

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436



МАРКОВ
Владимир Анатольевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

MARKOV
Vladimir Anatol'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ФУРМАН
Виктор Владимирович
(ООО «ППП
Дизельавтоматика»)

FURMAN
Viktor Vladimirovich
(Saratov, Russian Federation,
«Dizelavtomatika»)



ИВАНОВ
Виктор Алексеевич
(ООО «ППП
Дизельавтоматика»)

IVANOV
Viktor Alekseevich
(Saratov, Russian Federation,
«Dizelavtomatika»)

Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля

В.А. Марков, В.В. Фурман, В.А. Иванов

Система автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя — одна из основных систем тепловозного дизеля. Используемые в отечественных дизелях механические и гидромеханические регуляторы частоты вращения не всегда позволяют обеспечить необходимое качество процесса регулирования. Поэтому все большее применение находят электронные системы автоматического регулирования частоты вращения. В статье описана электронная система автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля, разработанная в ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) для дизеля типа 12 ЧН 26/26. Основными элементами этой системы являются датчики режимных параметров, электронный блок управления и электрогидравлический исполнительный механизм, воздействующий на дозирующую рейку топливного насоса высокого давления. Представлены математические модели основных элементов системы автоматического регулирования. Приведены расчетные исследования системы регулирования, получены ее частотные характеристики. Показано, что увеличение коэффициента усиления пропорциональной составляющей ПИД-закона регулирования позволяет улучшить показатели качества процесса регулирования — уменьшить заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки и увеличить запас устойчивости системы регулирования. Результаты расчетных исследований использованы при совершенствовании и доводке разработанной системы автоматического регулирования.

Ключевые слова: дизельный двигатель, система регулирования частоты вращения вала двигателя, переходный процесс, частотные характеристики, ПИД-закон регулирования.

The study of the automatic speed control of locomotive diesel

V.A. Markov, V.V. Furman, V.A. Ivanov

The engine speed automatic control system is one of the main systems of a diesel locomotive. The mechanical and hydro-mechanical speed regulators used in domestic diesel engines do not always provide the required quality of control.

Therefore, the automatic electronic speed control systems are finding increasing application. The paper describes an electronic system for automatic speed control of a locomotive diesel engine developed by the Design and Production Enterprise LLC «Dizelavtomatika» (Saratov) for a 12 CHN 26/26 diesel. The main elements of this system are the sensors for detecting operating conditions, the electronic control package and the electro-hydraulic actuator acting on the metering rail of a high-pressure fuel pump. Mathematical models of the basic elements of the automatic control system are formulated. The numerical analysis of the control system is carried out and the frequency response is calculated. It is shown that an increase in gain of the proportional component of the PID control law can improve the quality of the process and, therefore, to reduce the overspeed following the load relief and to increase the stability margin of the control system. The results of computational studies were used to improve and refine the automatic control system being developed.

Keywords: diesel engine, engine speed control system, transient process, frequency characteristics, PID control law.

Для дизельных двигателей транспортного назначения, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, эффективным средством совершенствования их показателей является применение микропроцессорных систем автоматического регулирования и управления (САР и САУ) [1, 2]. При этом в современных дизелях широкое распространение получили, в первую очередь, САР и САУ топливоподачи. Следует отметить, что системы топливоподачи дизелей весьма разнообразны. Основным признаком их классификации является способ создания высокого давления впрыска и наличие или отсутствие трубопроводов высокого давления [3, 4]. По этому признаку классификации можно выделить аппаратуру разделенного типа, в которой топливный насос высокого давления (ТНВД) и форсунки соединены нагнетательными трубопроводами. Топливные системы неразделенного типа содержат насос-форсунки, в которых ТНВД и форсунка объединены в одном узле. В аккумуляторных системах топливоподачи высокое давление топлива создается в аккумуляторе, откуда оно через короткие топливопроводы подается к форсункам. Особенности управления процессом топливоподачи в пере-

численных системах можно рассмотреть по схемам электронных систем управления топливоподачи транспортных дизелей с топливной аппаратурой различных типов, представленным на рис. 1 [1, 3].

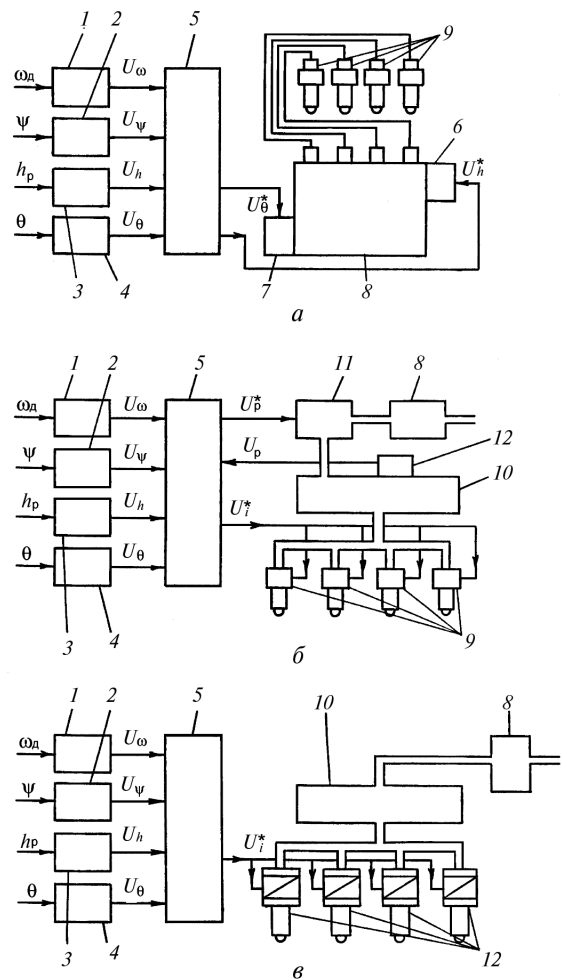


Рис. 1. Типы электронных САР и САУ топливоподачи транспортных дизелей с топливной аппаратурой разделенного типа (а), с аккумуляторными системами топливоподачи (б) и с аппаратурой неразделенного типа (в)

В системах топливоподачи разделенного типа для создания высокого давления впрыскивания обычно используются топливные насосы золотникового типа с механическим приводом плунжеров, соединенные протяженными топливопроводами с форсунками. Дозирование топлива и управление топливоподачи как правило происходит непосредственно в насосной секции ТНВД. Такое управление осуществляется механическими, гидромеханическими и электронными регуляторами, воздей-

ствующими на дозирующую рейку ТНВД. Используются и регуляторы угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ). При электронном управлении процессом топливоподачи информация о двигателе от датчика 1 (рис. 1, а) частоты вращения коленчатого вала, датчика 2 положения рычага управления, датчика 3 положения дозирующей рейки, датчика 4 УОВТ и ряда дополнительных датчиков поступает в электронный блок 5 регулятора. На основании поступающих сигналов с использованием заложенных в запоминающем устройстве микропроцессора требуемых законов управления в блоке 5 определяются требуемые значения цикловой подачи топлива (ЦПТ) и УОВТ. Эти значения сравниваются с действительными значениями, получаемыми от датчиков 3 и 4. При наличии рассогласования блок 5 формирует управляющие сигналы U_h^* и U_0^* на исполнительные устройства 6 и 7, воздействующие на дозирующую рейку и орган управления УОВТ соответственно. Такая схема САР позволяет сохранить без изменений конструкцию ТНВД 8 и форсунок 9.

В аккумуляторных системах топливоподачи ТНВД поддерживает высокое давление в аккумуляторе, а функции дозирования и управления УОВТ возложены на форсунку. Поскольку отпадает необходимость дозирования топлива в ТНВД, могут быть использованы более простые топливные насосы. В аккумуляторных топливных системах применяются электронные САР и САУ. Управляющий сигнал U_i^* (рис. 1, б), подаваемый на электрогидроуправляемые форсунки 9, формируется электронным блоком 5 с учетом сигналов от датчиков 1–4 режимных параметров. Кроме того, блок 5 формирует управляющее воздействие U_p^* для исполнительного устройства 11 регулятора давления топлива после ТНВД 8 с использованием сигнала U_p от датчика 12 давления топлива в аккумуляторе 10. Такая схема САУ обеспечивает независимость параметров топливоподачи от скоростного и нагрузочного режимов и возможность формирования практически любого требуемого закона подачи топлива, в том числе двухразового впрыскивания.

Широкое распространение получили системы неразделенного типа с насос-форсунками, объединяющими в одном узле ТНВД и форсунки. При этом функция получения высоких давлений впрыскивания возлагается непосредственно на насос-форсунки. Для этого используются нагнетательные плунжеры, приводимые от кулачкового вала или топливом с повышенным давлением от топливного насоса или аккумулятора. Нагнетательные плунжеры чаще выполняются ступенчатыми (дифференциальными), что повышает давление впрыскивания по сравнению с давлением в ТНВД (или аккумуляторе). Поэтому давление топлива после ТНВД 8 (рис. 1, в) и в аккумуляторе 10 значительно ниже, чем в аккумуляторных системах. Впрыскивание осуществляется электроуправляемыми насос-форсунками 12 при поступлении управляющего сигнала U_i^* от электронного блока 5. При этом функции дозирования и фазирования топливоподачи также возложены на насос-форсунки. Отсутствие нагнетательных топливопроводов в системах неразделенного типа позволяет получать высокие давления впрыскивания.

Применение микропроцессорных САР является эффективным средством снижения эксплуатационного расхода топлива и выбросов с отработавшими газами токсичных веществ в дизелях различного назначения [5–7]. Используются они и в дизельных двигателях маневровых тепловозов, эксплуатирующихся в различных скоростных и нагрузочных режимах [8–10]. Система первого типа (см. рис. 1, а) с электронным регулятором частоты вращения, воздействующим на дозирующую рейку ТНВД, разработана производственно-промышленным предприятием ООО «ППП «Дизельавтоматика» (г. Саратов). Эта электронная система автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения коленчатого вала дизеля типа 12 ЧН 26/26 состоит из следующих звеньев регулирования: дизеля с ТНВД; модулятора дизеля (диск с зубьями, вращающийся с числом оборотов n); датчика частоты вращения (ДЧВ); электронного регулятора частоты вращения (ЭРЧВ), содержащего блок управления и электрогидравлическое исполнительное устройство (ИУ); рычажной передачи от ИУ к ТНВД.

Структурная схема САРЧ дизеля 12 ЧН 26/26 представлена на рис. 2.

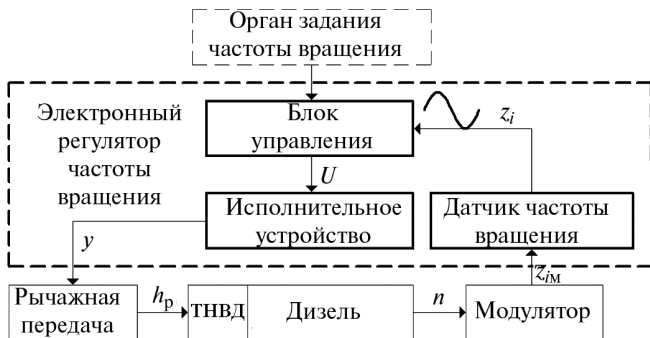


Рис. 2. Структурная схема САРЧ дизеля 12 ЧН 26/26:

n — частота вращения дизеля; U — напряжение питания, подводимое от блока управления к ИУ; y — перемещение выходного органа (ход сервомотора) ИУ; h_p — ход рейки ТНВД; $z_{иМ}$ — число зубьев модулятора, проходящих за секунду мимо ДЧВ при вращении вала дизеля; z_i — число периодов синусоидальных сигналов, поступающих от ДЧВ за 1 с

В качестве ИУ применено серийно-выпускаемое электрогидравлическое ИУ типа ЭГУ102, принципиальная схема которого приведена на рис. 3. Это устройство включает два основных элемента — управляющий золотник и сервомотор. Основные геометрические характеристики золотника управления представлены на рис. 4.

При создании и совершенствовании этой системы регулирования проведены расчетные исследования ее динамических свойств. Целью этих исследований являлось определение устойчивости САРЧ дизеля 12 ЧН 26/26 при его оснащении ЭРЧВ и оценка показателей качества процесса регулирования (в частности, заброса частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки). При этом проведены следующие исследования:

- рассчитаны амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики ЭРЧВ;
- определена собственная частота колебаний частоты вращения САРЧ;
- определен суммарный фазовый сдвиг и ориентировочный заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки.

При проведении этих исследований использованы следующие математические модели. В общем случае уравнение звена системы регули-

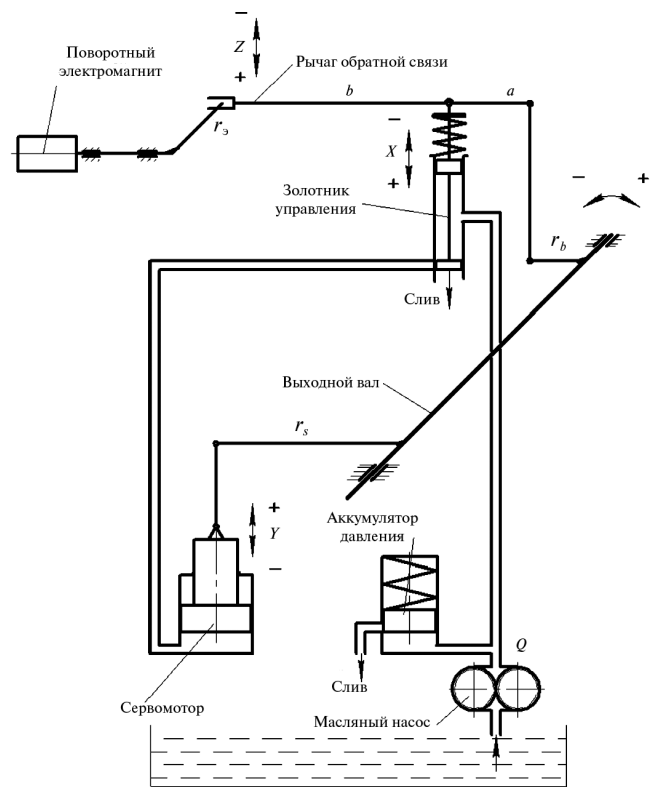


Рис. 3. Принципиальная схема ИУ:

X — перемещение золотника управления;
 Y — перемещение штока сервомотора;
 Z — перемещение плеча рычага обратной связи;
 Q — производительность масляного насоса;
 $r_b=10$ мм — длина рычага силового вала; $r_s=45$ мм — длина рычага силового вала; $a=15$ мм — длина плеча рычага обратной связи; $b=25$ мм — длина плеча рычага обратной связи

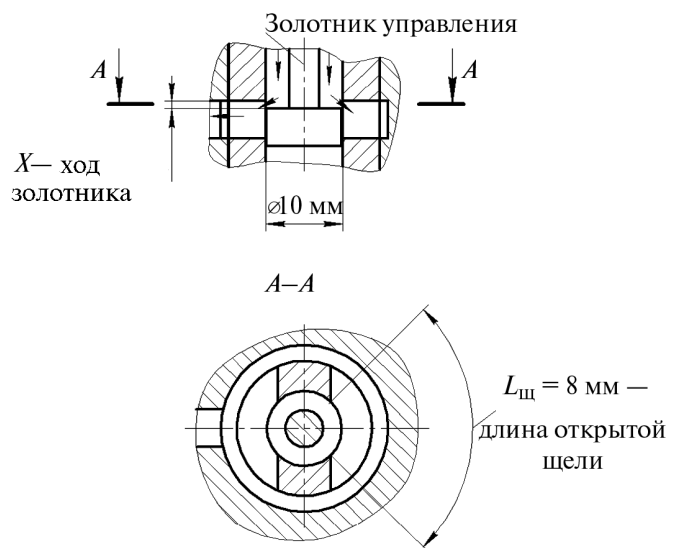


Рис. 4. Основные геометрические характеристики золотника управления

рования описывалось линейным дифференциальным уравнением n -го порядка по формуле [3]

$$A_n \frac{d^n y}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + A_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + A_1 \frac{dy}{dt} + A_0 y = B_m \frac{d^m w}{dt^m} + B_{m-1} \frac{d^{m-1} w}{dt^{m-1}} + \dots + B_2 \frac{d^2 w}{dt^2} + B_1 \frac{dw}{dt} + B_0 w, \quad (1)$$

где y, w — выходной и входного сигналы звена; $A_n, \dots, A_0, B_m, \dots, B_0$ — константы уравнения. Обозначив операцию дифференцирования d/dt символом p , дифференциальное уравнение (1) можно записать в операторной форме:

$$(A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0) y = (B_m p^m + B_{m-1} p^{m-1} + \dots + B_1 p + B_0) w.$$

Здесь p — комплексная переменная преобразования Лапласа. Тогда передаточная функция звена САРЧ принимает следующий вид:

$$W(p) = \frac{B_m p^m + B_{m-1} p^{m-1} + \dots + B_1 p + B_0}{A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0}.$$

Частотные характеристики рассматриваемого звена САРЧ определяют путем подстановки условия $p = i\omega$ (где $i = \sqrt{-1}$, ω — частота колебаний входного сигнала) в выражение для передаточной функции $W(p)$. Тогда амплитудно-фазовая частотная характеристика этого звена имеет вид

$$W(i\omega) = (B_m \omega^m + iB_{m-1} \omega^{m-1} - B_{m-2} \omega^{m-2} - iB_{m-3} \omega^{m-3} + \dots + iB_1 \omega + B_0) / (A_n \omega^n + iA_{n-1} \omega^{n-1} - A_{n-2} \omega^{n-2} - iA_{n-3} \omega^{n-3} + \dots + iA_1 \omega + A_0). \quad (2)$$

При этом слагаемое входного сигнала $s w$ (слагаемое $B_0 w$) в уравнении (1) соответствует слагаемому B_0 с ω^0 (или $\omega^0=1$) многочлена $B(\omega)$ уравнения (2). Аналогично слагаемому $s dw/dt$ соответствует слагаемое с ω^1 (или просто ω), слагаемому $s^2 w/dt^2 - \omega^2$; слагаемому $s^{n-1} w/dt^{n-1} - \omega^{n-1}$, слагаемому $s^n w/dt^n - \omega^n$.

При проведении частотного анализа САРЧ введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} aw &= B_0 - B_2 \omega^2 + B_4 \omega^4 - \dots; \\ bw &= B_1 \omega - B_3 \omega^3 + B_5 \omega^5 - \dots; \\ cw &= A_0 - A_2 \omega^2 + A_4 \omega^4 - \dots; \\ dw &= A_1 \omega - A_3 \omega^3 + A_5 \omega^5 - \dots, \end{aligned}$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний входного сигнала регулятора, s^{-1} ; f — частота колебаний входного сигнала регулятора, Гц.

Коэффициент усиления звена системы регулирования k_p вычисляют по формуле

$$k_p = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}}.$$

Фазовый сдвиг звена системы регулирования γ_p , град, определяют из соотношения

$$\gamma_p = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw}.$$

Рассмотрим эти характеристики для указанных выше звеньев САРЧ.

Дизель 12 ЧН 26/26. Скорость изменения частоты вращения, $\text{мин}^{-1}/\text{с}$, вала дизеля рассчитывалась из соотношения

$$\frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi} \frac{M_N h_p}{h_{pN} I}.$$

Здесь M_N — номинальный крутящий момент дизеля, Н·м; h_p — текущее перемещение рейки ТНВД, мм; h_{pN} — номинальный ход рейки ТНВД, мм; I — приведенный момент инерции дизеля с присоединенными агрегатами, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Коэффициент усиления дизеля

$$k_d = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{30}{\pi} \frac{M_N}{h_p I \omega}, \quad (3)$$

где $aw = (30/\pi) M_N / (h_p I)$, Н·м/мм; $bw = 0$; $cw = 0$; $dw = \omega$.

Основной фазовый сдвиг, град, дизеля

$$\begin{aligned} \gamma_d &= -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = \\ &= -\arctg \frac{30}{\pi} \frac{M_N}{h_p I} \frac{180}{\pi} = -90^\circ. \end{aligned}$$

Фазовый сдвиг, град, запаздывания дизеля

$$\gamma_{з.д} = \frac{\omega t_{з.д} 180^\circ}{\pi}, \quad (4)$$

где $t_{з.д} = 15(2\tau + i)/ni$ — время запаздывания дизеля, с; τ — тактность дизеля; n — частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; i — число цилиндров дизеля.

Суммарный фазовый сдвиг, град, дизеля представляет собой сумму основного фазового сдвига и фазового сдвига запаздывания дизеля:

$$\gamma_{с.д} = \gamma_d + \gamma_{з.д} = 90^\circ + \frac{\omega t_{з.д} 180^\circ}{\pi}.$$

При расчетных исследованиях использованы следующие основные параметры дизеля 12ЧН 26/26: $M_N = 21\,065$ Н·м — номинальный крутящий момент дизеля; $I = 630$ кг·м² — приведенный момент инерции дизеля; $\tau = 4$ — число тактов дизеля; $i = 12$ — число цилиндров дизеля.

Время запаздывания дизеля по формуле (4):

- для режима номинальной частоты вращения ($n = 1\,000$ мин⁻¹)

$$t_{з.д} = \frac{15(2\tau + i)}{ni} = \frac{15(2 \cdot 4 + 12)}{1\,000 \cdot 12} = 0,025 \text{ с};$$

- для режима минимальной частоты вращения ($n = 350$ мин⁻¹)

$$t_{з.д} = \frac{15(2\tau + i)}{ni} = \frac{15(2 \cdot 4 + 12)}{350 \cdot 12} = 0,071 \text{ с}.$$

Модулятор. Число зубьев модулятора, проходящих за 1 с мимо ДЧВ, 1/с, определяется уравнением

$$z_{им} = \frac{z_m}{60} n,$$

где n — частота вращения дизеля, мин⁻¹; z_m — число зубьев модулятора.

Коэффициент усиления, 1/(с·мин⁻¹), модулятора

$$k_m = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{z_m}{60}, \quad (5)$$

а фазовый сдвиг, град, равен нулю:

$$\gamma_m = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = 0,$$

где $aw = z_m/60$, 1/(с·мин⁻¹); $bw = 0$; $cw = 1$; $dw = 0$; $z_m = 124$ — число зубьев модулятора дизеля 12 ЧН 26/26.

Датчик частоты вращения. Число периодов синусоидальных сигналов z_i , поступающих от ДЧВ и проходящих за 1 с, 1/с, при вращении вала дизеля, равно числу зубьев модулятора z_m , проходящих за 1 с мимо ДЧВ, т. е. справедливо равенство

$$z_i = z_{им}.$$

Коэффициент усиления, 1/(с·мин⁻¹), ДЧВ

$$k_{ДЧВ} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = 1, \quad (6)$$

а фазовый сдвиг, град, равен нулю:

$$\gamma_{ДЧВ} = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = 0,$$

где $aw = 1$; $bw = 0$; $cw = 1$; $dw = 0$.

Блок управления ЭРЧВ. Электронный регулятор частоты вращения включает блок управления и ИУ. В блок управления входит несколько звеньев регулирования: звено задержки, обусловленное расчетом частоты вращения через интервал времени t_3 ; звено расчета текущей частоты вращения; звено фильтрации; пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) звено.

Число периодов синусоидальных сигналов за 1 с, поступающих от ДЧВ, при наличии задержки по времени (звено задержки) определяют по формуле

$$z_{i3} = z_i(t - \tau),$$

где $\tau = t_3$ — время задержки, с. При $t < \tau$ $z_{i3} = 0$ при $t > \tau$ $z_{i3} = z_i$.

Коэффициент усиления, 1/(с·мин⁻¹), звена задержки

$$k_3 = 1, \quad (7)$$

фазовый сдвиг, град,

$$\gamma_3 = -\arctg(t_3 \omega) \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Текущее значение частоты вращения, мин⁻¹, по синусоидальным сигналам (звено расчета текущей частоты вращения)

$$n_t = k_{p,ч} z_{i3},$$

где $k_{p,ч} = 60/z_i$ — коэффициент усиления звена расчета текущей частоты вращения, с/мин⁻¹,

$$k_{p,ч} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}}$$

Фазовый сдвиг, град, равен нулю:

$$\gamma_{p,ч} = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = 0,$$

где $aw=k_{p,ч}$, с/мин⁻¹; $bw=0$; $cw=1$, мин⁻¹; $dw=0$.

Текущее значение частоты вращения, мин⁻¹, после фильтрации (звено фильтрации)

$$n_T = n_\phi + \frac{dn_\phi}{dt} T_\phi,$$

где n_ϕ — текущее значение частоты вращения вала после фильтрации, мин⁻¹; dn_ϕ/dt — текущее значение скорости изменения частоты вращения вала после фильтрации, мин⁻¹/с; T_ϕ — постоянная времени звена фильтрации, с.

Коэффициент усиления, 1/(с·мин⁻¹), звена фильтрации определяется по формуле

$$k_\phi = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + T_\phi^2 \omega^2}},$$

фазовый сдвиг, град,

$$\begin{aligned} \gamma_\phi &= -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = \\ &= -\arctg(T_\phi \omega) \frac{180^\circ}{\pi}, \end{aligned}$$

где $aw=1$ мин⁻¹; $bw=0$; $cw=1$ мин⁻¹; $dw=T_\phi \omega$.

Пропорционально-интегральное дифференциальное звено, устанавливаемое после звена фильтрации, формирует напряжение, которое подается на электромагнит ИУ. Это напряжение, В, подчиняется закону, определяемому формулой

$$U = k_1 n + k_2 \frac{dn}{dt} + k_3 \int n dt,$$

где $n = n_\phi - n_3$ — разность между текущей частотой вращения n_ϕ (после звена фильтрации) и заданной частотой вращения n_3 , мин⁻¹; k_1 — пропорциональный коэффициент регулирования, В/мин⁻¹; k_2 — дифференциальный коэффициент регулирования, В·с/мин⁻¹; k_3 — интегральный коэффициент регулирования, В/(с·мин⁻¹).

Коэффициент усиления, В/мин⁻¹, звена ПИД

$$k_{пид} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + k_1^2 \omega^2}{\omega}}$$

фазовый сдвиг, град,

$$\begin{aligned} \gamma_{пид} &= -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = \\ &= -\arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega} \frac{180^\circ}{\pi}, \end{aligned}$$

где $aw=k_3 - k_2 \omega^2$, В/с²·мин⁻¹; $bw=k_1 \omega$, В·с/мин⁻¹; $cw=0$; $dw=1$, В/с.

Коэффициент усиления, В·с, блока управления равен произведению коэффициентов усиления звена задержки, звена расчета текущей частоты вращения, звена фильтрации и звена ПИД:

$$\begin{aligned} k_{б.у} &= k_3 k_{p,ч} k_\phi k_{пид} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \\ &= k_{p,ч} \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + k_1^2 \omega^2}{1 + T_\phi^2 \omega^2}}. \end{aligned}$$

Фазовый сдвиг, град, блока управления равен сумме фазовых сдвигов звена задержки, звена расчета текущей частоты вращения, звена фильтрации и звена ПИД:

$$\begin{aligned} \gamma_{б.у} &= \gamma_3 + \gamma_{p,ч} + \gamma_\phi + \gamma_{пид} = -[\arctg(t_3 \omega) + \\ &+ \arctg(T_\phi \omega) + \arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega} \frac{180^\circ}{\pi}]. \end{aligned}$$

Электрогидравлическое ИУ. Электрогидравлическое ИУ состоит из электромагнита, золотника, силового поршня и рычажной передачи обратной связи от силового поршня к золотнику и к электромагниту. Для расчета величины коэффициента скорости сервомотора k_s определяют площадь, мм², открытия щели золотника управления

$$s_3 = \frac{Q \cdot 10^6}{\mu \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p 9,81 \cdot 10^4}}, \quad (8)$$

где $Q = 4,8$ л/мин = $8 \cdot 10^{-5}$ м³/с — производительность масляного насоса при номинальной частоте вращения дизеля $n = 1\,000$ мин⁻¹; $\mu = 0,6$ — коэффициент расхода щели золотника;

$\Delta p = 5,5 \text{ бар} = 0,55 \text{ МПа}$ — давление в нижней полости сервомотора; $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ — плотность рабочей жидкости (масла). После подстановки указанных значений параметров в формулу (8) получим следующее значение площади открытия щели золотника:

$$s_3 = \frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot 10^6}{0,6 \sqrt{\frac{2}{950} 5,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4}} = 3,956 \text{ мм}^2.$$

Ход золотника

$$x_3 = \frac{s_3}{2L_{\text{щ}}}, \quad (9)$$

где $L_{\text{щ}} = 8 \text{ мм}$ — длина открытой щели золотника, определяемая по рис. 4. После подстановки известных значений параметров в формулу (9) находим

$$x_3 = \frac{3,956}{2 \cdot 8} = 0,25 \text{ мм}.$$

Коэффициент скорости, с^{-1} , сервомотора

$$k_s = \frac{Q \cdot 10^9}{s_c x_3}, \quad (10)$$

где $s_c = 1 \text{ 256 мм}^2$ — площадь поршня сервомотора. После подстановки значений параметров в формулу (10) получим

$$k_s = \frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot 10^9}{1256 \cdot 0,25} = 250 \text{ с}^{-1}.$$

Скорость сервомотора, мм/с , определяется по формуле

$$\frac{dY}{dt} = k_s \left[X - \frac{Y r_b b}{r_s (a + b)} \right], \quad (11)$$

где X — перемещение золотника, мм ; Y — перемещение сервомотора, мм ; r_b, r_s, a, b — конструктивные параметры (см. рис. 3); $k_s = 250 \text{ с}^{-1}$ по формуле (10).

Перемещения, мм , конца рычага обратной связи определяют по следующим формулам:

$$G = ik_3; \quad (12)$$

$$G = (a + b) \frac{X}{b}, \quad (13)$$

где $k_3 = 6 \text{ мм/А}$ — коэффициент усиления электромагнита. Текущее значение тока, А , в катушке электромагнита

$$i + T_3 \frac{di}{dt} = \frac{U}{R_3}, \quad (14)$$

где di/dt — скорость протекания тока в катушке поворотного электромагнита, А/с ; $T_3 = 0,06 \text{ с}$ — постоянная времени поворотного электромагнита; $R_3 = 2,7 \text{ Ом}$ — сопротивление в цепи питания поворотного электромагнита.

С использованием формул (11)–(14) получено уравнение перемещения, мм , сервомотора ИУ:

$$Y + 2\delta T \frac{dY}{dt} + T^2 \frac{d^2Y}{dt^2} = Uk_u,$$

где $k_u = r_s k_3 a / R_3 r_b b$ — коэффициент при среднем напряжении, подаваемом на электромагнит ИУ, мм/В ; $T = \sqrt{(a + b) r_s T_3 / k_s r_b b}$ — постоянная времени ИУ, с ; $\delta = \sqrt{[(a + b) r_s T_3 k_s r_b b] / [2[(a + b) r_s + T_3 r_b b k_s]]}$ — коэффициент демпфирования.

Коэффициент усиления ИУ, мм/В ,

$$k_{\text{ИУ}} = \frac{k_u}{\sqrt{cw^2 + dw^2}} = \frac{k_u}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\delta T \omega)^2}};$$

фазовый сдвиг, град ,

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{ИУ}} &= -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = \\ &= -\arctg \frac{2\delta T \omega}{1 - T^2 \omega^2} \frac{180^\circ}{\pi}. \end{aligned}$$

где $aw = k_u$, мм/В ; $bw = 0$; $cw = 1 - T^2 \omega^2$, с^{-1} ; $dw = 2\delta T \omega$, с^{-1} .

ЭРЧВ в целом. Коэффициент усиления, $\text{мм} \cdot \text{с}$, ЭРЧВ равен произведению коэффициентов усиления блока управления и ИУ:

$$k_{\text{ЭРЧВ}} = k_{\text{б.у}} k_{\text{ИУ}} = k_{\text{р.ч}} k_u \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + (k_1 \omega)^2}{(1 + T_\phi^2 \omega^2)[(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\delta T \omega)^2]}.$$

Фазовый сдвиг, град , электронного регулятора частоты вращения равен сумме фазовых сдвигов звена блока управления и ИУ:

$$\gamma_{\text{ЭРЧВ}} = \gamma_{\text{б.у}} + \gamma_{\text{ИУ}} = -[\arctg(t_3 \omega) + \arctg(T_\phi \omega) + \arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega} + \arctg \frac{2\delta T \omega}{1 - T^2 \omega^2}] \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Перемещение, мм, реек ТНВД

$$h_p = k_{\text{р.п}} Y,$$

где Y — перемещение поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм; $k_{\text{р.п}}$ коэффициент — рычажной передачи, $k_{\text{р.п}} = h_{\text{р.п}} / Y_N$; $h_{\text{р.п}}$ — номинальный ход реек ТНВД, мм; Y_N — номинальный ход поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм.

Коэффициент усиления рычажной передачи от ИУ ЭРЧВ к рейкам ТНВД дизеля

$$k_{\text{р.п}} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{h_{\text{р.п}}}{Y_N};$$

фазовый сдвиг, град, равен нулю в соответствии с формулой

$$\gamma_{\text{р.п}} = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180^\circ}{\pi} = 0,$$

где $aw = h_{\text{р.п}} / Y_N$; $bw = 0$; $cw = 1$; $dw = 0$.

Поскольку в замкнутой системе регулирования в режиме автоколебаний произведение коэффициентов усиления всех звеньев равно единице, то коэффициент усиления, мм/с⁻¹, регулятора дизеля 12 ЧН 26/26 в режиме автоколебаний

$$k_{\text{р.а}} = \frac{1}{k_{\text{ДЧВ}} k_{\text{М}} k_{\text{Ч.В}} k_{\text{р.п}}}.$$

С учетом формул (3), (5)–(7) коэффициент усиления регулятора в режиме автоколебаний описывается следующим выражением:

$$k_{\text{р.а}} = \frac{4\pi^2 f I Y_N}{M_N z_{\text{М}}}.$$

Два варианта частотных характеристик ЭРЧВ представлены на рис. 5. На этом же рисунке приведена зависимость коэффициента усиления регулятора в режиме автоколебаний $k_{\text{р.а}}$ от частоты колебаний f . Точки пересечения зависимостей коэффициента усиления электронного регулятора $k_{\text{р}}$ от частоты колебаний f и характеристики $k_{\text{р.а}} = f(f)$ определяют собственную частоту колебаний САРЧ f_c .

Для собственной частоты колебаний f_c по рис. 5 определяют фазовый сдвиг электронного регулятора частоты вращения $\gamma_{\text{р}}$, а по формуле

(4) — дополнительный фазовый сдвиг дизеля. Суммарный фазовый сдвиг, град, САРЧ

$$\gamma_c = 90^\circ + \gamma_{\text{р}} + \gamma_{\text{з.д}}.$$

Если $\gamma_c < 180^\circ$, то система устойчива. По собственной частоте колебаний и времени запаздывания определяют заброс частоты вращения САРЧ дизеля при сбросе номинальной нагрузки:

$$\delta_d = \frac{1500 M_N}{\pi I f_c n} + \frac{3000 M_N t_{\text{з.д}}}{\pi I n Y_N}.$$

В таблице приведены значения коэффициентов ПИД-закона регулирования принятые для расчетов. Номинальный ход сервомотора ИУ электронного регулятора частоты вращения $Y_N = 15$ мм.

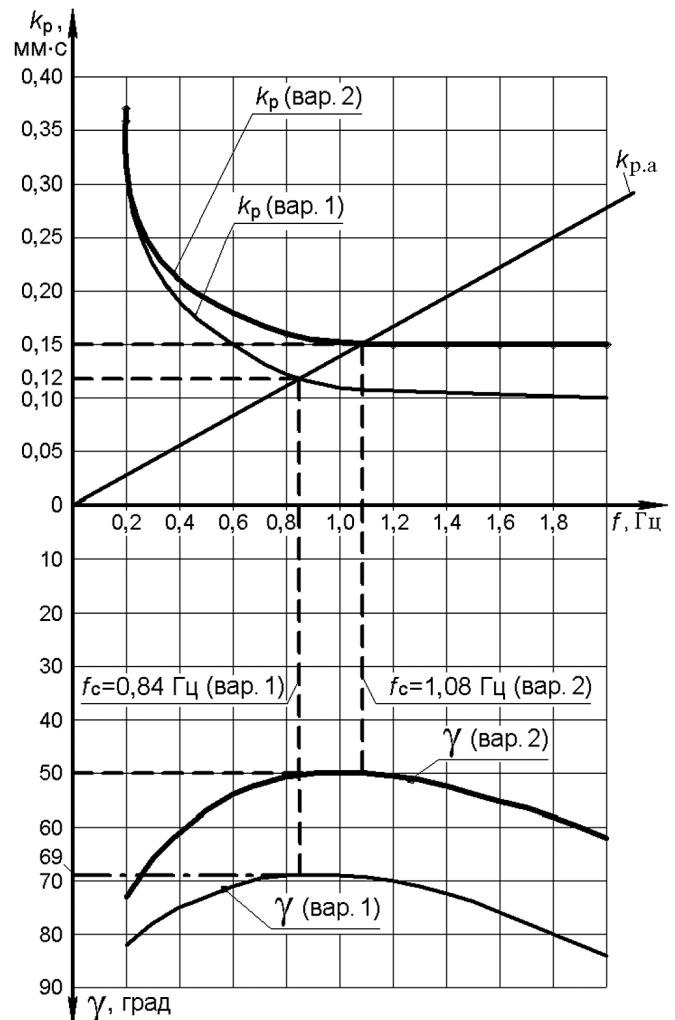


Рис. 5. Частотные характеристики ЭРЧВ:

f — частота колебаний; $k_{\text{р}}$ — коэффициент усиления регулятора; $k_{\text{р.а}}$ — коэффициент усиления регулятора в режиме автоколебаний; γ — фазовый сдвиг регулятора

Коэффициенты ПИД-закона регулирования, заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки δ_d и частотные показатели ЭРЧВ дизеля 12 ЧН 26/26

Вариант	Коэффициент ПИД-закона регулирования			Заброс частоты вращения δ_d , %	Собственная частота колебаний f_c , Гц	Суммарный фазовый сдвиг САРЧ γ_c , град
	k_1 , В/мин ⁻¹	k_2 , В·с/мин ⁻¹	k_3 , В/(с·мин ⁻¹)			
№ 1	0,03	0,001	0,15	6,9	0,84	-167
№ 2	0,05	0,001	0,15	5,5	1,08	-150

По результатам расчетов построены амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ЭРЧВ (зависимости коэффициента усиления и фазового сдвига от частоты колебаний частоты вращения), показанные на рис. 5. Полученные частотные характеристики свидетельствуют о том, что реализация характеристик по варианту № 2, соответствующих большему коэффициенту усиления пропорциональной составляющей ПИД-закона регулирования ($k_1=0,05$ В/мин⁻¹), позволяет улучшить показатели качества процесса регулирования — уменьшить заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки до $\delta_d=5,5$ % и снизить суммарный фазовый сдвиг САРЧ до $\gamma_c=150^\circ$, т. е. увеличить ее запас устойчивости.

Литература

1. Крутов В.И. Электронные системы регулирования и управления двигателями внутреннего сгорания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 138 с.
2. Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. М.: Изд-во «Легион-Автodata», 2001. 136 с.
3. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автodata», 2005. 344 с.
4. Системы управления дизельными двигателями: Пер. с нем. М.: ЗАО «КЖИ За рулем», 2004. 480 с.
5. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

6. Trenne M.U., Ives A.P. Closed Loop Design for Electronic Diesel Injection Systems // SAE Technical Paper Series. 1982. № 820447. P. 133–139.

7. Shiozaki M., Hobo N., Akahori J. Development of a Fully Capable Electronic Control System for Diesel Engine // SAE Technical Paper Series. 1985. № 850172. P. 1–8.

8. Коссов Е.Е., Шапран Е.Н., Фурман В.В. Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов. Луганск: Изд-во Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля, 2006. 280 с.

9. Коссов Е.Е., Сухопаров С.И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. М.: Изд-во «Интертекст», 1999. 184 с.

10. Луков Н.М. Автоматические системы управления и регулирования тепловозов. М.: Изд-во МИИТ, 1983. 144 с.

References

1. Krutov V.I. *Elektronnye sistemy regulirovaniia i upravleniia dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Electronic systems of regulation and control of internal combustion engines]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 1991. 138 p.

2. Pinskiy F.I., Davtian R.I., Cherniak B.Ia. *Mikroprotsessornye sistemy upravleniia avtomobil'nymi dvigateliami vnutrennego sgoraniia* [Microprocessor control systems automotive internal combustion engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2001. 136 p.

3. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaia apparatura i sistemy upravleniia dizelei* [Fuel equipment and control systems of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.

4. *Sistemy upravleniia dizel'nymi dvigateliami* [Diesel engine management system]. Moscow, ZAO KZHI Za rulem publ., 2004. 480 p.

5. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2002. 376 p.

6. Trenne M.U., Ives A.P. Closed Loop Design for Electronic Diesel Injection Systems. *SAE Technical Paper Series*. 1982, no. 820447, pp. 133–139.

7. Shiozaki M., Hobo N., Akahori J. Development of a Fully Capable Electronic Control System for Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*. 1985, no. 850172, pp. 1–8.

8. Kossov E.E., Shapran E.N., Furman V.V. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty silovykh energeticheskikh sistem teplovozzov* [Improving the operation modes of power energy systems of diesel locomotives]. Lugansk, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University publ., 2006. 280 p.

9. Kossov E.E., Sukhoparov S.I. *Optimizatsiia rezhimov raboty teplovozznykh dizel'-generatorov* [Optimize operation of locomotive diesel generators]. Moscow, Intekst publ., 1999. 184 p.

10. Lukov N.M. *Avtomaticheskie sistemy upravleniia i regulirovaniia teplovozzov* [Automatic control and regulation of locomotives]. Moscow, MIIT publ., 1983. 144 p.

Статья поступила в редакцию 25.04.2013

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

ФУРМАН Виктор Владимирович (Саратов) — кандидат технических наук, ведущий конструктор проектно-производственного предприятия ООО «ППП Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Чернышевского ул., 109).

ИВАНОВ Виктор Алексеевич (Саратов) — инженер-конструктор проектно-производственного предприятия ООО «ППП Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Чернышевского ул., 109).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatol'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

FURMAN Viktor Vladimirovich (Saratov) — Cand. Sc. (Eng.), Leading Designer at Design and Production Enterprise LLC «Dizelavtomatika» (Chernyshevskogo str., 109, 410017, Saratov, Russian Federation).

IVANOV Viktor Alekseevich (Saratov) — Design Engineer at Design and Production Enterprise LLC «Dizelavtomatika» (Chernyshevskogo str., 109, 410017, Saratov, Russian Federation).