

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ САР ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

*Прохоренко А.А., кандидат технических наук*

*Отримано диференціальне рівняння руху системи автоматичного регулювання дизеля без наддуву з акумуляторною паливною апаратурою. Рівняння має четвертий порядок і може бути використано для вирішення завдань динаміки САР.*

*Differential equalization of motion of the automatic control system of diesel is got without a supercharge with a storage-battery fuel apparatus. A fourth order has equalization and it can be used for the decision of tasks of dynamics of ACS.*

В современных дизельных двигателях, оборудованных аккумуляторными топливными системами (ТС), возможно применение только электронных регуляторов [1, 2]. Для синтеза такого регулятора необходимо решить задачи динамики системы автоматического регулирования (САР), отвечающие на вопросы сходимости и качества переходного процесса, а также иметь возможность оптимизации последнего. Принципиально эти задачи могут быть решены двумя путями: экспериментальным и расчетным.

Экспериментальный путь синтеза неудобен из-за значительных затрат времени и материальных ресурсов, связанных с длительными испытаниями двигателя.

В большинстве случаев принято решать задачи динамики для САР Двигателей внутреннего сгорания (ДВС) расчетным путем [3]. Этот путь сводится к составлению дифференциального уравнения движения САР в целом на основе дифференциальных уравнений ее элементов. Тогда решение такого уравнения даст зависимость регулируемого параметра от времени, то есть математическое выражение переходного процесса:  $\omega = f(t)$ , где  $\omega$  – угловая скорость коленчатого вала,  $t$  – время.

Именно получению и анализу такого дифференциального уравнения САР и посвящена настоящая статья.

Система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля с аккумуляторной ТС состоит из двух основных элементов: самого двигателя, как регулируемого объекта и электронного регулятора, воздействующего на орган управления величиной подачи топлива (электромагнит форсунки). Структурная схема такой системы представлена на рис. 1.

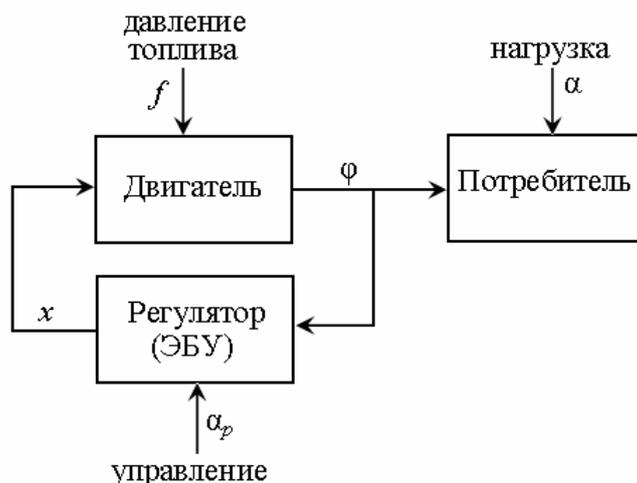


Рис. 1 Структурная схема САР

Уравнение движения дизельного двигателя без наддува с аккумуляторной ТС было получено в работе [4]. Это уравнение связывает входные координаты:  $x$  – изменение продолжительности управляющего импульса на электромагнит форсунки,  $\alpha$  – изменение загрузки на двигатель,  $f$  – относительной продолжительности сигнала на электромагнитный клапан аккумулятора и выходную  $\phi$  – изменение угловой скорости вращения коленчатого вала. Записанное в операторной форме, оно

имеет вид:

$$\left[ A_2 p^2 + A_1 p + A_0 \right] \varphi = \left[ B_1 p + B_0 \right] x - (C_1 p + C_0) \alpha - D_0 f. \quad (1)$$

Уравнение регулятора, описанное в работах [2, 5], связывает входные координаты:  $\varphi$ , а также  $\alpha_p$  – относительное изменение положения органа управления двигателем (внешнее управляющее воздействие) и выходную  $x$  [2]:

$$T_p^2 p^2 x + T_K p x + \delta_z x = -T_r p \varphi - \varphi + 0,5 T_K p \alpha_p + \delta_z \alpha_p. \quad (2)$$

Для нахождения уравнения движения замкнутой САР должны быть совместно решены уравнения (1) и (2), составляющие систему. При совместном решении системы уравнений необходимо прежде всего выбрать параметр, изменение во времени которого исследуется. При изучении процессов регулирования ДВС в качестве такого параметра выбирается угловая скорость вращения коленчатого вала, выраженная обобщенной координатой [3].

Выразим из уравнения (2) координату  $x$  через сумму передаточных функций от координат  $\varphi$  и  $\alpha_p$ :

$$x = -\frac{T_r p + 1}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \varphi + \frac{0,5 T_K p + \delta_z}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \alpha_p, \quad (3)$$

и подставим полученное выражение в уравнение (1):

$$\left[ A_2 p^2 + A_1 p + A_0 \right] \varphi = \left[ B_1 p + B_0 \right] \left( -\frac{T_r p + 1}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \varphi + \frac{0,5 T_K p + \delta_z}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \alpha_p \right) - (C_1 p + C_0) \alpha - D_0 f. \quad (4)$$

После приведения к общему знаменателю слагаемых выражения (4), раскрытия всех скобок и группировки общих множителей уравнение получит вид:

$$\begin{aligned} & \left[ A_2 T_p^2 p^4 + (A_2 T_K + A_1 T_p^2) p^3 + (A_2 \delta_z + A_1 T_K + A_0 T_p^2 + B_1 T_r) p^2 + (A_1 \delta_z + A_0 T_K + B_1 + B_0 T_r) p + \right. \\ & \left. + (A_0 \delta_z + B_0) \right] \varphi = \left[ 0,5 B_1 T_K p^2 + (B_1 \delta_z + 0,5 B_0 T_K) p + B_0 \delta_z \right] \alpha_p - \\ & - \left[ C_1 T_p^2 p^3 + (C_1 T_K + C_0 T_p^2) p^2 + (C_1 \delta_z + C_0 T_K) p + C_0 \delta_z \right] \alpha - (D_0 T_p^2 p^2 + D_0 T_K p + D_0 \delta_z) f. \end{aligned} \quad (5)$$

Произведем замены в уравнении (5):

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= A_2 T_p^2; a_3 = A_2 T_K + A_1 T_p^2; a_2 = A_2 \delta_z + A_1 T_K + A_0 T_p^2 + B_1 T_r; \\ a_1 &= A_1 \delta_z + A_0 T_K + B_1 + B_0 T_r; a_0 = A_0 \delta_z + B_0; \\ b_2 &= 0,5 B_1 T_K; b_1 = B_1 \delta_z + 0,5 B_0 T_K; b_0 = B_0 \delta_z; \\ c_3 &= C_1 T_p^2; c_2 = C_1 T_K + C_0 T_p^2; c_1 = C_1 \delta_z + C_0 T_K; c_0 = C_0 \delta_z; \\ d_2 &= D_0 T_p^2; d_1 = D_0 T_K; d_0 = D_0 \delta_z. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тогда уравнение (7) можно представить в следующих формах: операторной:

$$\begin{aligned} & (a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \varphi = \\ & = (b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \alpha_p - (c_3 p^3 + c_2 p^2 + c_1 p + c_0) \alpha - (d_2 p^2 + d_1 p + d_0) f, \end{aligned} \quad (7)$$

дифференциальной:

$$\begin{aligned} & a_4 \frac{d^4 \varphi}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + a_1 \frac{d \varphi}{dt} + a_0 \varphi = b_2 \frac{d^2 \alpha_p}{dt^2} + b_1 \frac{d \alpha_p}{dt} + b_0 \alpha_p - \\ & - c_3 \frac{d^3 \alpha}{dt^3} - c_2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - c_1 \frac{d \alpha}{dt} - c_0 \alpha - d_2 \frac{d^2 f}{dt^2} - d_1 \frac{d f}{dt} - d_0 f. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, из уравнений (7), (8) видно, что переходные процессы САР дизеля без наддува с электронным регулятором описываются линейным дифференциальным уравнением четвертого порядка.

Аналитическое решение полученного уравнения может быть сопряжено с определенными математическими сложностями. Однако, достаточно просто реализовать его численными методами, что даст возможность рассчитать переходный процесс при действии внешних возмущений по  $\alpha$ ,  $f$  или  $\alpha_p$ .

Кроме того, положив, что внешние воздействия на систему отсутствуют, то есть  $\alpha = f = \alpha_p = 0$ , из дифференциального уравнения (7) получим:

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) является характеристическим. Как известно, исследуя корни этого уравнения ( $p_1, p_2, p_3, p_4$ ) можно сделать вывод об устойчивости САР. Либо, для упрощения, воспользоваться критерием Рауза-Гурвица [3].

В заключение следует отметить, что вышеприведенный анализ выполнен на основе уравнения (2), которое является дифференциальным уравнением обычного ПД-регулятора. При введении в алгоритм электронного регулятора последовательного интегрального звена, как показано в работе [5], следует учесть, что его уравнение будет иметь вид:

$$T_p^2 p^2 x + T_K p x = -T_r p \varphi - \varphi + T_K p \alpha_p + \delta_z \alpha_p. \quad (10)$$

Важно, что такое изменение одного из исходных уравнений не приводит к изменению вида общих уравнений (7)-(9). По сравнению с системой (6), изменяются лишь некоторые их коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= A_1 T_K + A_0 T_p^2 + B_1 T_r; \\ a_1 &= A_0 T_K + B_1 + B_0 T_r; a_0 = B_0; \\ b_2 &= B_1 T_K; b_1 = B_1 \delta_z + B_0 T_K; b_0 = B_0 \delta_z; \\ c_1 &= C_0 T_K; c_0 = 0; d_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

#### **Выводы:**

1. Получено дифференциальное уравнение движения САР дизеля без наддува с аккумуляторной топливной аппаратурой. Уравнение имеет четвертый порядок и может быть использовано для моделирования переходных процессов, вызванных внешними возмущениями.

2. Выведено характеристическое уравнение исследуемой САР, которое может использоваться для анализа ее устойчивости и оптимизации быстрого действия.

#### *Литература*

1. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО “КЖИ “За рулем”, 2004.— 480 с.
2. Прохоренко А.А. Дифференциальное уравнение электронного регулятора для дизеля с аккумуляторной топливной системой / Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. - № 5.- С. 193 – 199.
3. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания./ М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.
4. Прохоренко А.А. Дифференциальное уравнение динамики дизеля с аккумуляторной системой топливоподачи как объекта регулирования / Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», №2, 2011. СС. 81-86.
5. Прохоренко А.А. Прецизионный электронный регулятор для дизеля с аккумуляторной топливной системой / Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», №1, 2012. СС. 81-86.