

Рамиль Зарифович Тумашев родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 145 научных работ в области теории и проектирования компрессоров газотурбинных и комбинированных энергоустановок.

R.Z. Tumashev (b.1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. PhD (Eng), assoc. professor of “Gas Turbine and Non-traditional Power Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 145 publications in the field of theory and design of compressors for gas turbine and combined power plants.

---

УДК 621.436

А. Г. Кузнецов

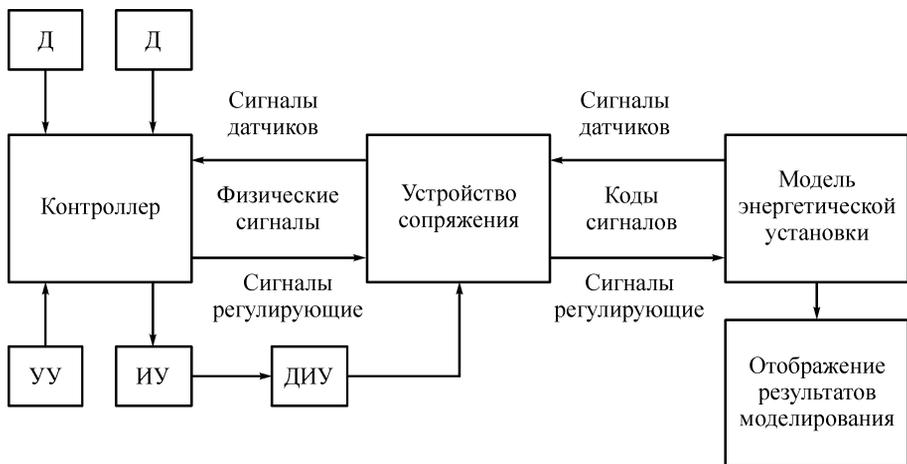
## **СТЕНД ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ДИЗЕЛЯМИ**

*Рассмотрены задачи, возникающие при создании стенда полунатурного моделирования динамических режимов энергетических установок в реальном времени. Предложена методика разработки “быстрой” динамической модели энергетической установки с дизелем. Рассмотрены варианты структуры стенда и сопряжения натурной и компьютерной частей стенда.*

В связи с необходимостью ускоренного проектирования и доводки двигателей и систем управления ими возникла задача создания и внедрения в практику методов полунатурного моделирования, которые позволяют разрабатывать и отлаживать для реальных режимов работы двигателя микропроцессорные средства систем управления одновременно с созданием самого двигателя. Полунатурное моделирование позволяет также экономить средства, затрачиваемые на испытания двигателей. При полунатурном моделировании реальная микропроцессорная система управления в процессе отладки программного обеспечения сопрягается с математической (компьютерной) моделью создаваемого или испытываемого двигателя.

Для осуществления полунатурного моделирования необходимо разработать комплекс аппаратных и программных средств, образующих стенд полунатурного моделирования (рис. 1). В натурную часть стенда входят микропроцессорный контроллер, управляющее устройство, датчики и исполнительные устройства системы управления. Цифровая компьютерная модель описывает динамические свойства двигателя и транспортной установки.

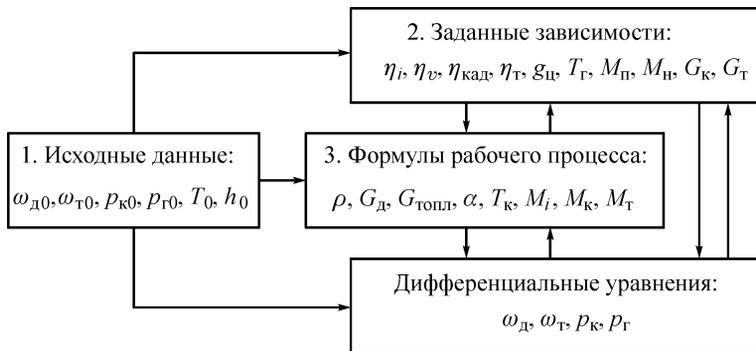
При полунатурном моделировании обмен информацией между контроллером и моделью энергетической установки должен осуществляться в реальном времени с периодичностью, задаваемой программой контроллера.



**Рис. 1. Схема стенда полунатурного моделирования**

Основу динамической математической модели комбинированного двигателя составляют дифференциальные уравнения поршневой части (собственно дизеля), турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов [1, 2]. Изменения угловых скоростей вала дизеля  $\omega_d$  и ротора турбокомпрессора  $\omega_t$  описываются уравнениями динамического баланса механической энергии при вращении твердого тела  $d\omega/dt = \left( \sum_1^n M_i \right) / I$ , где  $I$  – момент инерции вала дизеля или ротора турбокомпрессора;  $M_i, i = 1, \dots, n$ , – крутящие и тормозящие вал или ротор моменты. Изменения давлений воздуха во впускном трубопроводе  $p_k$  и газов в выпускном трубопроводе  $p_r$  описываются уравнениями динамического баланса расходов при допущении о применимости к воздуху и отработавшим газам уравнения состояния идеального газа  $dp/dt = \frac{RT}{V} \sum_1^n G_i$ , где  $R$  и  $T$  – газовая постоянная и температура воздуха или отработавших газов;  $V$  – объем впускного или выпускного трубопровода;  $G_i, i = 1, \dots, n$ , – расходы воздуха, отработавших газов, топлива.

Представление правых частей дифференциальных уравнений в виде линейных функций и типовых нелинейностей [1] не обеспечивает требуемую точность расчета. Использование современных компьютерных программ расчета рабочего процесса [3] для полунатурного моделирования неприемлемо, так как расчет длится сравнительно долго и время моделирования отстает от реального времени. В связи с этим возникает задача создания “быстрой” динамической математической модели энергетической установки и комбинированного дизеля как ее основного элемента, которая при достоверном определении основных параметров рабочего процесса осуществляет расчет достаточно быстро для организации обмена информацией с контроллером в реальном времени.



**Рис. 2. Структура математической модели**

Структура математической модели энергетической установки приведена на рис. 2. Используемые в расчете правых частей дифференциальных уравнений параметры рабочего процесса делятся на три группы. Одна группа параметров, задающих начальный установившийся режим работы, вводится как исходные данные — это  $\omega_{д0}$ ,  $\omega_{т0}$ ,  $p_{к0}$ ,  $p_{г0}$ , температура окружающей среды  $T_0$ , положение органа регулирования топливоподачи (рейки топливного насоса)  $h_0$ .

Среди остальных выделяются параметры, которые для сокращения времени моделирования определяют заранее в результате предварительных расчетов и задают в виде готовых зависимостей. Таким образом целесообразно определять коэффициенты, характеризующие отличие реальных рабочих процессов дизеля и турбокомпрессора от идеальных: индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) дизеля  $\eta_i$ , коэффициент наполнения дизеля  $\eta_v$ , адиабатический КПД компрессора  $\eta_{кад}$ , эффективный КПД турбины (с учетом механических потерь в турбокомпрессоре)  $\eta_T$ . Также следует определять параметры, зависящие от конкретного конструктивного исполнения элементов комбинированного двигателя и в связи с этим наиболее сложно определяемые при расчете рабочих процессов: цикловую подачу топлива  $g_{ц}$ , температуру отработавших газов  $T_T$ , момент внутренних потерь дизеля  $M_{п}$ , момент нагрузки  $M_{н}$ , расходы воздуха через компрессор  $G_{к}$  и газов через турбину  $G_{т}$ . Связи между параметрами рабочего процесса могут быть представлены таблицами или в виде функциональных зависимостей. При табличной форме значения параметров второй группы задаются в узлах пространственной сетки изменения первичных параметров. Значения параметров на любом расчетном режиме определяются методом линейной интерполяции. При функциональной форме представления зависимости между параметрами рабочего процесса задаются в виде полиномов, коэффициенты которых определяются методом наименьших квадратов.

По исходным данным и заранее заданным зависимостям по формулам теории рабочих процессов вычисляются остальные необходимые

параметры: плотность воздуха на впуске  $\rho$ , расход воздуха через диезель  $G_d$ , расход топлива  $G_{\text{топл}}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , температура воздуха на впуске  $T_k$ , индикаторный момент дизеля  $M_i$ , момент компрессора  $M_k$ , момент турбины  $M_T$ .

Возможны следующие варианты структуры стенда полунатурного моделирования (см. рис. 1). Натурная часть стенда содержит контроллер. В случае использования стенда для отладки взаимодействия контроллера с внешними устройствами на физическом уровне сигналов к контроллеру могут быть подключены: устройство управления (УУ) энергетической установкой, часть реальных датчиков (Д), исполнительное устройство (ИУ) регулятора с датчиком (ДИУ). При моделировании замкнутой системы управления эти устройства могут войти в состав модели.

Все необходимые программные средства стенда могут быть реализованы на одном компьютере в современной операционной системе. Возможно использование в составе стенда двух компьютеров: в одном записана модель дизеля и транспортной установки (упрощенная конфигурация компьютера), другой служит средством связи оператора со стендом — с его помощью задаются, в том числе оперативно, настройки системы управления и отображаются результаты моделирования.

Для связи натурной и компьютерной частей стенда используется специально разработанное устройство сопряжения, которое преобразует вид регулирующих сигналов и сигналов датчиков. Коды сигналов датчиков на выходе компьютерной части стенда преобразуются в физическую форму, воспринимаемую контроллером. Для регулирующих сигналов, вырабатываемых контроллером, осуществляется обратное преобразование — из физической формы в код.

Датчики, используемые на энергетической установке с дизелем, вырабатывают физические сигналы аналогового и дискретного типов. Аналоговые сигналы — ток и напряжение. Характерный уровень токовых сигналов составляет 4...20 мА. Максимальное значение сигналов напряжения достигает обычно нескольких вольт. На выходе датчиков частоты вращения и положения регулирующего органа формируются колебательные сигналы с частотой от нескольких герц до килогерц. Дискретные сигналы — импульсные.

Регулирующие сигналы, формируемые контроллером, могут иметь аналоговую или импульсную формы с использованием широтно-импульсной модуляции. Чаще всего изменяются частота и скважность таких сигналов.

Устройство сопряжения стенда удобно реализовать на базе однокристалльной микроЭВМ, которая организует движение потоков информации между натурной и компьютерной частями стенда и задает режим работы каналов преобразования сигналов. Современные

однокристалльные микроЭВМ сочетают достаточно высокое быстрое действие с широкими функциональными возможностями. Компьютер стенда полунатурного моделирования может использоваться для оперативного управления стендом и отображения результатов моделирования. “Быстрая” динамическая модель установки может быть реализована в микроЭВМ устройства сопряжения, функции которого в этом случае расширяются и включают не только преобразование сигналов, но и непосредственно процесс моделирования. Такой подход может быть оправдан именно с позиций работы стенда в реальном времени. В этом случае отпадает необходимость применения для организации работы в реальном времени компьютерных операционных систем, а для отображения результатов моделирования можно использовать наиболее удобную операционную систему и соответствующие программные средства.

На основе изложенных подходов разработан стенд полунатурного моделирования для исследования динамических режимов системы управления энергетической установкой тепловоза с дизелем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К р у т о в В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
2. К р у т о в В. И., К у з н е ц о в А. Г., Ш а т р о в В. И. Анализ методов составления математической модели дизеля с газотурбинным наддувом // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 10–12. – С. 62–69.
3. К у л е ш о в А. С., Г р е х о в Л. В. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 64 с.

Статья поступила в редакцию 17.04.2008

Александр Гаврилович Кузнецов родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области моделирования и автоматического регулирования теплоэнергетических установок.

A.G. Kuznetsov (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of simulation and regulation of heat and power generating plants.

