

УДК 621.43

*М.В. Маливанов, д-р техн. наук., А.А. Плешанов, канд. техн. наук, Э.С. Темнов, асп.,
Р.Н. Хмелёв, канд. техн. наук*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДИЗЕЛЯ ТМЗ-450Д

Постановка проблемы. Двигатель-генераторные установки (ДГУ) находят широкое применение в различных отраслях в качестве мобильных, автономных источников питания электрической энергией. ДГУ являются техническими системами со сложно взаимодействующими элементами различной физической природы. Эта особенность вызывает существенные затруднения в процессе проектирования и отработки названных объектов. Устранить данную проблему можно в результате разработки методики проектировочных расчетов, базирующейся на математических моделях с достаточной степенью точности отражающих поведение элементов ДГУ в меняющихся условиях эксплуатации.

Анализ последних исследований. Известны работы, в которых предложены математические модели двигателей [1 – 3] и генераторов [4, 5]. Непосредственное объединение их в модель ДГУ затруднено в связи с использованием в моделях двигателей осредненных по циклу переменных, а в моделях генераторов – их мгновенных значений. Кроме того, объединяемые модели должны быть ориентированы на их совместное использование.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Особенностью предлагаемой математической модели по сравнению с существующими является комплексное описание ДГУ как совокупности взаимосвязанных тепломеханических, газодинамических, электромеханических и магнитных подсистем, отражающее её функционирование в переходных и установившихся режимах. Разработка математической модели ДГУ и исследование ее функционирования

позволит еще на стадии проектирования осуществить:

- выбор конструктивных параметров ДГУ, обеспечивающих требуемые характеристики устройства;
- анализ установившихся и переходных режимов функционирования системы "ДВС - генератор";

Основная часть. В данной работе в качестве объекта исследования была выбрана двигатель-генераторная установка на базе малоразмерного одноцилиндрового дизеля ТМЗ-450Д.

Система уравнений, описывающая функционирование двигателя во времени, разработана в рамках тепломеханики и записывается в следующем виде [6]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{W} [G_{\text{вн}} - G_{\text{вып}} - \rho \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2]; \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot \rho \cdot W} [G_{\text{вн}} (h_{\text{вн}} - e) - G_{\text{вып}} (h_{\text{вып}} - e) + \dot{Q}_z - \dot{Q}_m - p \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2]; \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a_4 [(p - p_0) f_n - F_{\text{мп}} - a_3 \cdot m_{\text{нр}} \cdot \omega^2] - M_c}{a_4 \cdot a_2 \cdot m_{\text{нр}} + J_{\text{нр}}}; \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega. \quad (4)$$

Замыкающим является термическое уравнение состояния:

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (5)$$

где t – время; ρ , T , p – плотность, температура и давление рабочего тела в цилиндре двигателя; W – текущий объем рабочего тела; f_n – площадь поршня; $G_{\text{вн}}$, $G_{\text{вып}}$ – секундный приход и расход рабочего тела; $h_{\text{вн}}$, $h_{\text{вып}}$ – удельная энтальпия втекающего и выте-

кающего газа; a_2, a_3, a_4 – коэффициенты, определяющие кинематические связи между твердыми звеньями; ω, φ – угловая скорость и угол поворота коленчатого вала; \dot{Q}_m – секундный приход (расход) энергии в форме теплоты в результате теплообмена; \dot{Q}_z – секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; p_0 – давление газа под поршнем; e – удельная внутренняя энергия газа; F_{mp} – сила трения; M_c – момент сопротивления; m_{np} – приведенная масса частей двигателя, совершающих возвратно-поступательное движение; J_{np} – приведенный момент инерции вращающихся частей двигателя.

Кроме основной системы уравнений (1) – (5), математическая ДВС включает дополнительные подсистемы уравнений, описывающие следующие процессы:

а) Газодинамические процессы во впускной и выпускной системах

Описание газодинамических процессов осуществлялось при помощи математической модели [7] одномерного нестационарного течения газа. В периоды газообмена по известным значениям давления и плотности рабочего тела в цилиндре определялись значения секундного прихода, расхода рабочего тела в каждый момент времени.

б) Трение в цилиндропоршневой группе

Описание процесса трения в цилиндропоршневой группе выполнено на основе зависимостей [8] М. Резека и Н. Хайнена, полученных в результате динамических исследований двигателей в реальном времени.

в) Теплообмен

Для описания процессов переноса теплоты (теплообмена конвекцией и излучением) в полости цилиндра двигателя использовались известные зависимости, приведенные в работе [9].

г) Тепловыделение

Секундный приход энергии в результате горения рабочей смеси определялся на основе методики, предложенной И.И. Вибе [10]:

$$\dot{Q}_z = \delta_z \cdot H_u \cdot m_x \cdot \omega_m$$

где H_u и m_x – низшая теплота сгорания и цикловая масса топлива; ω_m – скорость сгорания топлива; δ_z – коэффициент полноты сгорания.

Для вычисления скорости сгорания топлива использовалась зависимость, полученная на основе полуэмпирической формулы И.И. Вибе:

$$\chi = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1}},$$

$$\omega_m = \frac{d\chi}{dt} = \frac{6,908 \cdot (m+1) \cdot \omega}{\varphi_z} \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \right)^m \cdot e^{-6,908 \left(\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \right)^{m+1}}.$$

где χ – доля топлива, сгоревшего за угол φ от начала горения; φ_z – условная продолжительность сгорания; m – показатель характера сгорания; φ_1 – угол начала сгорания.

Параметры m и φ_z являются кинетическими константами, однозначно определяющими скорость данного процесса сгорания в ДВС, и зависят от конкретных физико-химических условий осуществления процесса сгорания в двигателе. Для двигателя ТМЗ-450Д на основе результатов сорока натуральных экспериментов были вычислены значения показателей сгорания для диапазона режимов $n = 2000 - 3600$ мин⁻¹, $M_c = 5 - 24$ Н·м и в результате выполненной статистической обработки данных получены регрессионные зависимости для определения показателей сгорания m и φ_z :

$$m = q_0 + q_1 M_c + q_2 n_{cp} + q_3 M_c^2 + q_4 n_{cp}^2 + q_5 M_c n_{cp} + q_6 M_c^3 + q_7 n_{cp}^3 + q_8 M_c^2 n_{cp} + q_9 M_c n_{cp}^2;$$

$$\varphi_z = q_0 + q_1 M_c + q_2 n_{cp} + q_3 M_c^2 + q_4 n_{cp}^2 + q_5 M_c n_{cp} + q_6 M_c^3 + q_7 n_{cp}^3 + q_8 M_c^2 n_{cp} + q_9 M_c n_{cp}^2;$$

где n_{cp} – средняя за цикл частота вращения коленчатого вала двигателя.

Коэффициенты регрессионных зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты регрессионных зависимостей

	q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉
m	-	-	0,3	0,1	0,0	-	0,0	-	0,	-
	0,049	0,075	08	38	13	0,139	94	0,188	100	0,092
φ_2	14	45	-	-	13	29,	-	38	-	5,
	0,0	,34	72,03	12,48	,67	26	6,007	,49	10,52	826

При рассмотрении переходных процессов, происходящих в ДГУ, существенным является учет динамического взаимодействия регулятора частоты вращения с ДВС.

Всережимный регулятор дизеля ТМЗ-450Д поддерживает близкой к постоянной любую частоту

вращения коленчатого вала дизеля, заданную положением рычага управления топливного насоса высокого давления, несмотря на изменение нагрузки на дизель. Математическая модель [6] регулятора строится в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1.

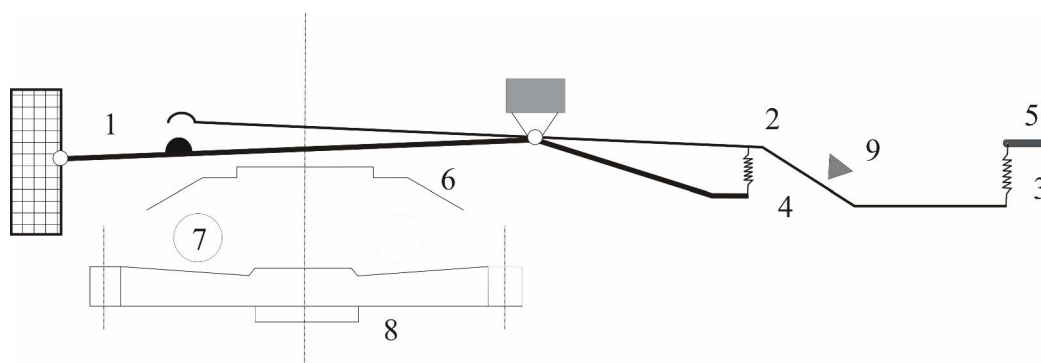


Рис.1 Общая схема регулятора частоты вращения:

1 – пусковой рычаг, 2 – главный рычаг, 3 – задающая пружина, 4 – пусковая пружина, 5 – задающий рычаг, 6 – диск регулятора, 7 – шарик, 8 – шестерня, 9 – упор

Уравнения движения рычага, дополняющие модель двигателя, записываются в следующем виде [6]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(F_{ц} \cdot \frac{\sin(\beta)\sin(\alpha)}{\sin(\beta+\alpha)} - F_{тр.д.} + \sigma \cdot R_T \sin(\varphi - \varphi_0)\omega^2) \cos(\varphi - \varphi_0) R_T - M_{п} - M_{тр.р.}}{J + R_T^2 \sigma \cdot \cos^2(\varphi - \varphi_0)} \quad (6)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega$$

В качестве примера на рис 2 и 3 приведены результаты, иллюстрирующие работу регулятора.

Генераторная часть рассматриваемой ДГУ представляет собой индукторный генератор, хорошо зарекомендовавший себя простотой и технологичностью конструкции, высокой надежностью, хорошими регулировочными свойствами, работоспособностью в сложных условиях окружающей среды.

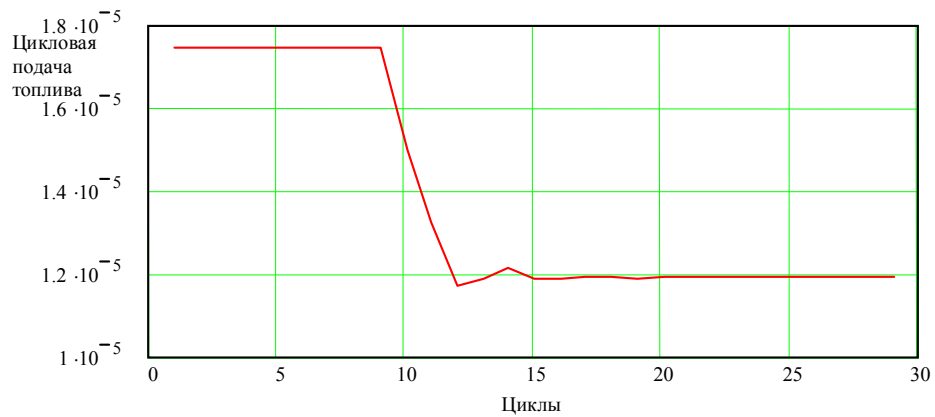


Рис. 2. Изменение цикловой подачи топлива при смене нагрузки

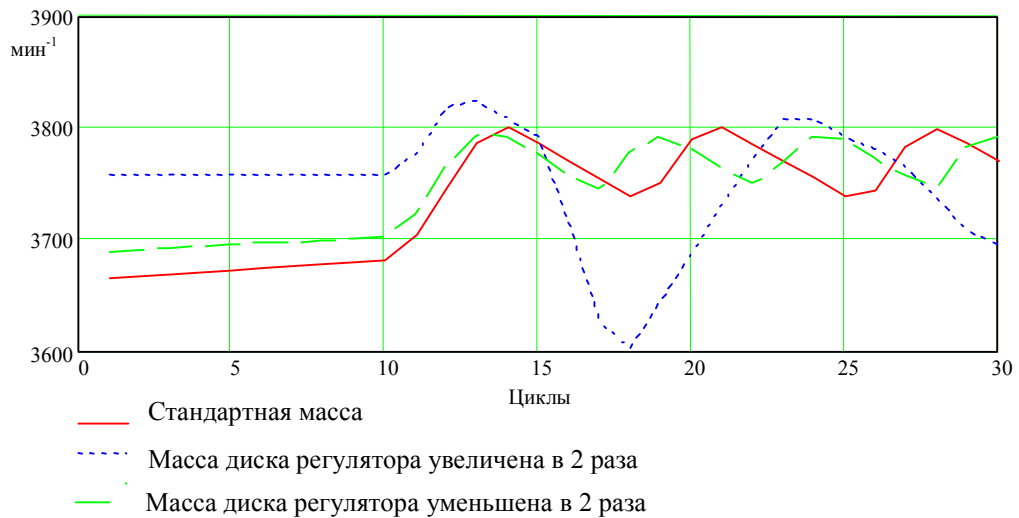


Рис. 3. Изменение частоты вращения коленчатого вала при сбросе нагрузки

Дифференциальные уравнения равновесия ЭДС однофазного синхронного генератора записываются в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} 0 &= (r_A + r_n) \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_\epsilon &= r_\epsilon i_\epsilon + \frac{d\psi_\epsilon}{dt}; \\ 0 &= r_{\delta d} i_{\delta d} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$0 = r_{\delta q} i_{\delta q} + \frac{d\psi_{\delta q}}{dt}.$$

Потокоцепления зависят от взаимного расположения обмоток:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= i_A(x_A + x_n) + i_\epsilon x_a \cos \gamma + i_{\delta d} x_a \cos \gamma + \\ &+ i_{\delta q} x_a \cos \gamma; \\ \Psi_\epsilon &= i_A x_a \cos \gamma + i_\epsilon x_\epsilon + i_{\delta d} x_a; \\ \Psi_{\delta d} &= i_A x_a \cos \gamma + i_\epsilon x_a + i_{\delta d} x_{\delta d}; \\ \Psi_{\delta d} &= i_A x_a \sin \gamma + i_{\delta q} x_{\delta q}. \end{aligned} \quad (8)$$

В уравнениях (7), (8) $r_A + r_n$, r_e , $r_{\partial d}$, $r_{\partial q}$, $x_A + x_n$, x_e , $x_{\partial d}$, $x_{\partial q}$ – активные и индуктивные сопротивления соответственно обмоток статора, возбуждения, демпферных обмоток по продольной и поперечной осям и нагрузки; x_a – индуктивное сопротивление взаимоиндукции при совпадении осей обмоток; U_e – напряжение обмотки возбуждения; $\gamma = \int_0^t \omega_r dt + \gamma_0$ – угол между осью обмотки статора и продольной осью ротора.

Момент сопротивления со стороны генератора определяется по формуле:

$$M_c = \frac{N_{эл}}{\eta \cdot \omega},$$

где $N_{эл}$ – электрическая мощность; η – КПД генератора.

Исключая из (7), (8) потокосцепления получаем систему уравнений электромагнитных переходных процессов рассматриваемого генератора.

$$\begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= -\frac{r_A + r_n}{x_A + x_n} \cdot i_A - \frac{x_a}{x_A + x_n} \cos \gamma \frac{di_e}{dt} + \\ &+ \frac{w \cdot x_a}{x_A + x_n} \sin \gamma \cdot i_e; \\ \frac{di_e}{dt} &= -\frac{r_e}{x_e} \cdot i_e + \frac{1}{x_e} U_e. \end{aligned} \quad (9)$$

С целью достижения требуемой точности работы в состав ДГУ вводится регулятор напряжения, обеспечивающий изменение напряжения на обмотке возбуждения в зависимости от напряжения на выходе генератора. Математическая модель такого регулятора может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} R_r &= R_r^{min}, \text{ если } U_e < (U_{zn} - \delta) \text{ или} \\ &\text{если } (U_{zn} - \delta) < U_e < (U_{zn} + \delta) \text{ и } \dot{U}_r > 0; \\ R_r &= R_r^{max}, \text{ если } U_e > (U_{zn} + \delta) \text{ или} \\ &\text{если } (U_{zn} - \delta) < U_e < (U_{zn} + \delta) \text{ и } \dot{U}_r < 0, \end{aligned}$$

где δ – допустимое отклонение напряжения; R_r^{min} и R_r^{max} – регулирующие сопротивления.

Окончательно модель генераторной части представляет собой систему уравнений (10), (11),

$$\begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= -\frac{r_A + r_n}{x_A + x_n} \cdot i_A - \frac{x_a}{x_A + x_n} \cos \gamma \frac{di_e}{dt} + \\ &+ \frac{w \cdot x_a}{x_A + x_n} \sin \gamma \cdot i_e; \\ \frac{di_e}{dt} &= -\frac{(R_r + r_e)}{x_e} \cdot i_e + \frac{1}{x_e} U_e, \end{aligned} \quad (11)$$

а модель ДГУ в целом отражена системой уравнений (1) – (6), (10), (11).

В качестве примера на рис. 4 приведен переходный процесс в ДГУ при изменении электрической нагрузки с 5,6 кВт до 3,51 кВт.

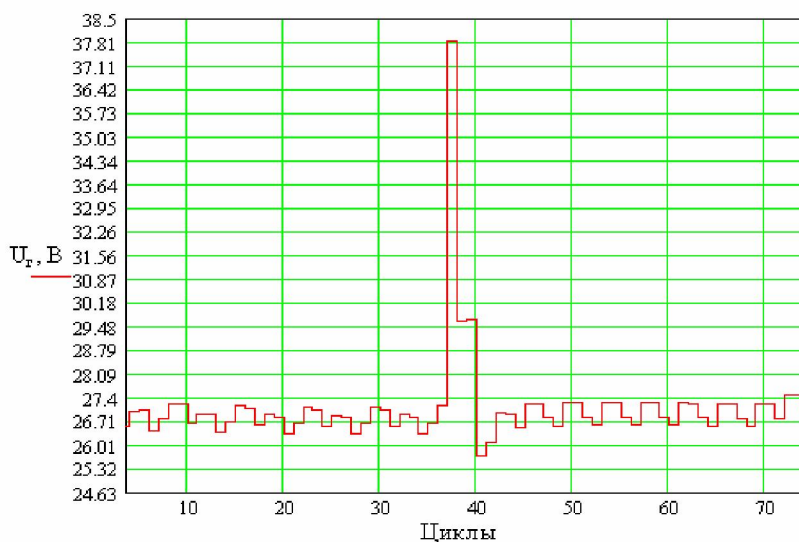


Рис. 4. Переходный процесс в ДГУ при изменении электрической нагрузки

Выводы. Таким образом, получена замкнутая система уравнений, полностью отражающая функционирование ДГУ во времени. Использование разработанного математического и программного обеспечения позволяет установить влияние конструктивных и эксплуатационных параметров ДГУ на его характеристики и сократить затраты при создании новых и совершенствовании существующих конструкций ДГУ.

Список литературы:

1. Жмудяк Л.М. Оптимизация рабочих процессов дизелей и перспективных двигателей на ЭВМ. – Барнаул: АлтГУ, 1992. – 98 с.
2. Петриченко Р.М. Элементы автоматического проектирования ДВС. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
3. Пунда А.С. Численное моделирование индикаторного процесса дизеля на ЭВМ: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. – Л.: ЛВИМУ, 1990. – 30 с.
4. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования. – М.: Высш. шк., 2001 – 512 с.: ил. 5.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
6. Воронин Д.О., Маливанов М.В., Плешанов А.А. Построение динамической модели системы “ДВС – регулятор числа оборотов” на примере дизельного двигателя ТМЗ-450Д // Изв. ТулГУ. Сер. “Автомобильный транспорт”. Вып. 4 – Тула: ТулГУ, 2000. – С. 67 - 74.
7. Хмелёв Р.Н. Исследование влияния газодинамических процессов на функционирование ДВС. Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Тула: ТулГУ, 2002.
8. Поздеев Г.В., Воронин Д.О. Определение и моделирование трения в цилиндропоршневой группе // Изв. ТулГУ. Сер. “Автомобильный транспорт”. Вып. 2 – Тула: ТулГУ, 1997. – С. 161-166.
9. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова – М.: Машиностроение, 1983 – 372 с., ил.
10. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. – М.: Машигиз, 1962–271с.