

*А.Н. БОРИСЕНКО*, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*С.А. ЛИТВИНЕНКО*, ст. преп. НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*Е.В. ХАЛАНСКАЯ*, стажер-препод. НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*А.В. ГУСЕЛЬНИКОВ*, студент НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ЕЕ ДЕВИАЦИИ, ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗ ТОПЛИВОПОДАЧИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ**

Построена математическая модель дизель-генератора как объекта регулирования скорости с тремя управлениями: цикловая подача и фаза впрыска топлива и дополнительное воздушоснабжение, а также с учетом случайного характера изменения угловой скорости. Модель представлена в виде линеаризованной системы уравнений второго порядка, коэффициенты которой, область допустимых значений и ограничения взяты из экспериментальных данных. При построении модели учитывались зависимости индикаторного момента и момента механических потерь от технического состояния дизель-генератора. Ил.: 1. Библиогр.: 9 навз.

**Ключевые слова:** математическая модель дизель-генератора, угловая скорость, фаза топливоподачи, дополнительное воздушоснабжение.

**Постановка проблемы.** Дальнейшее повышение технико-экономических и экологических показателей дизель-генераторов (ДГ) связано, с необходимостью учета некоторых факторов, которые ранее считались второстепенными, и поэтому не учитывались. Для повышения указанных показателей необходимо, во-первых, поддерживать ДГ в должном техническом состоянии и, во-вторых, управлять ДГ по наилучшим, в определенном смысле, законам. Следовательно, возникает задача управления ДГ с учетом его технического состояния, которая не может быть решена без синтеза соответствующей математической модели объекта.

**Анализ литературы.** В работе [1] рассмотрена линейная математическая модель двигателя внутреннего сгорания как объекта регулирования скорости с управляющим воздействием по цикловой подаче топлива. При этом предполагается весьма незначительное отклонение режимных параметров двигателя при резком изменении нагрузки от значений в установившемся режиме. В работе [2] рассматривается линейная стационарная модель дизеля как объекта регулирования скорости с учетом особенностей его работы по винтовой характеристике при нескольких фиксированных скоростных режимах и резких изменениях момента нагрузки на валу. В работе [3] рассмотрена математическая модель бензинового автомобильного двигателя внутреннего сгорания как объекта регулирования скорости с цифровым управлением топливоподачей, учитывающим содержание окиси углерода и

азота в отработавших газах. В [4] приведена модель ДВС с усовершенствованной системой воздухообеспечения, предназначенной, в основном, для увеличения воздушного заряда при плавном нарастании момента нагрузки на режимах скоростной характеристики. Отметим, что рассмотренные в работах [1 – 4] математические модели предназначены для решения конкретных задач управления ограниченным классом двигателей внутреннего сгорания, не учитывают случайного характера управляющих и возмущающих воздействий и неприменимы для решения задач диагностики.

В работе [5] рассмотрен ряд моделей дизеля как объекта диагностики по параметрам топливоподачи, воздухообеспечения, вибраций основных узлов в процессе его работы, по составу смазочных веществ и т.д., однако для решения задач управления такие модели не пригодны. В работе [6], в отличие от ранее рассмотренной, при составлении модели ДВС как объекта диагностики учитывается случайный характер некоторых процессов, однако для решения задач управления предложенная модель непригодна.

**Цель статьи** – построение математической модели дизель-генератора для решения задач управления и диагностирования.

Известно [7], что систему уравнений движения дизеля с газотурбинным наддувом можно представить следующим образом

$$\begin{aligned} J_k \frac{d\omega_k}{dt} &= M_T - M_k; \\ J \frac{d(\omega + \xi(t))}{dt} &= M_i - M_{\Pi} - M_H, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $J_k$  – момент инерции вращающихся частей турбокомпрессора;  $\omega_k$  – угловая скорость ротора турбокомпрессора;  $M_T = M_T(\omega, \omega_k, B_q)$  – крутящий момент турбины;  $\omega$  – угловая скорость вала дизеля;  $B_q$  – часовой расход топлива двигателя;  $M_k = M_k(Q, \omega_k)$  – момент сопротивления компрессора;  $Q$  – расход воздуха через компрессор;  $J$  – момент инерции вращающихся частей дизеля;  $\xi$  – девиация угловой скорости коленчатого вала;  $M_i, M_{\Pi}$  – соответственно индикаторный момент и момент потерь двигателя;  $M_H$  – момент нагрузки на валу дизеля.

Авторами впервые учитывается зависимость  $M_i$  и  $M_{\Pi}$  не только от традиционно фигурирующих аргументов  $[\omega, \omega_k, B_q]$ , но и от других факторов. В частности при определении  $M_i$  учитывается время  $t$  и первый коэффициент технического состояния  $K_{1TC}$ , а при определении  $M_{\Pi}$  – второй коэффициент  $K_{2TC}$  технического состояния дизельной установки. Следовательно,

$$M_i = M_i(B_{\text{ч}}, \eta_i, \omega, t, K_{\text{ITC}}); \quad (2)$$

$$M_{\text{П}} = M_{\text{П}}(\omega, K_{2\text{TC}}). \quad (3)$$

При этом  $K_{\text{ITC}}$  зависит от качества работы топливной системы и газовоздушного тракта, компрессии в цилиндрах. Второй же коэффициент  $K_{2\text{TC}}$  определяется потерями на насосные хода, вентиляционными потерями, потерями на трение в подшипниках и ЦПГ. Указанные факторы влияют на цилиндровые мощности и равномерность их распределения, что, в конечном счете, отражается на девиации угловой скорости вала. Следовательно,

$$\xi = \xi(t, K_{\text{ITC}}, K_{2\text{TC}}).$$

Поскольку индикаторный момент  $M_i$  зависит от индикаторного к.п.д., а  $\eta_i$  зависит от фазы  $\theta$  топливоподачи, то систему уравнений (1) можно представить следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{d(\omega + \xi)}{dt} &= f_1(\omega, \omega_k, h_p, \theta, Q_{\text{Д}}, M_i); \\ \frac{d\omega_k}{dt} &= f_2(\omega, \omega_k, h_p, Q_{\text{Д}}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $h_p$  – выход рейки топливного насоса (топливодозирующего органа) дизеля;  $Q_{\text{Д}}$  – расход дополнительного воздуха через компрессор (этот воздух подается из баллонов).

В рамках решаемой задачи величины  $h_p, \theta, Q_{\text{Д}}$  являются управляющими воздействиями (управлениями) дизеля, а  $\omega$  и  $\omega_k$  – выходными координатами объекта. Отметим, что при оснащении дизеля электронной системой топливоподачи взамен гидромеханической вместо величины  $h_p$  может фигурировать другой параметр, связанный с цикловой подачей топлива.

Систему уравнений (4) необходимо преобразовать таким образом, чтобы в одной части уравнения были управления, а в другой – выходные координаты. Индикаторный момент двигателя можно представить в виде:

$$M_i = K_1 \frac{B_{\text{ч}}}{\omega} \eta_i, \quad (5)$$

где  $K_1$  – коэффициент пропорциональности.

С учетом выводов работы [8]

$$\eta_i = \eta_i(\alpha_y, \omega, \theta), \quad (6)$$

где  $\alpha_y$  – коэффициент избытка воздуха.

Согласно работе [7] коэффициент избытка воздуха и часовой расход топлива можно выразить в виде

$$\alpha_y = K_2 \frac{Q}{B_{\text{ч}}};$$
$$B_{\text{ч}} = B_{\text{ч}}(h_{\text{p}}, \omega) \quad (7)$$

или

$$\frac{B_{\text{ч}}}{\omega} = B'(h_{\text{p}}), \quad (8)$$

где  $K_2$  – коэффициент пропорциональности;  $B'$  – расход топлива на единицу частоты вращения.

Далее для плотности  $\gamma$  воздуха и его расхода в соответствии с [7] запишем

$$\gamma = \gamma(\omega_k);$$
$$Q = Q(\omega, \gamma),$$

в связи с чем  $Q = Q(\omega, \omega_k)$ .

Зависимость индикаторного к.п.д. (6), с учетом выражений (7), (8) и наличия  $Q_{\text{д}}$ , а также

$$\alpha_y = \alpha_y(\omega, \omega_k, h_{\text{p}}, Q_{\text{д}}), \quad (9)$$

запишем следующим образом

$$\eta_i = \eta_i(\omega, \omega_k, h_{\text{p}}, \theta, Q_{\text{д}}). \quad (10)$$

Тогда из (5), (8), (10) получим

$$M_i = M_i(\omega, \omega_k, h_{\text{p}}, \theta, Q_{\text{д}}). \quad (11)$$

Момент потерь можно считать зависящим только от угловой скорости вала [7, 9], то есть

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п}}(\omega). \quad (12)$$

Тогда из (1), (11) и (12) получим

$$\frac{d\omega}{dt} = f_1(\omega, \omega_k, h_{\text{p}}, \theta, Q_{\text{д}}, M_{\text{н}}) = b_1 + b_2 h_{\text{p}} + b_3 Q_{\text{д}} + b_4 h_{\text{p}} Q_{\text{д}} + b_5 h_{\text{p}}^2 +$$

$$+ b_6 Q_{\text{Д}} h_{\text{P}}^2 + \beta_1 \theta + \beta_2 h_{\text{P}} \theta + \beta_3 Q_{\text{Д}} \theta + \beta_4 \theta^2 + \beta_5 Q_{\text{Д}} \theta^2 + \beta_6 h_{\text{P}} \theta^2, \quad (13)$$

где  $b_i = b(\omega, \omega_k, M_{\text{H}}, h_{\text{P}}, \theta, Q_{\text{Д}})$ ;  $\beta_i = \beta_i(\omega, \omega_k, M_{\text{H}}, h_{\text{P}}, \theta, Q_{\text{Д}})$ ;  $i = \overline{1, 6}$ ;  $M_{\text{H}} = \text{const}$ ;  $h_{\text{P}} = h_{\text{P}}(t)$ ;  $Q_{\text{Д}} = Q_{\text{Д}}(t)$ .

Перейдем ко второму уравнению системы (2). Воспользуемся зависимостью температуры газов перед турбиной  $T_{\text{T}}$  от  $\alpha$ . Согласно [7] и с учетом (9) имеем

$$T_{\text{T}} = T_{\text{T}}(\omega, \omega_k, h_{\text{P}}, Q_{\text{Д}}). \quad (14)$$

Кроме того, из [7]

$$M_{\text{T}} = M_{\text{T}}(A), \quad (15)$$

где

$$A = A(Q_{\text{Д}}, T_{\text{T}}). \quad (16)$$

Из (14), (15), (16) получим следующее соотношение:

$$M_{\text{T}} = M_{\text{T}}(\omega, \omega_k, h_{\text{P}}, Q_{\text{Д}}). \quad (17)$$

Момент на валу компрессора определяется выражением [7, 9]

$$M_k = M_k(\omega, \omega_k). \quad (18)$$

В конечном счете, из (17) и (18) находим:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = f_2(\omega, \omega_k, h_{\text{P}}, Q_{\text{Д}}) = b_7 + b_8 Q_{\text{Д}} + b_9 Q_{\text{Д}} h_{\text{P}} + b_{10} Q_{\text{Д}}^2 + b_{11} Q_{\text{Д}}^2 h_{\text{P}} + b_{12} h_{\text{P}}. \quad (19)$$

Таким образом, получена математическая модель стационарного ДГ, состоящая из уравнений (13) и (19).

Этой модели соответствует рис., на котором показаны следующие блоки: БУФ – блок формирования уставок; БВК – блок возведения в квадрат; БП –

блок перемножения; БС – блок суммирования. Эти блоки необходимы для выполнения соответствующих операций в выражениях (13) и (19).

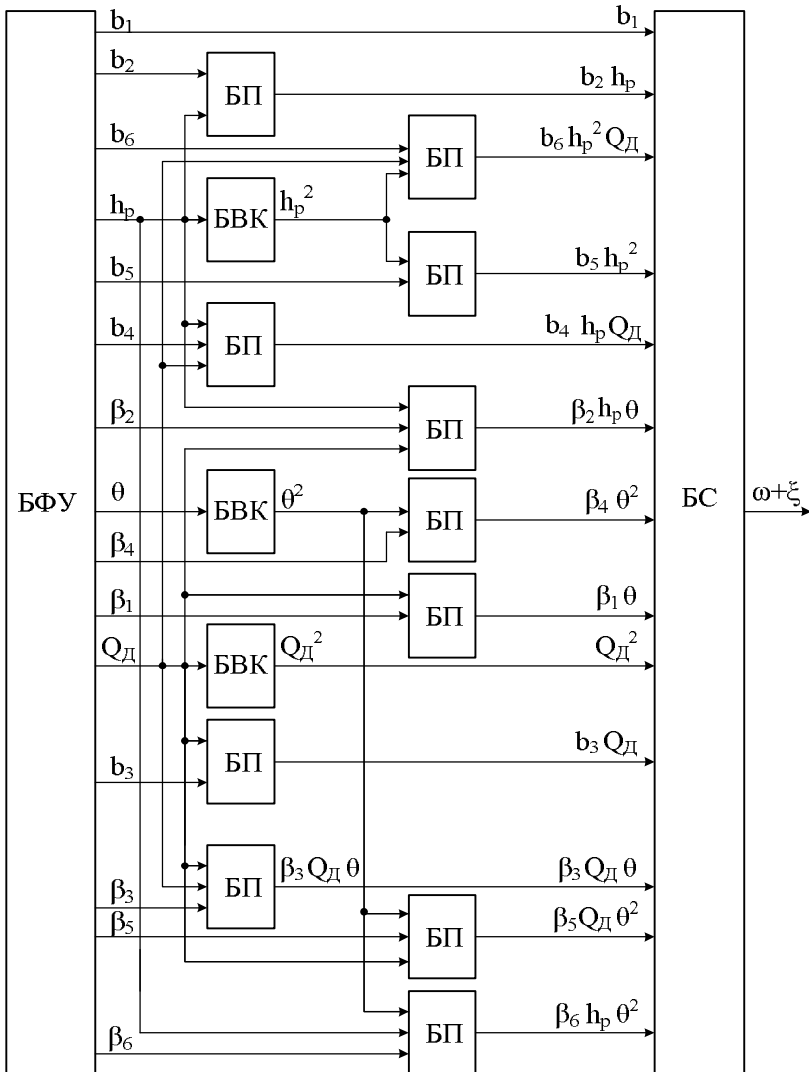


Рис. Блок-схема для моделирования дизеля

При начальных условиях;  $\omega_{(0)} = \omega_i$ ;  $\omega_{k(0)} = \omega_{ki}$ , блок-схема на рис. может быть использована для имитационного моделирования системы регулирования ДГ.

Область допустимых управлений и ограничения  $t_0 \leq t \leq t_k$ ;  $0 < h_p \leq h_{p_{\max}}$ ;  $0 < Q \leq Q_{D_{\max}}$ ;  $0 < \theta \leq \theta_{\max}$ .

Для математического описания объекта надо задать закон его движения и область управлений  $U$ . Допустимым управлением является кусочно-непрерывная функция  $U(t)$ ,  $t_0 \leq t \leq t_k$  со значениями в области управлений  $U$ , без скачков на концах отрезка  $t_0 \leq t \leq t_k$ , где она задана. Область управлений в случае стационарного дизеля представляет собой параллелепипед со сторонами  $a_1$  (на оси  $Q_D$ ),  $a_2$  (на оси  $h_p$ ) и  $a_3$  (на оси  $\theta$ ).

**Выводы.** Построена математическая модель ДГ, пригодная для решения задач управления и диагностики, поскольку в ней, кроме трех управляющих воздействий, используется девиация угловой скорости вала и коэффициенты, учитывающие техническое состояние агрегата.

**Список литературы:** 1. *Марченко А.П.* Двигуни внутрішнього згорання / *А.П. Марченко*. – Харків: Прапор, 2004. – Т. 1. – 364 с. 2. *До Дык Лью.* Построение моделей для управления оптимальным режимом работы судового комплекса / *До Дык Лью, Май Ван Чинь* / Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 39 – 40. 3. *Котиков Ю.Г.* Цифровые системы автоматического управления силовыми установками автомобилей с дизельными двигателями (обзор) / *Ю.Г. Котиков, А.Э. Горев, Н.М. Блякинштейн* / Двигателестроение. – 1985. – № 4. – С. 29–31. 4. *Агафонов А.Н.* Экспериментальные исследования работы ДВС с усовершенствованной системой воздухооборудования / *А.Н. Агафонов, И.В. Слесаренко, В.Н. Груздь* / Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С. 11–16. 5. *Станиславский Л.В.* Техническое диагностирование дизелей / *Л.В. Станиславский*. – К.: Вища школа, 1983. – 135 с. 6. Представление процессов в ДВС для решения диагностических задач / *В.Ф. Голов.* Институт инж. ж.-д. транспорта. – Куйбышев, 1985. – 19 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 15.06.85, № 3302. 7. *Дмитриенко В.Д.* Синтез оптимальных регуляторов для повышения технико-экономических показателей турбопоршневых двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.05 / *В.Д. Дмитриенко*. – Харьков, 1975. – 24 с. 8. *Борисенко А.Н.* Модели процессов в информационно-измерительных системах для управления и диагностики дизелей / *А.Н. Борисенко* / Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2004. – № 17. – С. 7–12. 9. *Погребняк В.В.* Разработка и исследование устройств для дополнительного разгона агрегатов наддува в переходном процессе тепловозных дизелей и автоматизированных дизель-генераторов: дис. канд. техн. наук: 05.04.02 / *В.В. Погребняк*. – Харьков, 1971. – 241 с.

*Статья представлена д.т.н. проф. НТУ "ХПИ" Рогачевым А.И.*

УДК 621.436.1.57

**Математичне моделювання дизель-генератора як об'єкту регулювання швидкості з урахуванням випадкового характеру її девіації, вимірювання фаз паливоподачі і додаткового повітряпостачання / Борисенко А.М., Литвиненко С.А., Халаська О.В., Гусельников О.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 21. – С. 4 – 11.**

Побудована математична модель дизель-генератора як об'єкту регулювання швидкості з трьома управліннями: циклової подачі і фазі уприскування палива і додатковому

повітряпостачанню, а також обліком випадкового характеру зміни зазначеної швидкості. Модель представлена у вигляді лінеаризованої системи рівнянь другого порядку, коефіцієнти якої, область допустимих значень і обмеження узяті з експериментальних даних. При побудові моделі враховувалися залежності індикаторного моменту і моменту механічних втрат від технічного стану дизель-генератора. Лл.1. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** математична модель дизель-генератора, кутова швидкість, фаза паливоподачі, додаткове повітряпостачання.

UDC 621.436.1.57

**Mathematical design of diesel-generator as an object of adjusting of speed taking into account casual character of its deviation, measuring of phases of serves of fuel and additional providion with air/ Borisenko A.N., Litvinenko S.A., Khalanskaya E.V., Gusel'nikov A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010. – № 21. – P. 4 – 11.**

The mathematical model of diesel-generator is built as an object of adjusting of speed with a management to on to three to the co-ordinates: to the sequencing serve and phase of injection of fuel and additional providing with air, and also by the account of casual character of change the mentioned speed. A model is presented as the linearized system of equalizations the second order, coefficients of which, region of acceptability and limitation taken from experimental information. At the construction of model dependences of indicator moment and moment of mechanical losses were taken into account on the technical state of diesel-generator. Figs. 1. Refs.: 9 .

**Keywords:** mathematical model of diesel-generator, angulator, phase of serves of fuel, additional providing with air.

*Поступила в редакцію 10.04.2010*