

И. А. Розова – магистрант кафедры компьютерной математики и программирования

В. А. Каргин (канд. техн. наук, доц.) – научный руководитель

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Техническая эксплуатация функциональных комплексов кораблей включает в себя непосредственное использование, техническое обслуживание и подготовку личного состава [1]. Особую важность приобретает качественное обучение персонала. Большое значение в подготовке специалистов приобретает возможность имитировать изменение внешних условий эксплуатации, а так же нештатных и аварийных ситуаций, проявление которых невозможно организовать в реальных условиях без серьезных последствий для самой техники [1, 2].

Использование тренажерного комплекса для обучения личного состава позволяет сформировать моторно-рефлекторные навыки действий в сложных ситуациях, показать физическую сущность протекающих в оборудовании процессов, их взаимосвязи, то есть позволяет имитировать различные режимы работы, влияние внешних условий, нештатные и аварийные ситуации [2].

Существуют различные тренажерные комплексы, в которых аппаратная часть может быть представлена макетами различных пультов управления. В общем случае, если аппаратная часть представлена дисплейными аналогами (виртуальными пультами управления), тренажерный комплекс представляет собой компьютерный тренажер [2].

Из всех видов компьютерных тренажеров наиболее полезным для качественного обучения личного состава является динамический тренажер, имеющий в своей основе математические модели реальных физических процессов, протекающих в исследуемом сложном техническом объекте [3]. Такой компьютерный тренажер представляет собой совокупность различных моделей: моделей механизмов, входящих в состав двигательной установки, моделей пультов управления и моделей поста руководителя обучением.

Для расчета достаточно полной модели сложного технического объекта, в данном случае двигателя внутреннего сгорания, требуются внушительные машинные ресурсы. В рамках разработки компьютерного тренажера обычно не требуется настолько подробное моделирование поведения исследуемого объекта, в этом случае полная (базовая) математическая модель упрощается до модели, соответствующей реальному объекту с точностью, определенной в техническом задании на разрабатываемый тренажер.

Для моделирования функционирования сложного технического объекта, такого, как двигатель внутреннего сгорания, создается базовая математическая модель. Базовая математическая модель функционирования двигателя внутреннего сгорания является математической моделью, построенной на основе исходной тематической модели (модели-описания) и соответствующих алгоритмов, включающих в себя формулы, алгебраические и трансцендентные уравнения, неравенства, логические условия и многое другое [4]. Входными параметрами X_n , где n – число входных параметров, помимо постоянных величин, характеризующих конструктивные особенности, для такой математической модели являются параметры следующих групп:

- параметры внешних условий ВУ (параметры атмосферного воздуха и забортной воды);
- параметры технического состояния ТС (коэффициенты гидравлического сопротивления, термические коэффициенты теплообменных аппаратов, зазоры и др.);
- параметры режима функционирования (частота вращения коленчатого вала и нагрузка).

Выходными параметрами Y_m , где m – число выходных параметров, меньшее, чем число входных ($m < n$), являются термогазодинамические и эксплуатационные показатели, характеризующие работу двигателя (рис. 1).

В зависимости от степени детализации базовая математическая модель может рассматриваться на двух различных иерархических уровнях [4]. На первом уровне модель описывает двигатель внут-

ренного сгорания как единое целое, без рассмотрения функционирования отдельных агрегатов, входящих в его состав. Цель такого представления заключается в создании модели, изучающей сложный технический объект в его взаимодействии с управляющими и контролирующими воздействиями. На втором уровне базовая математическая модель описывает двигатель как совокупность моделей отдельных агрегатов, входящих в его состав. На этом уровне изучаются внутреннее функционирование элементов и их взаимосвязи. В этом случае, входные переменные одного агрегата могут быть входными переменными другого агрегата (рис. 1).

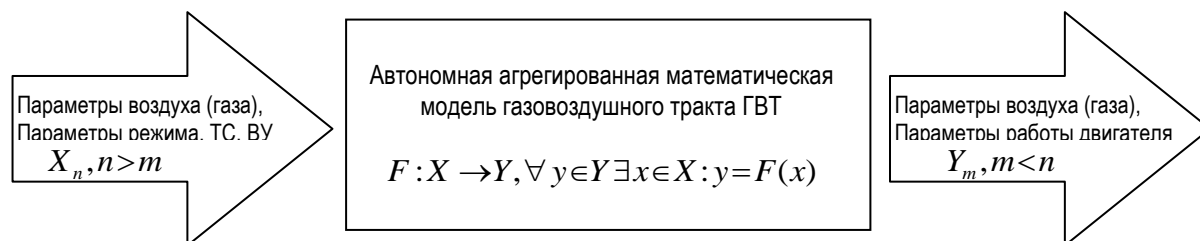


Рис. 1. Схема функционирования автономного элемента (агрегата) комбинированного ДВС – газозвоздушного тракта

Базовая математическая модель функционирования дизеля (БММ), как и любая другая математическая модель удовлетворяет следующим требованиям [4, 5]:

- адекватности – соответствие модели реальной исходной системе и учет наиболее важных связей и характеристик, то есть адекватности для реальных диапазонов изменения параметров внешних условий эксплуатации дизеля, технического состояния и нагрузок во всей области допустимых режимов работы дизеля. Адекватность достигается при удовлетворительных результатах сравнения расчетов на БММ функционирования двигателя внутреннего сгорания с соответствующими данными стендовых заводских или корабельных испытаний;

- универсальности – применимости модели к анализу ряда однотипных систем (в данном случае, однотипных двигателей внутреннего сгорания) с учетом их различных индивидуальных особенностей. Это позволяет расширить область применения модели для решения большего круга задач. Данное требование достигается на этапе отладки применительно к заданной версии или типу двигателя;

- возможности задания степени детализации для учета технического состояния агрегатов ГВТ и отдельных блоков дизеля;

- обеспечение численного моделирования выходных показателей функционирования дизеля на заданном режиме диагностирования с заданной точностью.

Поскольку одной из самых важных задач моделирования является обеспечение точности [5], необходимо проверять адекватность полученной модели экспериментальным данным. Для отладки базовой математической модели, проверки ее работоспособности и оценивания взаимосвязей между параметрами функционирования проводится вычислительный эксперимент, результаты которого сравниваются с данными стендовых испытаний – определяется относительная ошибка моделирования [4] (рис. 2). Предполагается, что для реального объекта и для его математической модели однозначно определены отклики $Y_{\mathcal{O}i}$ и Y_{Pi} для заданных значений входного сигнала X_i . Относительная ошибка моделирования δ определяется по формуле (1):

$$\delta = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Y_{\mathcal{O}i} - Y_{Pi}}{Y_{\mathcal{O}i}}, \quad (1)$$

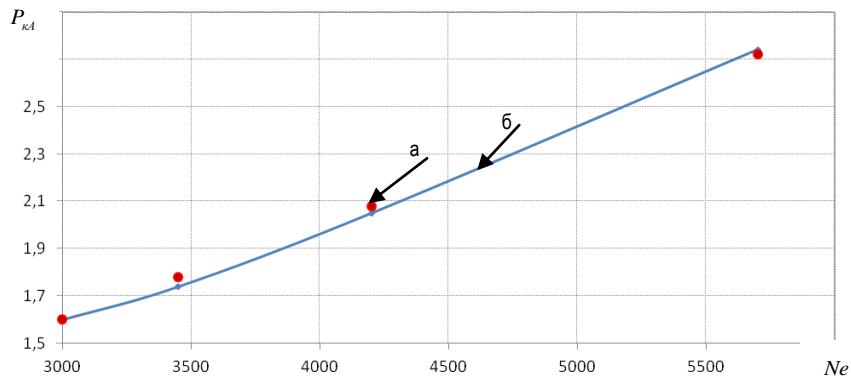


Рис. 2. Схема проверки адекватности математической модели реальному объекту.

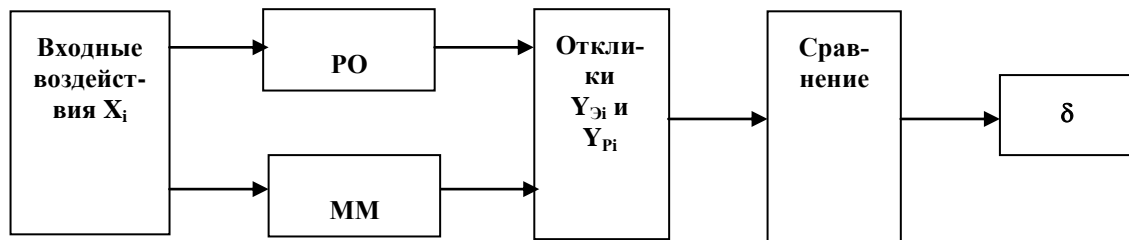


Рис. 3. График изменения давления воздуха после компрессора А $P_{кА}$ в зависимости от мощности Ne
(а – реальные данные, б - результаты вычислительного эксперимента)

Базовая математическая модель функционирования дизеля была проверена на множестве экспериментальных данных, что позволило установить уровень адекватности модели реальным данным с погрешностью не более 5% [4].

На основе базовой математической модели была получена упрощенная модель функционирования двигателя внутреннего сгорания для компьютерного тренажера. Данная модель удовлетворяет условиям технического задания на разработку тренажера и представляет собой регрессионную модель.

Рассмотрим построение регрессионной модели газовоздушного тракта двигателя внутреннего сгорания на примере получения уравнения множественной регрессии для давления воздуха после компрессора А $P_{кА}$.

По результатам исследований было установлено, что данный параметр зависит от изменений таких величин, как эффективная мощность дизеля Ne , температура атмосферного воздуха T_0 , влажность атмосферного воздуха φ_0 , и температура «заборной» воды T_{wz} .

Для построения регрессионной модели необходимо привести исследуемые параметры к относительным величинам.

Например, относительное изменение давления воздуха после компрессора, $\delta P_{кА}$ определяется по формуле (2):

$$\delta P_{кА} = \frac{P_{кА} - P_{кАб}}{P_{кАб}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $P_{кА}$ – текущее значение давления воздуха после компрессора А; $P_{кАб}$ – значение давления воздуха после компрессора А на «базовом» режиме работы, равное $2,59 \text{ кг/см}^2$.

Для построения уравнения множественной регрессии используется метод пошаговой регрессии [6], который позволяет последовательно вводить каждый из факторов и оценивать его влияние на поведение интегрального показателя, в данном случае, изменение давления воздуха после компрессора А $P_{кА}$ (3):

$$\delta P_{кА} = 2,37 + 1,02 \delta Ne - 1,11 \delta T_0 + 0,01 \delta \varphi_0 + 1,77 \delta T_{wz} \quad (3)$$

Для оценки адекватности полученной регрессионной модели применяются следующие критерии: коэффициент детерминации, критерий Стьюдента и критерий Фишера.

Коэффициент детерминации R показывает степень доверия к данной модели на том объеме экспериментальных данных, которые были получены, а так же какой объем информации, содержащейся в экспериментальных данных, который может быть описан данной моделью [6]. Коэффициент детерминации R , равный 0,97, говорит о высокой степени доверия к полученной модели, и, что 97% данных описываются данной моделью. Следует отметить, что, поскольку модель построена на основе базовой математической модели, необходимо учитывать так же погрешность моделирования, которая установлена для базовой математической модели, то есть 5%. Таким образом, полученной регрессионной моделью описывается 92% исходных данных.

Адекватность структуры уравнения проверяется критерием Фишера [6]. Так как расчетное значение F^* оказалось выше порогового F , уравнение признается адекватным исходным данным, с уровнем значимости 10% (с учетом погрешности моделирования базовой математической модели).

Проверка значимости факторов проводилась с помощью критерия Стьюдента на уровне значимости 5%. Так как все факторы оказались значимыми, данная модель пригодна для прогноза значений давления воздуха после компрессора А $P_{кА}$ в среднем, при этом ошибка прогнозирования не будет превышать 10% (с учетом погрешности моделирования базовой математической модели).

Таким образом, получение упрощенной модели функционирования двигателя внутреннего сгорания для компьютерного тренажера связано с исследованием более полной, базовой математической модели и результатов ее функционирования. Упрощенная модель функционирования двигателя внутреннего сгорания представляет собой регрессионную модель, полученную методом пошаговой регрессии. Для данной модели была проведена проверка адекватности реальным данным, в результате которой установлено, что модель удовлетворяет требованиям технического задания на разработку тренажера, связанным с определенной точности моделирования функционирования двигателя и возможностью прогнозирования значений контролируемых параметров в среднем. Полученная модель предоставляет возможность при проведении тренировок в различных режимах и при различных областях допустимых значений оценивать параметры функционирования двигателя.

Библиографический список

1. Гацак, П. М. Технология создания программного и методического обеспечения универсальных тренажерных модулей / П. М. Гацак // Академия навигации и управления движением Новости 2003 № 4.
2. Магид, С. И. Проблемы современного энергетического тренажеростроения через призму терминологии / С. И. Магид, И. Ш. Загретдинов, Е. Н. Архипова, Л. П. Музыка. // Энергосбережения и водоподготовка 2007 №1.
3. Донской, А. Н. Тренажеры на базе ЭВМ для оперативного персонала ТЭЦ / А. Н. Донской // Энергетик 1995 № 5 с. 28.
4. Ананьев, А.Н. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Н. Ананьев // ЛВВМИУ имени В.И.Ленина 1995.
5. Самарский, А. А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов; 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001, 319 с.
6. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. Кн. 1 / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. М. Финансы и статистика 1986 366 с.