

**С. В. Болтрушевич** – магистрант кафедры управления и информатики в технических системах  
**А. Ю. Кучмин** (канд. техн. наук, доц.) – научный руководитель

## ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ УСТАНОВКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Современные антенные установки (АУ) используют системы автовыбора люфта, в рабочем режиме движутся на ползучих скоростях, и требуют большого пускового момента. Одной из проблем создания надежных антенных установок, наряду с проблемами управления приводом такой системы и компенсации внешних нагрузок, является выбор двигателя для привода.

Сегодня является очевидным то, что электроприводы постоянного тока уже не являются единственными представителями регулируемых электроприводов (РЭП). Развитие науки, техники и технологии подошло к тому рубежу, когда стало возможно создание РЭП переменного тока вообще и в первую очередь на основе асинхронных двигателей.

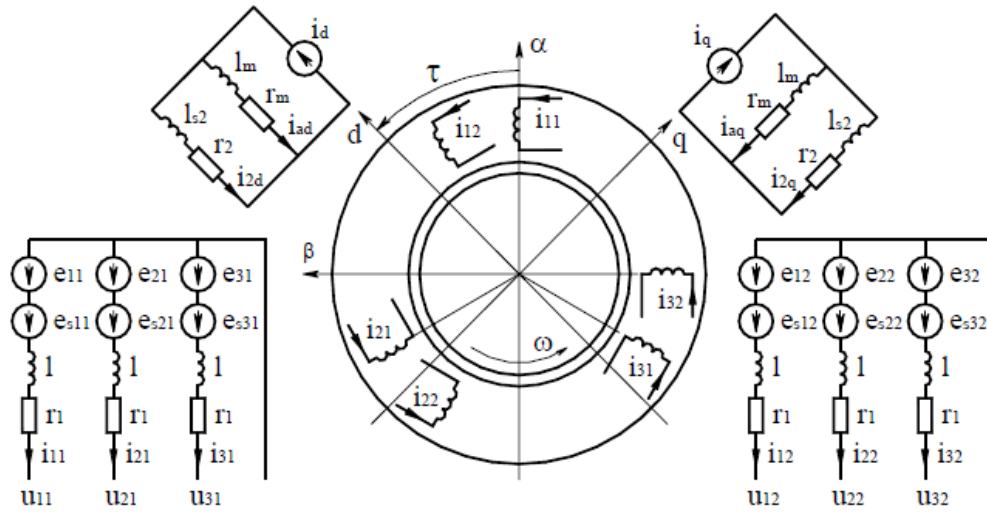
Преимущества РЭП – повышение качества обслуживаемого технологического процесса, реализация возможности энергосбережения за счет экономии электроэнергии до 30% при оптимизации рабочего процесса механизма, снижение износа механического оборудования за счет «мягкой» динамики и пр. – были, разумеется, известны специалистам ранее, однако его широкое применение сдерживалось отсутствием необходимой элементной базы. Все большее место в продукции электромашиностроительных заводов занимают модификации и специализированные исполнения электродвигателей.

Многофазный асинхронный двигатель (МАД) может являться альтернативой трехфазным машинам при питании последних от преобразователей частоты (ПЧ). Под многофазными асинхронными двигателями понимают такие двигатели, у которых число фаз обмотки статора более трех  $t > 3$  – и обмотка является расщепленной (статорная обмотка, оси одноименных фаз которой сдвинуты по расточке статора на  $\pi/t$  ряд), соединена в  $t/3$  симметричные группы и питается симметричной системой напряжения, имеющей временной сдвиг, равный пространственному сдвигу фаз.

Проблема обеспечения надежности остро стоит перед создателями энергетических объектов, систем управления, электрических машин для различных областей народного хозяйства России. Именно в этих областях МАД проявляет все присущие ему достоинства, которые будут описаны ниже.

Многофазные асинхронные машины применяются в основном в установках с полупроводниковыми преобразователями, т.е. являются системой «Многофазный ПЧ – асинхронный двигатель». В таких системах фазные напряжения и токи статорных обмоток машин могут иметь значительные искажения. Данная проблема решается путем введения микропроцессорного управления ПЧ для обеспечения постоянства частоты питающего напряжения, а значит и частоты вращения вала МАД. Важным преимуществом использования многофазных асинхронных машин в системах управления является то, что увеличение числа фаз статорных обмоток позволяет снизить пульсации момента и скорости на валу МАД. Следует отметить, что двигатели данного типа остаются работоспособными при отключении (обрыве) одной или даже нескольких фаз обмотки статора, так как в этом случае в нем продолжает создаваться вращающееся магнитное поле, что является существенным фактором вообще и в особенности в ответственных задачах управления и технологических процессах. При увеличении числа фаз также уменьшаются потери энергии в роторе от высших пространственных гармонических составляющих. Многофазная конструкция особенно эффективна в высокооборотных машинах, в которых масса и объем активных элементов сравнительно невелики, и существует проблема снижения поверхностных потерь энергии в роторе.

При математическом описании многофазного асинхронного двигателя принято, что он имеет несколько трехфазных обмоток, взаимно сдвинутых по фазе на угол, равный отношению 60 электрических градусов к количеству обмоток [1]. Нулевые точки обмоток выведены. Ротор короткозамкнутый. Описание асинхронной машины выполнено при ее подразделении на подсхемы, взаимосвязанные через зависимые источники напряжения и тока, как изображено на рисунке.



Подсхемы многофазной асинхронной машины

Статорные обмотки описаны в фазных осях при следующих обозначениях:  $n$  – номер фазы,  $m$  – номер обмотки,  $M$  – количество трехфазных обмоток,  $u_{nm}$  – напряжения фаз,  $i_{nm}$  – токи фаз. В подсхемах статорных обмоток в качестве зависимых источников учтены фазные ЭДС  $e_{nm}$  (обусловленные магнитным потоком в зазоре), а также ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{snm}$ . Учтены индуктивности фаз  $l$  и активные сопротивления  $r_1$ . ЭДС  $e_{snm}$  и индуктивность  $l$  определяются при использовании следующих параметров:  $l_{sm}$  – индуктивность рассеяния фаз в симметричном режиме работы всех обмоток,  $l_{s1}$  – индуктивность рассеяния фаз в симметричном режиме работы одной трехфазной обмотки (остальные разомкнуты),  $l_0$  – индуктивность нулевой последовательности. Роторные контуры описаны во взаимно перпендикулярных осях  $d$  и  $q$ , неподвижных относительно ротора. В подсхемах роторных контуров по осям  $d$  и  $q$  учтены в качестве зависимых источников токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ . Учтены индуктивность намагничивания  $l_m$ , активное сопротивление цепи намагничивания  $r_m$ , индуктивность рассеяния обмотки ротора  $l_{s2}$  и активное сопротивление обмотки ротора  $r_2$ .

В модели машины используются следующие индуктивности:

$$l = 2l_{s1} - l_{sm} \quad l_a = M(l_{sm} - l_{s1}) \quad l_b = \frac{l_0 - l}{3}$$

В модели машины также используются коэффициенты

$$c_{nm} = \cos \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n - 1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right]$$

$$s_{nm} = \sin \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n - 1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right]$$

$$c_m = \cos \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right]$$

$$s_m = \sin \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right]$$

Для подсхемы статорных обмоток справедливы уравнения

$$\frac{di_{nm}}{dt} = \frac{1}{l + l_{st}} \left( e_{nm} + e_{snm} - u_{nm} - r_1 i_{nm} + l_{st} \frac{di_{nm}}{dt} \right)$$

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}$$

$$\frac{di_{\beta}}{dt} = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}$$

$$\frac{di_{\alpha 0}}{dt} = \sum_{m=1}^M c_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}$$

$$\frac{di_{\beta 0}}{dt} = \sum_{m=1}^M s_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}$$

ЭДС взаимной индукции фаз статорных обмоток по путям рассеяния

$$e_{snm} = -l_a \left( c_{nm} \frac{di_{\alpha}}{dt} + s_{nm} \frac{di_{\beta}}{dt} \right) - l_b \left( c_m \frac{di_{\alpha 0}}{dt} + s_m \frac{di_{\beta 0}}{dt} \right)$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} i_{nm}$$

$$i_{\beta} = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} i_{nm}$$

Токи реакции якоря по осям d и q

$$i_d = i_{\alpha} \cos \tau + i_{\beta} \sin \tau$$

$$i_q = i_{\alpha} \sin \tau - i_{\beta} \cos \tau$$

Производные токов якоря по осям d и q

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{di_{\alpha}}{dt} \cos \tau + \frac{di_{\beta}}{dt} \sin \tau - \omega i_q$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{di_{\alpha}}{dt} \sin \tau - \frac{di_{\beta}}{dt} \cos \tau + \omega i_d$$

Токи роторных контуров по осям d и q определяются из следующих уравнений

$$\frac{di_{ad}}{dt} = \frac{l_{s2} \frac{di_d}{dt} - r_m i_{ad} + r_2 i_{2d}}{l_m + l_{s2}}, i_{2d} = i_d - i_{ad}$$

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{l_{s2} \frac{di_q}{dt} - r_m i_{aq} + r_2 i_{2q}}{l_m + l_{s2}}, i_{2q} = i_q - i_{aq}$$

Проекции ЭДС на оси d и q асинхронной машины

$$e_d = -l_m \left( i_{aq} \omega + \frac{di_{ad}}{dt} \right)$$

$$e_q = l_m \left( i_{ad} \omega + \frac{di_{aq}}{dt} \right)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$e_{\alpha} = e_d \cos \tau + e_q \sin \tau$$

$$e_{\beta} = e_d \sin \tau - e_q \cos \tau$$

ЭДС зависимых источников в фазах обмоток статора

$$e_{nm} = e_{\alpha} c_{nm} + e_{\beta} s_{nm}$$

Электромагнитный вращающий момент, частота вращения многофазной асинхронной машины определяются с учетом числа пар полюсов и здесь не приводятся.

Условно разделив исследования за рубежом и в нашей стране, можно перечислить следующее применение многофазных асинхронных двигателей. В США отмечают перспективность МАД для электромобилей, медицинской техники, в испытательных приборах, а также существует патент на многофазный асинхронный электропривод для глубоководного аппарата [2]. В Германии МАД применяются для привода компрессоров и проводились исследования, которые выявили целесообразность выполнения ЭП переменного тока мощностью выше 7 МВт с двумя трехфазными обмотками [3]. В Японии фирма «SANYO» использует различные типоразмеры пятифазных двигателей для применения в металлорежущих станках для работы в глубоком вакууме. В Португалии на химическом комбинате в Porto Torres установлен частотно-регулируемый асинхронный электропривод турбокомпрессора мощностью 13 кВт.

В СССР серийно выпускались шестифазные генераторы, которые применялись на атомном ледоколе «Ленин». Многофазными машинами и изучением электромагнитных процессов в них занимались Соустин Б.П. и Бражников В.Ф. В настоящее время в России многофазными машинами занимаются в Ивановском Государственном Техническом Университете Голубев А.Н., его коллеги и другие исследователи [4].

Преимущества МАД и их свойства требуют дополнительных исследований в области моделирования их магнитных, тепловых полей и надежности указанных двигателей.

#### **Библиографический список**

1. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение). Под редакцией Крутякова Е.А. Санкт – Петербург, «Силовые машины» «Электросила», 2004 г. 252 с. с илл.
2. Multiphase Induction Drive For Submarines. Patent Number 4,743,828 May 10, 1988.
3. Hughes, Austin. Electric motors and drives. 2<sup>nd</sup> ed., 1993.-1993.-339 pp.
4. Глухов Д.М. Автореферат диссертации Моделирование асинхронных двигателей в аварийных режимах работы, Томск, 2005 г.