

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

В.С. Гун, В.С. Морозова, В.В. Шешуков

Приводится методика расчета коэффициентов обратных связей, обеспечивающих заданные динамические свойства электромеханических систем. В качестве примера рассмотрена электронная система управления перемещением рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) дизеля. Получены зависимости коэффициентов обратных связей системы управления от длительности переходного процесса (III). Построена математическая модель.

Задача улучшения экономических и экологических характеристик транспортных дизелей особенно актуальна при нестационарных (переходных) режимах, для которых наблюдается несогласованное снабжение цилиндров воздухом и топливом, что приводит к снижению эффективности использования топлива и увеличению содержания сажи в отработанных газах. Поэтому исследование и моделирование совместной работы дизелей и систем управления топливоподачей, в частности, регуляторов разных типов представляет собой практически важную и актуальную задачу, весьма сложную и трудоёмкую.

В работе рассматриваются некоторые принципы построения математической модели функционирования системы «дизель - электронный регулятор» в переходных режимах (рис. 1).

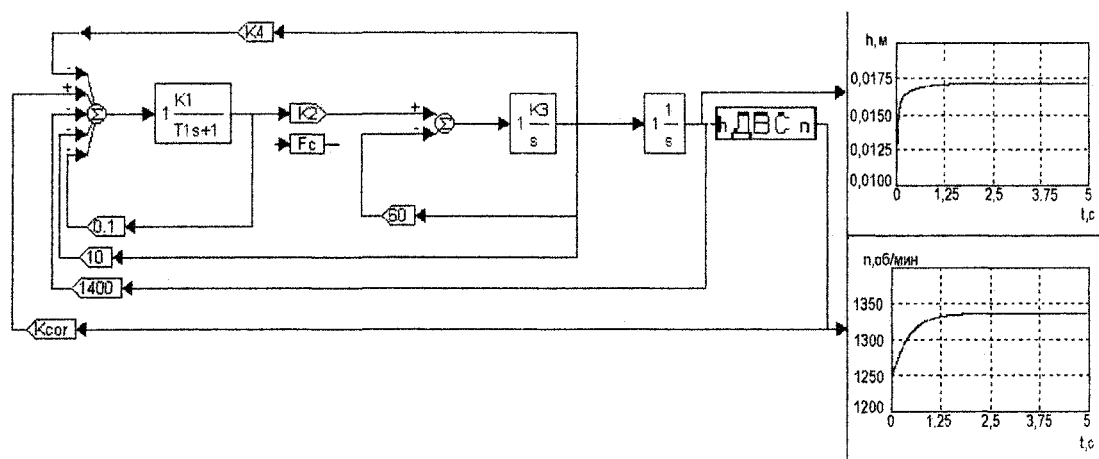


Рис. 1. Контур управления переходными режимами дизеля с электронным регулятором

Принятая в работе математическая модель содержит описание трех блоков: регулятора частоты вращения, регулятора положения рейки и дизеля [1].

Динамика системы «дизель - электронный регулятор» во многом определяется параметрами звеньев обратных связей, поэтому встает задача поиска методики их оптимального выбора. В настоящей работе предложен простой алгоритм определения этих параметров, достаточный для большинства инженерных приложений. Для исключения перерегулирования все корни характеристического уравнения, описывающие переходный процесс системы «дизель - электронный регулятор» должны быть равны.

В зависимости от режима эксплуатации дизеля время ПП необходимо регулировать: для экологических режимов увеличивать, для улучшения динамики - уменьшать. Алгоритм предназначен для:

а) определения коэффициентов обратных связей (ОС) регулятора, исходя из коэффициентов усиления и постоянных времени его звеньев;

б) определения тех же величин для системы «дизель - электронный регулятор», исходя из коэффициентов усиления и постоянных времени звеньев регулятора и линеаризованной модели дизеля.

Расчет и конструирование

Изложим работу алгоритма для случая (а). Согласно [2], с большой степенью общности разомкнутый контур управления в рассматриваемом случае описывается системой линейных дифференциальных уравнения m -го порядка. В матричной записи эта система выглядит так:

$$y' = Ay + Dx, \quad (1)$$

где y - вектор-столбец переменных управления, задаваемых регулятором;

A, D - матрицы коэффициентов звеньев регулятора;

x - вектор-столбец входных переменных.

Пусть в устройстве введена обратная связь по всем переменным:

$$x = f - R \cdot y, \quad (2)$$

где $K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & k_m \end{bmatrix}$ диагональная матрица коэффициентов ОС, m - порядок системы диф-

ференциальных уравнений;

f - вектор-столбец сигналов заданий.

Авторами работы [2] показано, что характеристический полином замкнутого контура электронного регулятора после преобразований принимает вид:

$$\text{Det}\{A - DK - \lambda E\} = 0, \quad (3)$$

где E - единичная матрица, или, в скалярной форме:

$$\lambda^m + C_1(k)\lambda^{m-1} + \dots + C_m(k) = 0. \quad (4)$$

Можно показать, что выражения для коэффициентов C_i характеристического полинома (4) не содержат произведений коэффициентов ОС r_i . Поэтому в настоящей работе предложен простой алгоритм их нахождения методом перебора:

1. Задаемся диапазонами допустимых значений коэффициентов обратных связей.

2. Перебираем с определенными шагами значения этих коэффициентов.

3. Для каждого набора k_1, \dots, k_m коэффициентов определяем значения корней λ_i характеристического полинома (4).

4. Тот набор значений коэффициентов обратных связей, который дает подходящий корень характеристического полинома из набора корней λ_i при отсутствии в наборе комплексно сопряженных корней, считается оптимальным [5].

Если порядок системы не превышает 4, задача нахождения коэффициентов ОС решается аналитически.

В качестве примера случая (а) рассмотрим электронный регулятор частоты вращения с электромагнитным приводом рейки ТНВД (рис. 2).

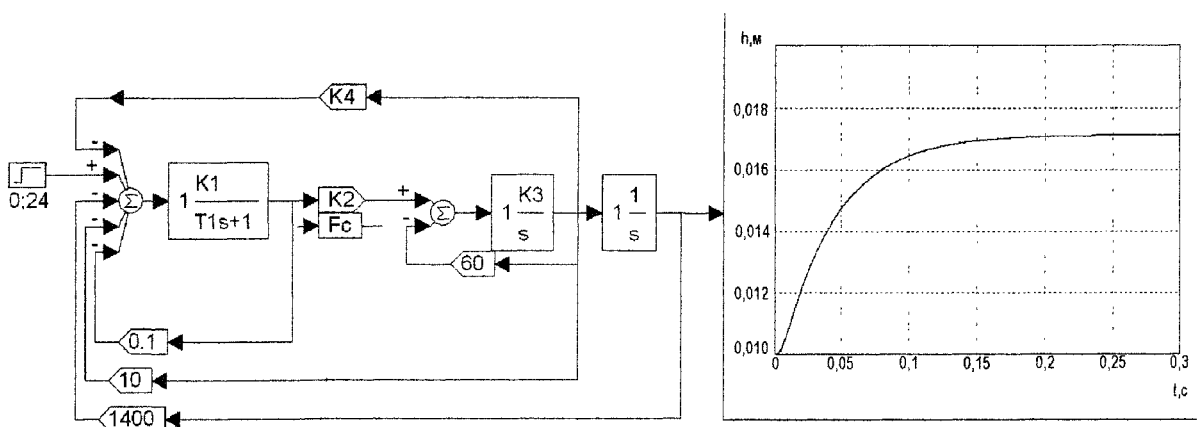


Рис. 2. Контур управления переходными режимами электромагнитного привода рейки ТНВД

Система дифференциальных уравнений, описывающая переходные режимы электромагнитного привода рейки ТНВД, имеет вид [3]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{Bl}{M}i - \frac{c}{M}v; \\ \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{Bl}{L}v - \frac{k_0}{L}x - \frac{k_1}{L}v - \frac{k_2}{L}i + \frac{u}{L}, \end{cases} \quad (5)$$

где: i - ток якоря электромагнита;

u - напряжение на обмотке якоря;

v - скорость перемещения рейки;

x - положение рейки;

M - масса подвижных частей;

R - сопротивление обмотки якоря;

c - электромеханический коэффициент;

L - индуктивность обмотки якоря;

k_0 - коэффициент обратной связи по перемещению рейки;

k_1 - коэффициент обратной связи по скорости перемещения рейки;

k_2 - коэффициент обратной связи по току;

l - длина проводника.

В матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ v \\ i \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ v \\ i \end{pmatrix}; \quad (6)$$

где матрица A имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{c}{M} & -\frac{Bl}{M} \\ -\frac{k_0}{L} & -\left(\frac{k_1}{L} + \frac{Bl}{L}\right) & -\left(\frac{R}{L} + \frac{k_2}{L}\right) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Так как система уравнений (5) линейна, то решение задается экспонентой:

$$\begin{pmatrix} x \\ v \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \\ i_0 \end{pmatrix} \exp(\lambda t). \quad (8)$$

Подставляя решение вида (8) в уравнения системы (5), получаем:

$$\lambda \begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \\ i_0 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \\ i_0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

или, в эквивалентном виде:

$$(A - \lambda E) \begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \\ i_0 \end{pmatrix} = 0. \quad (10)$$

Выражения (10) - система линейных дифференциальных уравнений с нулевой правой частью, которая имеет нетривиальное решение только, когда ее определитель равен нулю. Это дает уравнение для определения собственных значений матрицы A :

Расчет и конструирование

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ 0 & -\lambda - \frac{c}{M} & \frac{Bl}{M} \\ -\frac{k_0}{L} & -\left(\frac{k_1}{L} + \frac{Bl}{L}\right) & -\lambda - \left(\frac{R}{L} + \frac{k_2}{L}\right) \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

или

$$\lambda^3 + \lambda^2 \left(\frac{c}{M} + \frac{R}{L} + \frac{k_2}{L} \right) + \lambda \left(\frac{c}{M} \left(\frac{R}{L} + \frac{k_2}{L} \right) + \frac{Bl}{M} \left(\frac{Bl}{L} + \frac{k_1}{L} \right) \right) + \frac{Bl k_0}{M L} = 0. \quad (12)$$

Решая уравнение (12) относительно собственных значений λ , проанализируем движение объекта, описываемого системой уравнений (5). Для его устойчивости необходимо, чтобы все собственные значения имели отрицательные действительные части. Следовательно, для заданных значений коэффициентов обратной связи можно определить, устойчиво ли движение. С практической точки зрения важна обратная задача: каковы должны быть коэффициенты обратных связей для заданных значений λ , обеспечивающих, например, требуемые параметры переходного процесса.

Если даны значения, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, то характеристическое уравнение (12) приводится к виду

$$(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3) = 0, \quad (13)$$

что эквивалентно

$$\lambda^3 - \lambda^2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + \lambda(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3) - \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 0; \quad (14)$$

Если требуется, чтобы система уравнений (5) имела заданные корни $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, то коэффициенты при степенях переменной λ должны совпадать в уравнениях (14) и (12). Это дает систему уравнений для параметров определения k_0, k_1, k_2 при известных $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

$$\begin{cases} \frac{c}{M} + \frac{R}{L} + \frac{k_2}{L} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3); \\ \frac{c}{M} \left(\frac{R}{L} + \frac{k_2}{L} \right) + \frac{Bl}{M} \left(\frac{Bl}{L} + \frac{k_1}{L} \right) = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3; \\ \frac{Bl k_0}{M L} = -\lambda_1\lambda_2\lambda_3. \end{cases} \quad (15)$$

Решая систему (15), получаем значения коэффициентов обратной связи:

$$\begin{aligned} k_0 &= -\frac{LM}{Bl} \lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ k_1 &= L \cdot \left(-\frac{Bl}{L} + \frac{M}{Bl} (\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3) + \frac{c}{Bl} \left(\frac{c}{M} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \right) \right), \\ k_2 &= -L \cdot \left(\frac{c}{M} + \frac{R}{L} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Наложим на решение условия равенства собственных значений: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = -\gamma = -\frac{1}{\tau}$, где

τ – характерное время затухания отклонений, γ – эффективная скорость затухания.

Получаем следующие значения коэффициентов ОС:

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{LM}{Bl} \frac{1}{\tau^3}; \\ k_1 &= L \cdot \left(-\frac{Bl}{L} + \frac{M}{Bl} \frac{3}{\tau^2} + \frac{c}{Bl} \left(\frac{c}{M} - \frac{3}{\tau} \right) \right); \\ k_2 &= -L \cdot \left(\frac{c}{M} + \frac{R}{L} - \frac{3}{\tau} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

В эквивалентном виде:

$$\begin{aligned}
 k_0 &= \frac{LM}{Bl} r^3; \\
 k_1 &= L \cdot \left(-\frac{Bl}{L} + 3\frac{M}{Bl} r^2 + \frac{c}{Bl} \left(\frac{c}{M} - 3r \right) \right); \\
 k_2 &= -L \cdot \left(\frac{c}{M} + \frac{R}{L} - 3r \right).
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Пусть необходимо достичь времени $\tau = 0,0005$ с при следующих параметрах электромагнитного привода: $B=0,5$ Тл, $l=15$ м, $L=0,01$ Гн, $M=0,75$ кг, $R=12$ Ом, $c=60$. Подставляя эти величины в уравнение (17), получаем следующие коэффициенты ОС: $k_0=0,7 \cdot 10^7$; $k_1=1,9896 \cdot 10^6$; $k_2=47,2$.

В свою очередь, для $\tau = 0,1$ с при тех же параметрах электромагнитного привода, получим: $k_0=1400$, $k_1=10$, $k_2=0,1$.

Зависимости коэффициентов ОС от времени релаксации представлены на рис.3, а от скорости релаксации на рис. 4. Проанализируем их.

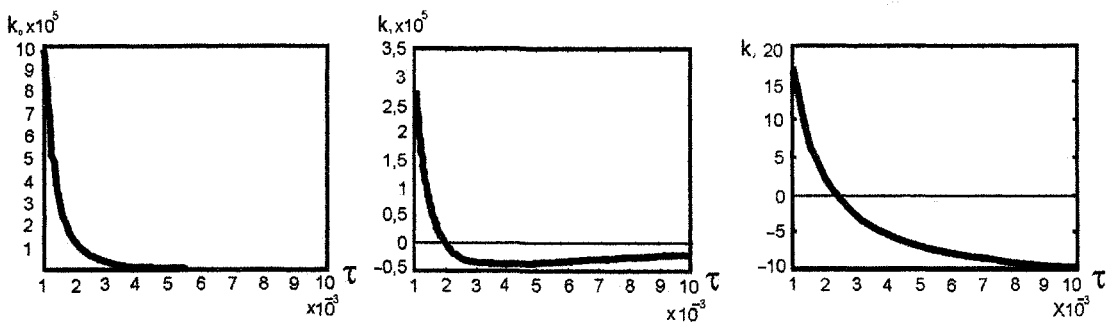


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициентов обратной связи от времени релаксации

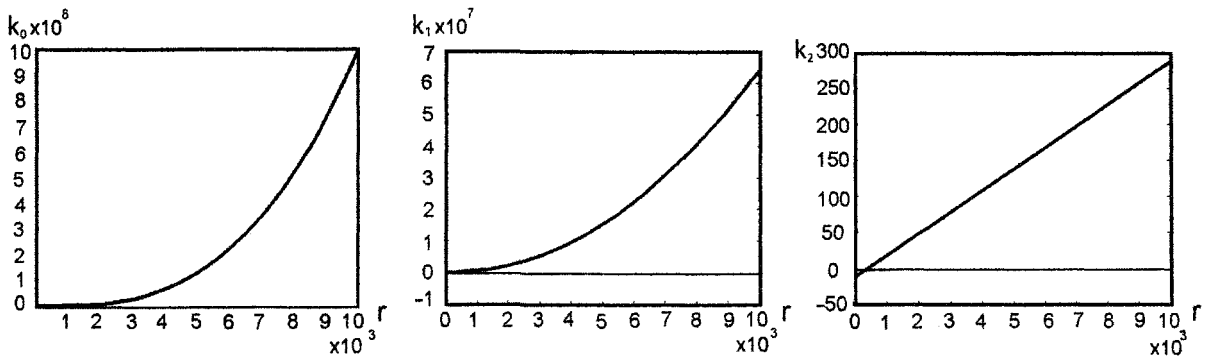


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов обратной связи от скорости релаксации

Из графиков видно, что при больших значениях времен релаксации коэффициенты ОС становятся отрицательными; по-видимому, предположение об одинаковости собственных значений и их нулевой мнимой части не всегда корректно.

Для случая (б) приводятся результаты моделирования переходных процессов дизеля Д-160 с электромагнитным регулятором частоты вращения. Математическая модель дизеля описывается уравнением [4]:

$$T_d \frac{d\varphi}{dt} + k_d \varphi = \beta;$$

где $\beta = \frac{\Delta h}{h}$, $\varphi = \frac{\Delta n}{n}$.

Для дизеля Д-160: $T_d=4,338$; $K_d=10,356$. Система уравнений, описывающая переходный процесс дизеля с электронным регулятором, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{Bl}{M}i - \frac{c}{M}v; \\ \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{Bl}{L}v - \frac{k_0}{L}x - \frac{k_1}{L}v - \frac{k_2}{L}i - k_3n + \frac{U}{L}; \\ T_d \frac{d\varphi}{dt} + k_d\varphi = \beta. \end{cases} \quad (19)$$

Коэффициенты обратных связей, найденные методом перебора: $k_0=1400$; $k_1=10$; $k_2=0,1$; $k_3=k_{кор}=0,018$ при $\lambda = 0,8$. На рис. 5 представлены зависимости перемещения рейки $h(t)$ и изменения оборотов дизеля $n(t)$ при изменения сигнала задания по оборотам.

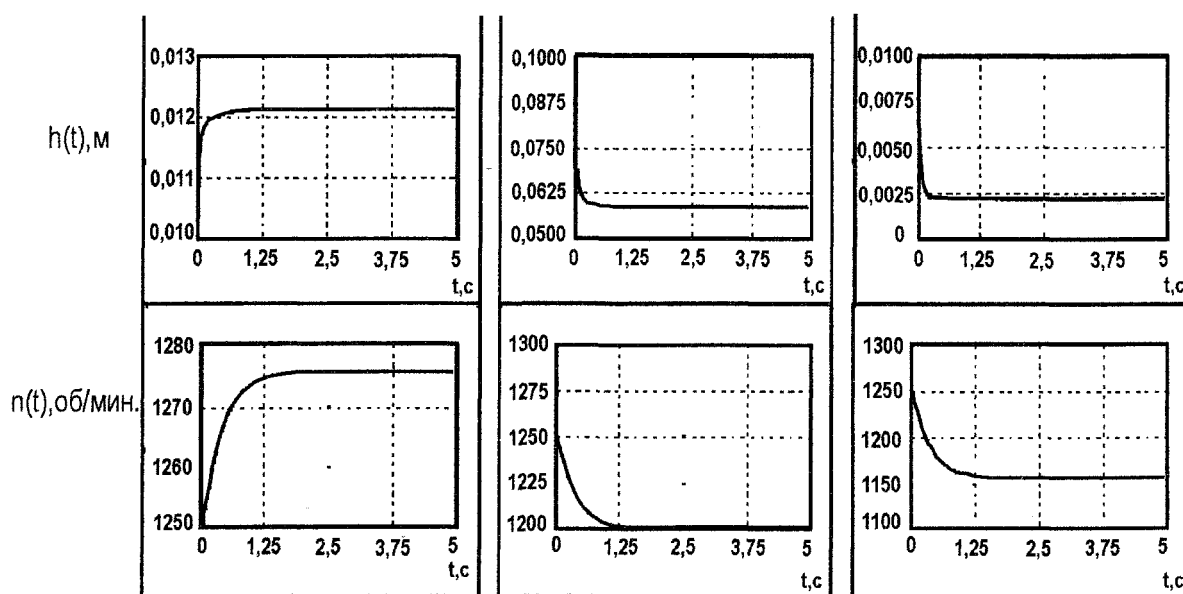


Рис. 5. Переходные процессы $h(t)$ и $n(t)$: при увеличении оборотов от 1250 до 1275 об/мин; при уменьшении оборотов от 1250 до 1200 об/мин; при уменьшении оборотов от 1250 до 1150 об/мин

Разработанная методика определения коэффициентов обратных связей позволяет аппроксимировать контуры электронного управления частотой вращения любого ДВС с заданными динамическими свойствами, обеспечивая снижение токсичности и повышение топливной экономичности на переходных и установившихся режимах [5].

На основании предложенной методики создан пакет прикладных программ, позволяющий выбирать исполнительный механизм регулятора положения рейки ТНВД дизеля с электронным регулятором частоты вращения и рассчитать коэффициенты обратных связей контура управления в зависимости от выбранного критерия оценки работы дизеля на переходных режимах.

Литература

1. Гладышев, С.П. Система управления топливоподачей тракторных дизелей / С.П. Гладышев, Г.Я. Вулах, В.С. Гун // Электронные системы управления силовыми агрегатами: Международный симпозиум по автоэлектронике 18-20 января. - Суздаль, 1994. - С. 102-103.
2. Гладышев, С.П. Динамика дискретно-управляемых полупроводниковых преобразователей. / С.П. Гладышев, В.Б. Павлов; под ред. Шидловского А.К. - Киев: Наук. Думка, 1983. - 224 с.

3. Gladyshev, S.P. *Electronic System for Control of the Fuel feed in the Diesel D-160* / S.P. Gladyshev, S.P. Mitsin, V.M. Bunov, V.S. Goon // *SAE International Congress and Exposition*. - Detroit, Michigan. - Feb. 27-Mar. 2, 1995. ~P. 67-69.

4. Гладышев, СП. *Динамические свойства одноцилиндрового дизеля с идеальным регулятором частоты вращения* / СП. Гладышев, В.С. Гун. - Курган, 1995. - 5 с. - Деп. в ЦНИИТЭИм-ракторсельхозмаш. - 1995. - № 1604. - С. 94.

5. Bunov, V.M. *Algorithmic maintenance of a diesel engine electronic fuel controller by criterion of the contents of soot in exhaust gas* / V.M. Bunov, V.S. Morozova, V.S. Goon // *SAE World Congress - 12-19Apr. 2007*. - № 07. - PFL-452. - P. 11-16.