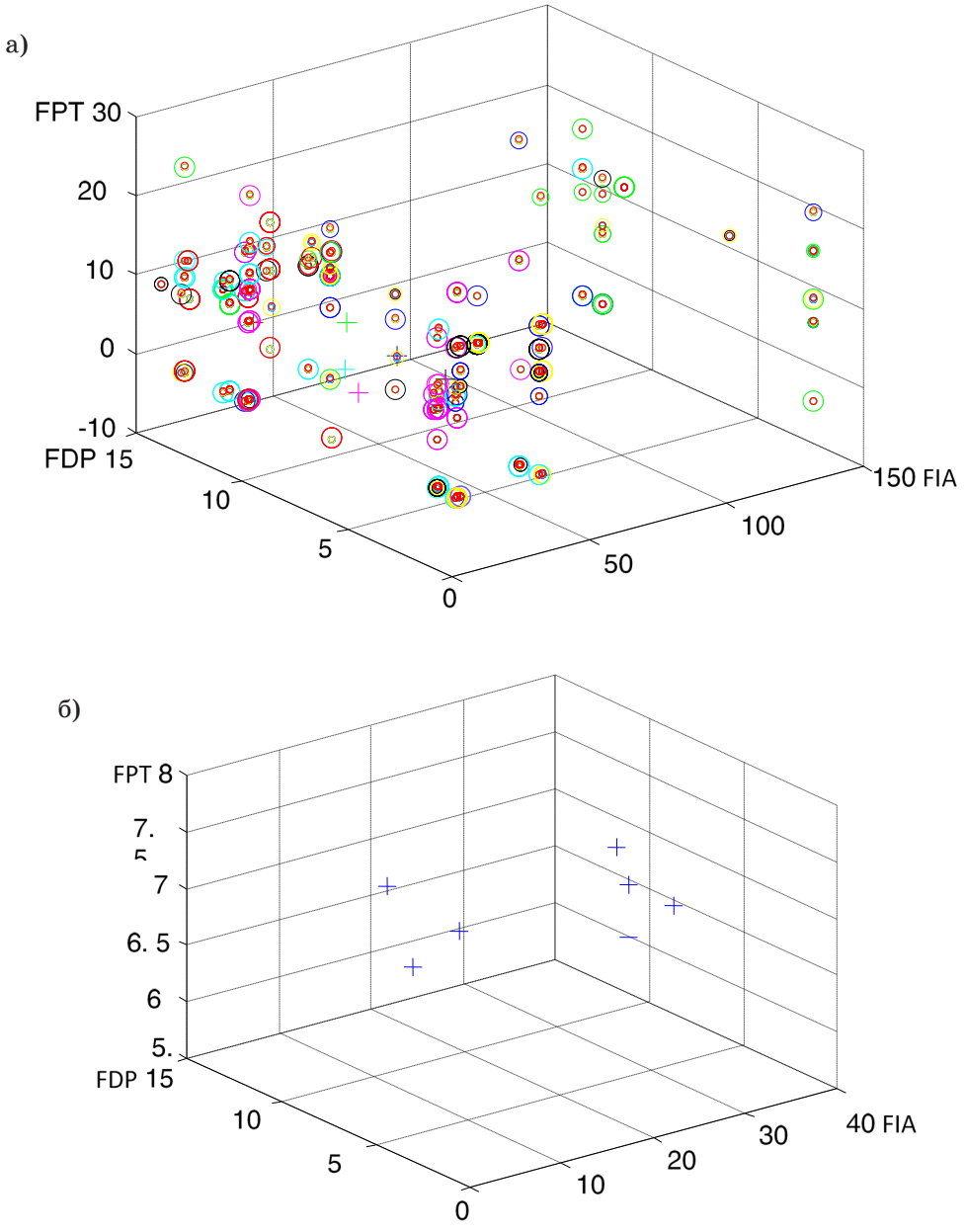


Рис. 1. Результаты кластеризации оценки состояния облачного сервиса в разрезе трех показателей: а) значения показателей, сгруппированные по кластерам; б) центры кластеров

ный показатель информационной безопасности облачного сервиса.

Для эффективного выбора конфигурации облачного сервиса необходимо таким образом управлять показателями x_i, чтобы значение IR было максимальным.

Для создания нейро-нечеткой модели оценки информационной безопасности с применением теории нечетких множеств нужно решить следующие задачи:

1. Выделить возможные состояния системы и классифицировать их по определенным группам (кластерам). Провести качественную и количественную оценку каждой группы по всему набору выделенных показателей.

2. Определить структуру и вид иерархической системы нечеткого вывода.

3. Описать в терминах нечеткой логики входные, выходные и промежуточные переменные модели.

4. Спроектировать и, по-возможности, оптимизировать базу нечетких правил.

5. Реализовать механизм обучения нейро-нечеткой системы.

Для классификации множества состояний системы предлагается использовать *c-means* алгоритм нечеткой кластеризации [6]. Результатом расчета на тестовых данных явились координаты центров семи кластеров, соответствующих состояниям безопасности облачной системы (рис. 1).

Описываемая нейро-нечеткая система, состав параметров которой (табл. 1) был подвергнут экспертной оценке, оценке адекватности

Таблица 1

Факторы нейро-нечеткой модели

Критерии и показатели	Факторы групп критериев и показателей
Элементарные сервисы безопасности	
Аудит безопасности (FAU)	1. Автоматическая реакция аудита безопасности (FAU_ARP)
	2. Генерация данных аудита безопасности (FAU_GEN)
	3. Анализ аудита безопасности (FAU_SAA)
	4. Просмотр аудита безопасности (FAU_SAR)
	5. Выбор событий аудита безопасности (FAU_SEL)
	6. Хранение данных аудита безопасности (FAU_STG)
Идентификация и аутентификация (FIA)	1. Отказы аутентификации (FIA_AFL)
	2. Определение атрибутов пользователя (FIA_ATD)
	3. Спецификация секретов (FIA_SOS)
	4. Аутентификация пользователя (FIA_UAU)
	5. Идентификация пользователя (FIA_UID)
	6. Связывание пользователь-субъект (FIA_USB)
Использование ресурсов (FRU)	1. Отказоустойчивость (FRU_FLT)
	2. Приоритет обслуживания (FRU_PRS)
	3. Распределение ресурсов (FRU_RSA)
Производные критерии	
Связь (FCO)	1. Неотказуемость отправления (FCO_NRO)
	2. Неотказуемость получения (FCO_NRR)
Приватность (FPR)	1. Анонимность (FPR_ANO)
	2. Псевдонимность (FPR_PSE)
	3. Невозможность ассоциации (FPR_UNL)
	4. Скрытность (FPR_UNO)
Критерии достижения высокоуровневых целей безопасности	
Защита данных пользователя (FDP)	1. Политика управления доступом (FDP_ACC)
	2. Функции управления доступом (FDP_ACF)
	3. Аутентификация данных (FDP_DAU)
	4. Экспорт данных за пределы действия ФБО (FDP_ETC)
	5. Политика управления информационными потоками (FDP_IFC)
	6. Функции управления информационными потоками (FDP_IFF)
	7. Импорт данных из-за пределов действия ФБО (FDP_ITC)
	8. Передача в пределах ОО (FDP_ITT)
	9. Защита остаточной информации (FDP_RIP)
	10. Откат (FDP_ROL)
	11. Целостность хранимых данных (FDP_SDI)

Окончание табл. 1

Критерии и показатели	Факторы групп критериев и показателей
	12. Защита конфиденциальности данных пользователя при передаче между ФБО (FDP_UCT)
	13. Защита целостности данных пользователя при передаче между ФБО (FDP_UIT)
Защита функций безопасности объекта (FPT)	1. Тестирование базовой абстрактной машины (FPT_AMT)
	2. Безопасность при сбое (FPT_FLS)
	3. Доступность экспортируемых данных ФБО (FPT_ITA)
	4. Конфиденциальность экспортируемых данных ФБО (FPT_ITC)
	5. Целостность экспортируемых данных ФБО (FPT_ITI)
	6. Передача данных ФБО в пределах ОО (FPT_ITT)
	7. Физическая защита ФБО (FPT_PHP)
	8. Надежное восстановление (FPT_RCV)
	9. Обнаружение повторного использования (FPT_RPL)
	10. Посредничество при обращениях (FPT_RVM)
	11. Разделение домена (FPT_SEP)
	12. Протокол синхронизации состояний (FPT_SSP)
	13. Метки времени (FPT_STM)
	14. Согласованность данных ФБО между ФБО (FPT_TDC)
	15. Согласованность данных ФБО при дублировании в пределах ОО (FPT_TRC)
	16. Самотестирование ФБО (FPT_TRC)
Критерии инфраструктуры	
Криптографическая поддержка (FCS)	1. Управление криптографическими ключами (FCS_CKM)
	2. Криптографические операции (FCS_COP)
Управление безопасностью (FMT)	1. Управление отдельными функциями ФБО (FMT_MOF)
	2. Управление атрибутами безопасности (FMT_MSA)
	3. Управление данными ФБО (FMT_MTD)
	4. Отмена (FMT_REV)
	5. Срок действия атрибута безопасности (FMT_SAE)
	6. Роли управления безопасностью (FMT_SMR)
Доступ к ОО (FTA)	1. Ограничение области выбираемых атрибутов (FTA_LSA)
	2. Ограничение на параллельные сеансы (FTA_LSA)
	3. Блокирование сеанса (FTA_SSL)
	4. Предупреждения перед предоставлением доступа к ОО (FTA_TAB)
	5. История доступа к ОО (FTA_TAH)
	6. Открытие сеанса с ОО (FTA_TSE)
Доверенный маршрут-канал (FTP)	1. Доверенный канал передачи между ФБО (FTP_ITC)
	2. Доверенный маршрут (FTP_TRP)

и ранжирован, представлена в виде каскада нечетких систем (рис. 2).

На основе экспертных оценок построены системы нечеткого вывода типа Мамдани. Функции принадлежности термов входных переменных сигмоидного и гауссовского типов, промежуточных переменных треугольного типа, выходной переменной – гауссовского типа. Параметры термов выходной переменной получены по результатам нечеткой кластеризации (рис. 1).

В структуре нейро-нечеткой сети выделены четыре слоя: термы входных переменных, антецеденты нечетких правил, заключения правил, агрегирование результата. Для обучения сети использовался модифицированный алгоритм [6], адаптированный для систем нечеткого вывода типа Мамдани.

С помощью данной модели была произведена оценка информационной безопасности на примере трех конфигураций [3] на основании интегрального критерия IR:

Конфигурация 1. Проведение бухгалтерских расчетов в среде конфигураций «1С: Предприятие» с использованием терминального сервера доступа.

Конфигурация 2. Ведение корпоративного файлового хранилища.

Конфигурация 3. Веб-сервис обслуживания клиентов электронного магазина.

По результатам расчетов были получены следующие значения (табл. 2). Полученные резуль-

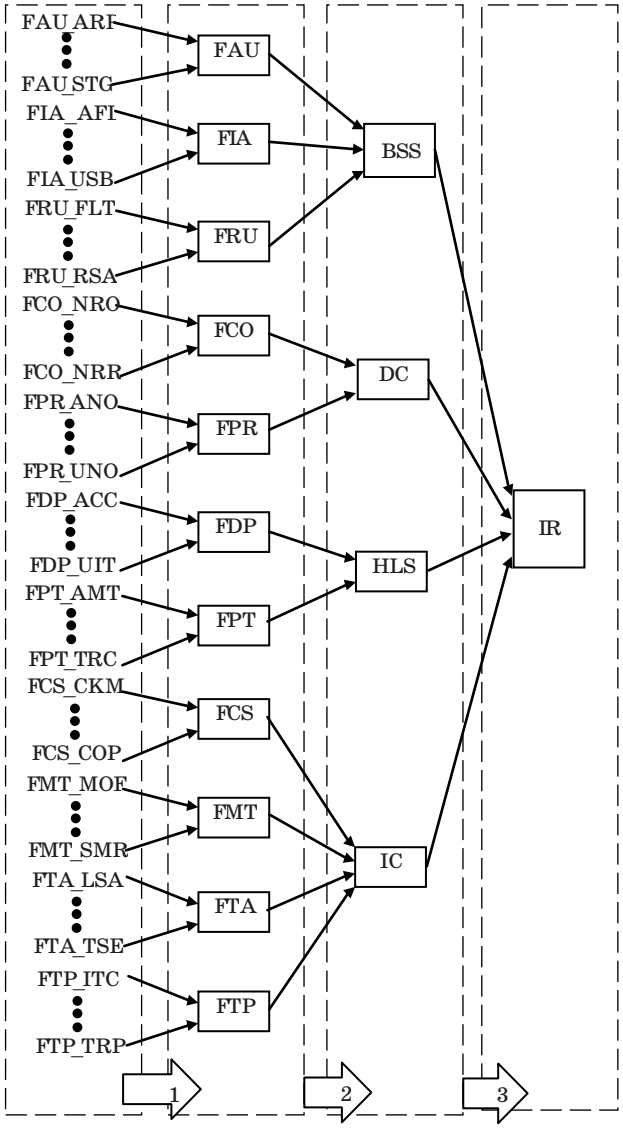


Рис. 2. Схема связей нейро-нечеткой модели

таты подтверждают адекватность предложенной модели.

Построенная иерархическая нейро-нечеткая сеть позволяет оценивать значение интегрального показателя безопасности облачного сервиса с целью улучшения его конфигурации согласно требованиям надежности и безопасности и тем самым снизить вероятность возникновения инцидентов.

Таблица 2

Оценка информационной безопасности различных конфигураций облачной информационной системы

Конфигу-рации; Оценки показа-телей	Конфигу-рация 1	Конфигу-рация 2	Конфигура-ция 3
Saf	Высокая	Средняя	Высокая
	Средняя	Высокая	Высокая
	Высокая	Средняя	Высокая
IR	72	79	96

Библиографический список

11. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Повышение оперативности и надежности облачной инфраструктуры на базе распределенной файловой системы // Актуальные вопросы естествознания: сб. материалов III Всерос. научно-практич. конф. с международным участием. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. 303 с.

12. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Анализ причин нарушения устойчивости облачных систем с учетом требований надежности и оперативности // Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018. С. 258–261.

13. *Беззатеев С. В., Мыльников В. А., Елина Т. Е.* Моделирование процессов подбора параметров облачных систем для обеспечения их устойчивости с учетом надежности и безопасности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Вып. 4. С. 654–662.

14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2008 – Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий.

15. *Штойер Р.* Многокритериальная оптимизация / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.

16. *Штовба С. Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLABM.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Акопов
Владимир Сергеевич
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление локальными системами, моделирование движения транспортных средств.
vakopov@yandex.ru



Андреева
Мария Владимировна
Магистрант.
Московский автомобильно-дорожный институт (технический университет) МАДИ, Москва.
Область научных интересов – мехатроника, робототехника.
poit15@ro.ru



Армашова-Тельник
Галина Семеновна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – экономика и управление на предприятии, организация и планирование хозяйственной деятельности, социальная инфраструктура предприятия, управление персоналом.
atgs@yandex.ru



Беззатеев
Сергей Валентинович
Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационные технологии, защита информации.
bsv@aanet.ru



Безмен
Петр Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент.
Юго-Западный государственный университет, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Область научных интересов – моделирование мехатронных и робототехнических систем.
pbezmen@yahoo.com



Белоусова
Мария Владимировна
Аспирант.
Санкт-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления, кафедра моделирования экономических систем.
Область научных интересов – теория надежности, математическая статистика, эконометрика.
27bmw1993@mail.ru



Бридский
Александр Владимирович
Студент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики.
Юго-западный государственный университет.
Область научных интересов – магнитные жидкости, Физическая акустика газов, жидкостей и твердых тел.
av-bridsky@yandex. ru



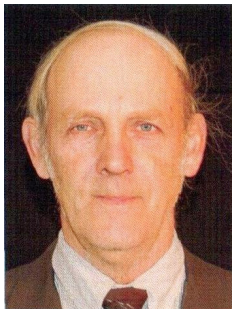
Брунов
Максим Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нечеткие регуляторы, пространство состояний, дискретные системы.
mak-brunov@yandex.ru



Булатов
Виталий Владимирович
Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра электромеханики и робототехники.
Область научных интересов – эксплуатационная надежность, оптические методы контроля.
bulatov-vitaly@yandex.ru



Бураков
Михаил Владимирович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нечеткое управление, нейронные сети, генетические алгоритмы.
bmv@sknt.ru



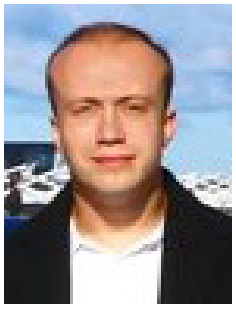
Виграненко
Юрий Трофимович
Доктор химических наук,
профессор кафедры неорганической и аналитической химии.
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова.
Область научных интересов – каталитический синтез органических соединений с использованием карбонильных комплексов металлов.
lta4455@yandex.ru



Ворочаева
Людмила Юрьевна
Кандидат технических наук, доцент.
Юго-Западный государственный университет, кафедра механики, мехатроники и робототехники.
Область научных интересов – робототехника, моделирование, многозвенные системы.
mila180888@yandex. ru



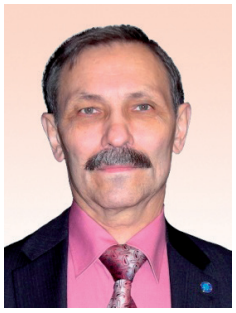
Гончарова
Виктория Игоревна
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, технические системы, электроника.
vikulya96@list. ru



Дедик
Максим Игоревич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – релейная защита.
kaf32@guap.ru



Елина
Татьяна Николаевна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры технологий защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление проектами, нейро-нечеткие системы, экспертные системы, экономико-математическое моделирование.
elinatn@yandex.ru



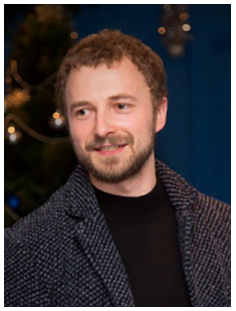
Ефимов
Александр Андреевич
Доктор технических наук,
профессор кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – силовая электроника, электропривод.
efa33@aanet.ru



Зубкова
Анна Николаевна
Старший преподаватель кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – менеджмент в электроэнергетике.



Иващенко
Владимир Андреевич
Доктор технических наук, профессор.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук.
Область научных интересов – теория, методы и математические модели управления сложными системами.
ivachenkova@gmail.com



Канавцев
Михаил Владимирович
Кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровое неравенство, кибербезопасность, социология кибербезопасности, цифровые трансформации, стандарты переподготовки кадров.
mvkanavtsev@gmail.com



Канавцев
Михаил Владимирович
Кандидат экономических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровые трансформации, менеджмент.
pr@center-si.com



Квас
Евгений Станиславович
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения.
Kvas66@bk.ru



Криволапчук
Игорь Григорьевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.



Кривчун
Екатерина Александровна
Кандидат химических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – химическая технология синтетических и биологически активных веществ.
kkrivchun@ya.ru



Крылова
Татьяна Егоровна
Старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – химическая технология целлюлозного-бумажного производства.
kaf32@aanet.ru
Krylova_tatjana@mail.ru



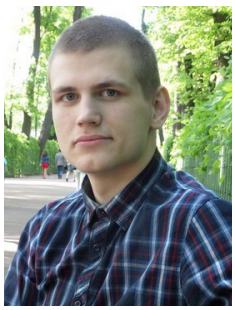
Кузьменко
Владимир Павлович
Доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроника, электро-измерения, светодиодные источники света, электромагнитная совместимость, надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения.
Mr.konnny@gmail.com



Кукушкин
Денис Валерьевич
Ведущий инженер-конструктор.
ПАО «Силовые машины».
Область научных интересов – возбуждение синхронных генераторов, полупроводниковые преобразователи.
Kukushkin_DV@spb.power-m.ru



Курбанов
Вугар Гариб Оглы
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления с искусственным интеллектом.
vugar_borchali@yahoo.com



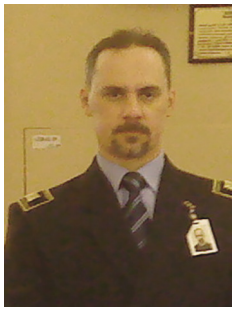
Лазерко
Виталий Александрович
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика и электротехника, магнитные поля, высокотемпературная сверхпроводимость.
lazerko-vitl@mail.ru



Лач
Сергей Юрьевич
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление режимами электроэнергетических систем.
serzh.lach@mail.ru



Лушников
Борис Владимирович
Кандидат технических наук, доцент.
Юго-Западный государственный университет, доцент кафедры механики мехатроники и робототехники.
Область научных интересов Робототехника, системы управления, математическое моделирование.
bvl_61@inbox.ru



Ляшенко
Александр Леонидович
Кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления.
Санкт-Петербургский горный университет.
Область научных интересов – анализ и синтез систем с распределенными параметрами частотными методами.
akuna_matata_kmv@mail.ru



Малатынская
Екатерина Юрьевна
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика, электротехника.
katuwka1996@mail.ru



Мальчиков
Андрей Васильевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – проектирование мехатронных и робототехнических систем.
zveroknnp@gmail. com



Маркелов
Александр Игоревич
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика, электротехника.
markelov.aleks96@mail.ru



Мартынов
Александр Александрович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика: электрические машины и полупроводниковая преобразовательная техника.
Martynov41@mail.ru



Михайлов
Алексей Андреевич
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, институт инновационных технологий в электромеханике и робототехнике.
Область научных интересов – развитие робототехники в сфере протезирования.
mikhaylov@scoliologic.ru



Мыльников
Владимир Аркадьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры технологий защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – облачные вычисления, распределенные информационные системы, имитационное моделирование, нейронные сети.
va.mylnikov@yandex.ru



Очередин
Андрей Дмитриевич
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетические системы.
kaf32@guap.ru



Павловский
Владимир Евгеньевич
Доктор физико-математических наук, профессор.
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва. Главный научный сотрудник.
Область научных интересов – мехатроника, робототехника.
vlpavl@mail. ru



Павлюков
Валерий Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электрические станции.
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – электрические станции, возобновляемые источники, релейная защита и автоматика, САПР.
avlukovva@gmail.com



Петровская
Наталья Вячеславовна
Кандидат физико-математических наук.
МГУ им. М. В. Ломоносова, механико-математический факультет. Кафедра теоретической механики и мехатроники. Москва. Научный сотрудник.
Область научных интересов Мехатроника, робототехника.
npetro@mail. ru



Пруссак
Николай Ильич
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – высокоэффективные способы получения электрической и тепловой энергии, электромеханика, электротехника.
nprussak@yandex. ru



Платонов
Валерий Павлович
Кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационные электромашинные устройства автоматики.
kaf_32@aanet.ru



Решетникова
Наталия Викторовна
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.
kaf31guap@gmail.com



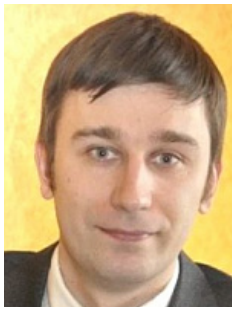
Положенцев
Дмитрий Сергеевич
Инженер 1-й категории.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – системы автоматического управления, силовой электропривод.
ds6476564@yandex.ru



Рысин
Александр Владимирович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика.
kaf32@guap.ru



Полунин
Вячеслав Михайлович
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики.
Юго-западный государственный университет.
Область научных интересов – магнитные жидкости, физическая акустика газов, жидкостей и твердых тел.
poluninvm1@gmail. Com



Ряполов
Петр Алексеевич
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики.
Юго-западный государственный университет.
Область научных интересов – магнитные жидкости, физическая акустика газов, жидкостей и твердых тел.
r-piter@yandex. ru



Полякова
Татьяна Геннадьевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные системы автоматического управления.
tgp@acts.aanet.ru



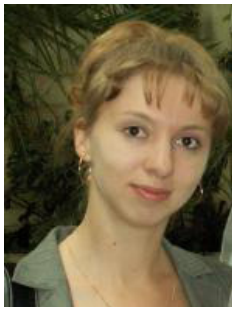
Савин Сергей Игоревич
Кандидат технических наук.
Университет Иннополис, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования.
Область научных интересов – многозвенные робототехнические системы, вопросы управления.
s. savin@innopolis. ru



Салова
Ирина Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование методом конечных элементов.
salova_irine@mail.ru



Свищенков
Данил Андреевич
Магистрант 2 курса специальности «Электрические системы и сети».
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – моделирование режимов в PowerFactory.
serg@elf.donntu.org



Семёнова
Вероника Алексеевна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность и энергосбрежение.
9767871@mail.ru



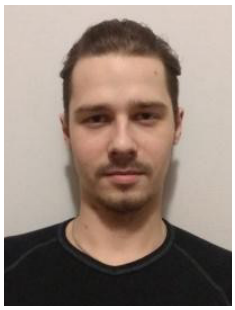
Сердитов
Владислав Альбертович
Кандидат технических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – надежность человека, ERP системы, моделирование производственных процессов, безопасность производственных процессов и производств, менеджмент в электроэнергетике.
vladlen04@mail.ru



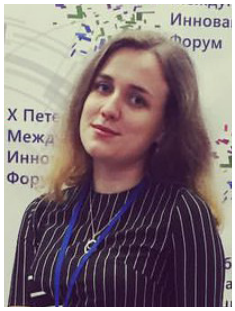
Сериков
Сергей Анатольевич
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы и процессы управления, применение интеллектуальных технологий для решения прикладных задач.
srkv@inbox.ru



Серикова
Елена Андреевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматы».
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, информатика.
wdv08@inbox.ru



Смирнов
Евгений Сергеевич
Магистрант.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова.
Область научных интересов Мехатронные и робототехнические устройства.
liltik13@gmail.com



Соколова
Полина Николаевна
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – менеджмент в электроэнергетике, системы управления.



Солёная
Оксана Ярославовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности; развитие методов оценки безопасности технологических объектов.



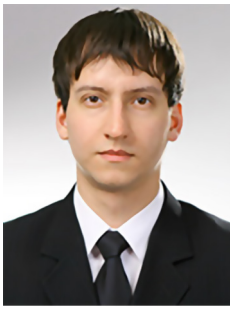
Солёный
Сергей Валентинович
Кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения.
ssv555ssv@yandex.ru



Тимофеев
Сергей Сергеевич
Старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины, автоматические системы проектирования.
kaf_32@aanet.ru



Тимофеев
Евгений Александрович
Студент.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – робототехника, системы управления, проектирование.
e. a. timofeev@gmail. com



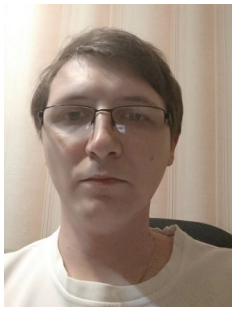
Ткаченко
Сергей Николаевич
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции».
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – электрические станции, возобновляемые источники, релейная защита и автоматика.
tsn1981@mail.ru



Тыртычный
Дмитрий Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «СГТУ им.Гагарина Ю.А.», проректор по научной работе.
Область научных интересов – теория, методы и математические модели управления сложными системами (дискретно-непрерывными технологическими процессами и мехатронными системами).
lac_sstu@mail.ru



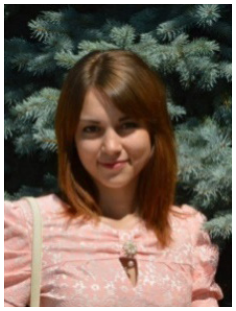
Фомичева
Татьяна Ивановна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – неорганическая химия, природные сорбенты.
mukhlenova@mail.ru



Черкасов
Сергей Анатольевич
Аспирант.
ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Гагарина Ю. А.».
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника.
Cherkasov.sergey@sstu.ru



Чернышева
Ольга Борисовна
Ассистент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – математические методы исследования систем реального времени; прикладное программирование.



Шельдешова
Елена Владимировна
Аспирант кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики.
Юго-западный государственный университет.
Область научных интересов – магнитные жидкости, физическая акустика газов, жидкостей и твердых тел.
blackberry__@mail. ru



Шишлаков
Владислав Федорович
Доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.
svfmail@yandex.ru



Шишлаков
Дмитрий Владиславович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – многосвязные системы автоматического управления.



Якимовский
Дмитрий Олегович
Кандидат технических наук,
начальник научно-исследовательского отделения.
Научно-исследовательский институт командных приборов.
Область научных интересов – прецизионное приборостроение.
yakimovsky@yandex.ru



Яцун
Андрей Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-западный государственный университет,
Область научных интересов – робототехника, системы управления, проектирование.
teormeh@inbox.ru



Яцун
Сергей Федорович
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов– мехатроника, робототехника, системы управления.
teormeh@inbox. ru

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Акопов В. С., *Беседин Н. А.* Гибридный привод дисковых тормозов колес автомобиля 3

Акопов В. С., *Пакканен В. А.* Система запуска газотурбинного двигателя и ее имитационная модель 6

Акопов В. С., *Полякова Т. Г.*, *Тимофеев С. С.* Потенциометрическая маломощная следящая система 11

Акопов В. С., *Салова И. А.* Влияние схемы расположения греющего кабеля на процессы в противообледенительной системе 15

Акопов В. С., *Соловьев С. И.* Противопомпажная система с контролем температуры за турбиной 20

Бабкин И. А., *Алексеева Е. А.*, *Тонких С. С.* Разработка управляющей ЭВМ 24

Бураков М. В., *Брунов М. С.* Исследование алгоритмов идентификации на лабораторном стенде 27

Бураков М. В., *Брунов М. С.* Модальное управление системой с малыми отрицательными нулями передаточной функции 32

Бураков М. В., *Якимовский Д. О.* Нейросетевой наблюдатель скорости вращения двигателя-маховика 37

Бураков М. В. Управление системой магнитной левитации 42

Городецкий А. Е., *Курбанов В. Г.*, *Тарасова И. Л.* Ситуационное управление группой SEMS 46

Ершов Д. Ю., *Лукьяненко И. Н.*, *Тыртычный А. А.* Разработка алгоритма расчета характеристик инерциальных датчиков, работающих в режиме автоколебаний 53

Жога В. В., *Дяшкин-Титов В. В.*, *Несмиянов И. А.*, *Дяшкин А. В.* Алгоритм синтеза управляющих усилий приводов манипулятора-трипода 60

Зайцев А. А. Алгоритм управления полетом БПЛА для задачи слежения за движущимся объектом 66

Криволапчук И. Г., *Якимовский Д. О.* Особенности схемного моделирования блока управления двигателем-маховиком ... 71

Круглова Т. Н., *Власов А. С.* Разработка алгоритма для построения маршрута беспилотного транспортного средства для вождения по змейке в сельском хозяйстве 78

Лушников Б. В., *Егельский И. В.* Настройка ПИД-регулятора и нечеткого регулятора системы автоматического управления электроприводом руля высоты конвертоплана средствами пакета MatLab/Simulink 81

Ляшенко А. Л., *Морева С. Л.* Контроль тепловых полей в корпусах радиоэлектронных средств 85

Ляшенко А. Л. Разработка адаптивной распределенной системы управления для индукционной печи 89

Першин И. М., *Кухарова Т. В.*, *Ляшенко А. Л.* Исследование возможности и условий применения частотного метода синтеза распределенных систем для многомерных объектов 93

Першин И. М., *Ляшенко А. Л.* Диагностика и контроль тепловых процессов в паровых котлах 100

Положенцев Д. С. Проектирование и моделирование работы электропривода управляющего двигателя-маховика 103

Прокопов Е. Е. Динамическое виброгашение в системах с парамерическим управлением 108

Решетникова Н. В., *Ватаева Е. Ю.* Разработка системы управления подвижностью авиационного тренажера в среде LabView 111

Салова И. А., *Косухина А. А.* Анализ факторов, влияющих на результаты теплового FEM анализа 119

Смирнов Е. С. Разработка системы скалярного частотного управления для маркировщика м3 стана 5000 лпц № 9 123

Шишлаков Д. В., *Гончарова В. И.* Разработка контроллера управления коллекторными двигателями для малогабаритных технических комплексов 126

Яцун С. Ф., *Мальчиков А. В.*, *Яцун А. С.*, *Политов Е. Н.* Математическое моделирование системы управления промышленного экзоскелета 130

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Белоусова М. В., *Булатов В. В.* Автоматизация процесса обработки данных рекламаций на предприятиях машиностроения 135

Волохов М. А., *Мартынов А. А.*, *Платонов В. П.*, *Тимофеев С. С.*, *Чернышева О. Б.* Волногенератор для питания автономного морского объекта 141

Гончаренко Р. Б., *Киселев А. А.*, *Тимофеев С. С.* Применение инерционных накопителей энергии в распределенных и централизованных энергетических системах 148

Гришанов С. А. Получение параметров математических моделей генераторов, используемых в компьютерных программах имитационного моделирования..... 153

Ершов Д. Ю., *Лукьяненко И. Н.* Динамическая модель привода технологического оборудования с s степенями свободы 160

Ефимов А. А., *Мельников С. Ю.* Моделирование активного преобразователя тока с алгоритмом векторной широтно-импульсной модуляции 168

Кукушкин Д. В. Развитие бесщеточных возбудителей синхронных машин..... 177

Лазерко В. А. Моделирование тепловых полей системы индукционного нагрева для правки металлических конструкций в программной среде ECLUT 6.3 182

Малатынская Е. Ю. Влияние реакции якоря на постоянные магниты синхронного ветрогенератора при нагрузке..... 187

Маркелов А. И. Анализ использования аксиальных синхронных генераторов в мощных ветроэнергетичексих установках..... 193

Мартынов А. А., *Тимофеев С. С.* Моделирование системы энергообеспечения с электрохимическим генератором 197

Павлюков В. А., *Ткаченко С. Н.*, *Коваленко А. В.* Способ формирования кабельных связей панелей при автоматизированном проектировании схем вторичных коммуникаций 203

Солёная О. Я., *Пруссак Н. И.* Анализ особенностей интеграции orc-модулей в существующие электроэнергетические системы..... 209

Квас Е. С., *Кузьменко В. П.*, *Сериков С. А.*, *Солёный С. В.*, *Шишлаков В. Ф.* Организация безопасного доступа к системе промышленной автоматизации и IoT систем 215

Солёный С. В., *Шишлаков В. Ф.*, *Солёная О. Я.*, *Сериков С. А.*, *Лач С. Ю.*, *Рысин А. В.*, *Дедик М. И.*, *Очередин А. Д.* Измерительная часть электроэнергетического комплекса открытой архитектуры 219

Сериков С. А., *Солёный С. В.*, *Шишлаков В. Ф.*, *Солёная О. Я.*, *Серикова Е. А.*, *Михайлов А. А.* Система инерциального управления робототехническим протезом верхних конечностей для высоких усечений 226

Шелехова О. Г. Тепловые перегрузки асинхронного двигателя при переходе систем электроснабжения на международные европейские стандарты..... 232

Акинина Ю. С., *Сергеева Т. А.*, *Сергеев М. Ю.*, *Тюрин С. В.* Оценка эффективности встроенного в управляющий процессор сторожевого механизма на основе разметки кодов исполняемой программы 236

РОБОТОТЕХНИКА

Галин Р. Р. Сотрудничество человека и робота на примере коллаборативной робототехники..... 241

Иващенко В. А., *Мугин О. О.*, *Петров Д. Ю.*, *Черкасов С. А.* Оптимизация структур роботизированных комплексов резки и упаковки листового стекла 247

Павловский В. Е., *Андреева М. В.*, *Петровская Н. В.* Моделирование многозвенного колесного аппарата, имитирующего движение робозмей 253

Савин С. И., *Ворочаева Л. Ю.* Восстановление вертикального равновесия шагающего робота как оптимизационная задача 260

Савин С. И., *Ворочаева Л. Ю.*, *Ворочаев А. В.* Исследование влияния характеристик упругих передач на качество работы антропоморфного робота 264

Политов Е. Н., *Тимофеев Е. А.*, *Афонин Д. В.* Кинематический анализ двухсекционного колесного робота..... 272

Яцун С. Ф., *Ворочаева Л. Ю.*, *Савин С. И.*, *Мальчиков А. В.*, *Безмен П. А.* Диаграммы приземления колесного прыгающего робота с управляемым полетом 275

МЕНЕДЖМЕНТ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Армашова-Тельник Г. С., *Канавцев М. В.*, *Сердитов В. А.* Управление кадровым потенциалом на высокотехнологичных предприятиях в условиях перехода к шестому технологическому укладу 284

Армашова-Тельник Г. С., *Зубкова А. Н.* Особенности инструментария оценки эффективности Инновационных проектов..... 288

Армашова-Тельник Г. С., *Соколова П. Н.* Специфика внедрения энергоменеджмента в промышленные предприятия России..... 292

Семёнова В. А. Особенности разработки технико-экономического обоснования проектов в электроэнергетике 298

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Кривчун Е. А., Романова Е. А. Экспресс-оценка основных физико-химических показателей молока 300

Крылова Т. Е., Вигранеко Ю. Т., де Векки А. В. Каталитическое окисление 3-метилбутаналя в двухфазной системе жидкость – жидкость 303

Мищенко В. Я., Мищенко Е. В. Применение комбинированного вибрационного воздействия в процессе экстрагирования .. 307

Полунин А. И. Анализ математических моделей динамики вращающегося на опорах крупногабаритного кольца 310

Полунин В. М., Ряполов П. А., Шельдешова Е. В., Бридский А. В. Осцилляции магнитожидкостного активного элемента в сильных магнитных полях 319

Фомичева Т. И., Крылова Т. Е., Вигранеко Ю. Т., Колужникова Е. В. Карбонильные комплексы металлов 8 группы – катализаторы реакции гидрокарбоксилирования фурфурола 322

ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Беззатеев С. В., Мыльников В. А., Елина Т. Н. Протоколы многофакторной аутентификации в интернете автомобилей 324

Беззатеев С. В., Мыльников В. А., Елина Т. Н. Технологии реализации защищенного обмена данными 327

Мыльников В. А. Экспертная система оценки информационной безопасности облачного сервиса 330

Сведения об авторах 335

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ '19

Сборник докладов

17–20 апреля 2019 г.

Ответственный за выпуск:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шишлаков*

Редактор *Е. В. Торопова*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 12.04.19. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 40,2. Уч.-изд. л. 39,2. Тираж 150 экз. Заказ № 137.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67