

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.436.001

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЯ ОТКЛЮЧЕНИЕМ-ВКЛЮЧЕНИЕМ ЦИКЛОВ

**Н.Н. Патрахальцев, Д.К. Гришин,
М.В. Эммиль, Б.А. Корнев**

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 115093

В статье рассмотрена проблема управления работой многоцилиндрового дизеля изменением числа рабочих циклов на режимах малых нагрузок и холостых ходов.

Ключевые слова: дизель, режимы работы, малые нагрузки, отключение цилиндров, изменение рабочего объема.

Эксплуатационная топливная экономичность дизеля в значительной части определяется экономичностью режимов малых нагрузок и холостых ходов. Доля их во всем моторесурсе весьма значительна. Так, коэффициенты загрузки автотракторных дизелей составляют 0,6—0,5, а тепловозных доходят до 0,3—0,2. Важность этих режимов подтверждается также тем, что в Европейском ездовом цикле, свойственном эксплуатации транспорта в современных мегаполисах, доля таких режимов составляет 30%. Повышенные удельные расходы топлива на таких режимах существенно снижают эффективность производимой работы, повышают стоимости перевозок, а в конечном итоге и стоимость продукции и т.д.

Одним из методов повышения топливной экономичности таких режимов является метод регулирования двигателя отключением части цилиндров [1]. Благодаря повышению нагрузки в оставшихся в работе (активных) цилиндрах растет удельная топливная экономичность двигателя. Недостатками большинства топливных систем, реализующих этот метод, является невозможность варьирования номерами отключаемых цилиндров, а также кратковременного отключения цилиндров, вплоть до времени одного цикла. Целесообразность отключения-включения отдельных циклов связана с тем, что в этом случае топливную аппаратуру

дизеля можно превратить в однорежимную по нагрузке, т.е. работающую с максимальной эффективностью, максимальным качеством топливоподач. Правда, в этом случае поддержание установившихся режимов, не кратных по нагрузке отношению полной нагрузки к числу цилиндров, приходится проводить путем чередования разгонов-выбегов с заданной неравномерностью вращения вала, что и определяет необходимость использования систем отключения-включения циклов, например, разработанных в РУДН [2. С. 244—249]. Такие режимы превращаются в условно установившиеся. Их реализация сопровождается переходными процессами в системе топливоподачи, особенно существенными в системах разделенного типа (насос — трубопровод — форсунка). Эти переходные процессы необходимо учитывать при математическом моделировании таких режимов либо устранять их с помощью соответствующих технических средств. Одним из них является система регулирования начального давления (РНД) топлива в трубопроводе высокого давления ($P_{нач}$) [3. С. 202—243].

При указанных неустановившихся режимах разгонов-выбегов дизеля, оснащенного топливной системой (ТС) разделенного типа, когда происходит изменение от цикла к циклу частоты вращения вала двигателя, в линии высокого давления (ЛВД) ТС происходит переходный процесс изменения начального и остаточного давлений. Эти переходные процессы связаны с тем, что начальные (остаточные) давления в линиях высокого давления зависят от частоты вращения, т.е. $P_{ост} = P_{нач} = f(n)$ (при указанном выше постоянстве положения регулирующего органа дизеля: $h_p = const$). Как и при установившихся режимах, начальное давление очередного i -го цикла топливоподачи равно остаточному давлению $i - 1$ -го предыдущего цикла, который протекал при других n , а следовательно, имел другие значения $P_{нач}$ и $P_{ост}$. Функциональная схема САР в этом представлении приведена на рис. 1.

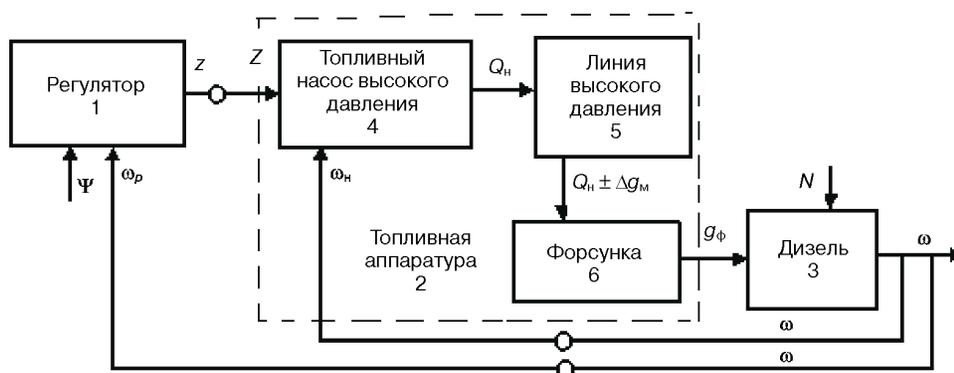


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования дизеля без наддува, но с учетом п.п. в топливной аппаратуре:

1 — регулятор частоты вращения; 2 — топливная аппаратура; 3 — дизель; 4 — топливный насос высокого давления; 5 — линия высокого давления; 6 — форсунка закрытого типа; ω , ω_n , ω_p — угловые скорости вращения вала дизеля, кулачкового вала насоса и вала регулятора; Ψ — сигнал управления регулятором; z — смещение муфты регулятора; Z — число активных циклов; Q_n — подача топлива насосом высокого давления; g_ϕ — цикловая подача топлива форсункой; Δg_m — количество топлива, поступающего из объема, аккумулированного в ЛВД при его разрядке, или оставшегося в ЛВД при его зарядке до повышенного $P_{нач}$; N — нагрузка на дизель

Входными координатами двигателя являются настройка регулятора ψ и нагрузка N . Выходная координата двигателя ($\omega = \pi \cdot n / 30$) является одновременно входной координатой регулятора и топливного насоса, так как

$$\omega_p = u_\omega \cdot \omega; \quad \omega_n = u_n \cdot \omega, \quad (1)$$

где u_z, u_ω, u_n — постоянные передаточные отношения механизмов связи, (обозначены на функциональной схеме кружком).

Регулятор перемещением z своей муфты, связанной с чувствительным элементом, воздействует на орган управления дизелем $Z = u_z \cdot z$.

В соответствии со схемой рис. 1 цикловые подачи топлива насосом (Q_n) и форсункой (g_ϕ) не равны, так как часть топлива в количестве $\pm \Delta g_m$ либо аккумулируется в магистрали (ЛВД), заряжает ее, либо дополнительно поступает в форсунку из-за разрядки ЛВД, т.е. в зависимости от вида характеристики $P_{нач} = f(n)$ происходит либо зарядка ЛВД до более высокого $P_{нач}$, либо ее разрядка до более низкого уровня $P_{ост}$ и соответственно уменьшение или увеличение подачи топлива форсункой. Очевидно, что изменение цикловых подач топлива меняет и крутящие моменты, развиваемые двигателем в данном НУР.

Все математические модели движения системы «двигатель—потребитель» основаны на решении уравнения динамического равновесия системы, которое имеет следующий вид:

$$I_{уст} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e(t) - M_c(t). \quad (2)$$

При моделировании режима получают зависимость протекания n как функции времени t . Тогда уравнение имеет вид

$$I_{д.уст} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = M_e(n) - M_c(n), \quad (3)$$

где $I_{уст}$ — момент инерции подвижных деталей двигателя и всех механизмов, имеющих механическую связь с ним, приведенный к оси коленчатого вала; $\frac{dn}{dt}$ — ускорение вращения вала; $M_e(n)$ — вращающий момент двигателя, являющийся функцией частоты вращения (при постоянстве положения регулирующего органа); $M_c(n)$ — момент сопротивления (нагрузки), являющийся функцией частоты вращения.

Момент сопротивления $M_c(n)$ определяется в виде

$$M_c(n) = f_2(n, N, t), \quad (4)$$

где N — положение органа задания нагрузки на двигатель.

С учетом переходного процесса в ТА, когда функциональная схема САР дизеля соответствует схеме (см. рис. 1), функциональная зависимость момента имеет вид

$$M_e = f(n, Z, P_{нач}). \quad (5)$$

При установившемся режиме

$$M_e(n) = M_c(n), \quad (6)$$

а с появлением неустановившегося режима с учетом (6) получаем

$$I_{\text{д.уст.}} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = \Delta M_e - \Delta M_c. \quad (7)$$

После разложения в ряд Тейлора, линеаризации и очевидных преобразований получаем выражение для изменения крутящего момента дизеля:

$$\Delta M_e = \frac{\partial M_e}{\partial n} \cdot \Delta n + \frac{\partial M_e}{\partial Z} \cdot \Delta Z + \frac{\partial M_e}{\partial P_{\text{нач}}} \cdot \left(\frac{\partial P_{\text{нач}}}{\partial n} \cdot \Delta n \right), \quad (8)$$

$$\Delta M_c = \frac{\partial M_c}{\partial n} \cdot \Delta n + \frac{\partial M_c}{\partial N} \cdot \Delta N. \quad (9)$$

Динамическое уравнение равновесия системы «двигатель—потребитель» принимает вид

$$I_{\text{уст.}} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{\partial M_e}{\partial n} \cdot \Delta n + \frac{\partial M_e}{\partial Z} \cdot \Delta Z + \frac{\partial M_e}{\partial P_{\text{нач}}} \cdot \frac{\partial P_{\text{нач}}}{\partial n} \cdot \Delta n - \frac{\partial M_c}{\partial n} \cdot \Delta n - \frac{\partial M_c}{\partial N} \cdot \Delta N. \quad (10)$$

Введем понятия динамического фактора устойчивости двигателя и динамической постоянной времени двигателя соответственно:

$$F'_g = \left(\frac{\partial M_c}{\partial n} - \frac{\partial M_e}{\partial n} - \frac{\partial M_e}{\partial P_{\text{нач}}} \cdot \frac{\partial P_{\text{нач}}}{\partial n} \right); \quad (11)$$

$$T'_g = \frac{I_{\text{уст.}} \cdot n_0}{K_{MZ} \cdot Z_0}. \quad (12)$$

Используя понятия динамических коэффициентов самовыравнивания и усиления по нагрузке получаем

$$K'_g = \frac{F'_g \cdot n_0}{(K_{MZ}) \cdot Z_0}, \quad (13)$$

$$\Theta'_g = \frac{K_{M_c N} \cdot N_0}{(K_{MZ}) \cdot Z_0}, \quad (14)$$

где $K'_{MZ} = \frac{\partial M_e}{\partial Z}$ — фактор влияния на крутящий момент дизеля изменения количества активных цилиндров, $K_{M_c N} = \frac{\partial M_c}{\partial N}$ — фактор влияния изменения нагрузки, а Z_0 — начальное количество активных цилиндров.

Введя относительные параметры $\phi = \frac{\Delta n}{n_0}$; $\varphi_g = \frac{\Delta Z}{Z_0}$ и $\alpha_g = \frac{\Delta N}{N_0}$, получаем

дифференциальное уравнение двигателя (без наддува или с механическим наддувом, или специальными системами наддува типа «Комплекс», регистрового и т.д.) с учетом переходного процесса в ТС (как элемента САР):

$$T'_g \cdot \frac{d\phi}{dt} + K'_g \cdot \phi = \varphi_g - \Theta'_g \cdot \alpha_g. \quad (15)$$

Для построения переходного процесса элемента САР должен быть найден общий интеграл дифференциального уравнения элемента. При условии постоянства внешней нагрузки ($\alpha_g = 0$) переходный процесс двигателя ($\phi = f(t)$) может быть вызван в момент времени $t = 0$ мгновенным изменением числа активных цилиндров Z ($\varphi = \varphi_0 = \text{const}$). В этом случае уравнение (15) получает вид

$$T'_g \cdot \frac{d\phi}{dt} + K'_g \cdot \phi = \varphi_0. \quad (16)$$

Решение этого неоднородного уравнения как сумма общего решения однородного и частного решения неоднородного уравнений имеет вид

$$\phi = \left(\varphi_0 / K'_g \right) \cdot \left(1 - e^{-(K'_g / T'_g) t} \right). \quad (17)$$

Характеристики возможных видов переходных процессов представлены на рис. 2.

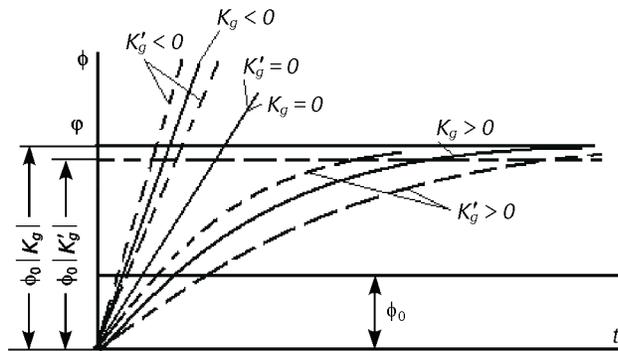


Рис. 2. Характеристики переходных процессов дизеля без наддува без учета п.п. в топливной аппаратуре (сплошные линии) и с учетом п.п. в ТА (пунктирные линии):

1 — при $K_g < 0$; 2 — при $K_g = 0$; 3 — при $K_g > 0$; 4 — $\phi_0 = \text{const}$

Таким образом, при $K'_g > 0$ — переходный процесс является аperiodическим сходящимся, при $K'_g < 0$ — переходный процесс является расходящимся, работа двигателя неустойчива. Появление расходящегося процесса и неустойчивость работы дизеля возможны из-за переходного процесса в топливной аппаратуре. Завершение этого п.п. возвращает качество сходимости процесса и восстанавливает устойчивость работы двигателя.

Таким образом, полученное дифференциальное уравнение дизеля учитывает наличие переходного процесса в топливной аппаратуре. Указанный переходный процесс может изменить такие показатели САР, как постоянная времени двигателя (время двигателя), фактор устойчивости, коэффициент самовыравнивания. Изменение этих показателей оказывает влияние на вид переходного процесса дизеля, как элемента САР. В зависимости от величины фактора влияния начального давления на крутящий момент двигателя, переходный процесс двигателя, устойчивый и сходящийся при квазистатическом представлении переходного процесса в топливной аппаратуре, может стать неустойчивым и расходящимся. Продолжительность возникшей неустойчивости определяется продолжительностью и другими параметрами переходного процесса в топливной аппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патрахальцев Н.Н., Эммиль М.В., Козлов В.И. Экспериментальное исследование дизеля В-31, оснащенного системой отключения цилиндров // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2004. — № 1. — С. 34—37.
- [2] Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания: Монография. — М.: Изд-во РУДН, 2009.

REGULATION OF DIESEL BY SWITCHING OFF — SWITCHING OF CYCLES

**N.N. Patrakhaltsev, D.K. Grishin,
M.V. Emmill, B.A. Kornev**

Department of Heat Engineering and Heat Engines
Engineering Faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Podolsk highway, 8/5, Moskow, Russia, 115093

There examined a problem of regulation of multicylinder diesel by variation of number of working cycles on regimes of low load and idle.

Key words: diesel, regimes of low load, cut-off of cylinders and cycles, variation of displacement of engine.