

А.Н. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
Б.И. КУБРИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Е.В. СОСИНА, асист., НТУ «ХПИ»;
В.Ф. ЧЕРНАЙ, канд. техн. наук, с. н. с., НТУ «ХПИ»

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА С ТУРБОКОМПРЕССОРОМ НА БАЗЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА

В статті пропонуються методика та алгоритм отримання квазіоптимальних законів керування подачею палива і повітря в циліндри дизельного двигуна при перехідних режимах його роботи, які ґрунтуються на принципі максимуму Понтрягіна.

В статье предлагаются методика и алгоритм получения квазиоптимальных законов управления подачей топлива и воздуха в цилиндры дизельного двигателя при переходных режимах его работы, основанных на принципе максимум Понтрягина.

In the article the technique and algorithm of reception quasioptimal control law by submission of fuel and air to cylinders of the dieselingine is offered at modes of its work, which are based on a Pontryagin's principle of maximum.

Постановка проблеми. В настоящее время к силовым установкам на базе дизелей предъявляются все более жесткие требования не только к топливной экономичности, но и к токсичности отработавших газов, что, в свою очередь, выдвигает повышенные требования к функциональным возможностям систем управления (СУ) этих установок.

Анализ литературы. В научных публикациях последних лет [1-7, 9] рассматриваются вопросы синтеза и анализа двумерных СУ двигателей внутреннего сгорания (ДВС), где в качестве управляющих воздействий используются выход рейки топливного насоса h_p и расход дополнительно подаваемого воздуха Q_g или h_p , а также фаза (угол опережения) впрыскивания топлива θ .

Цель работы заключается в синтезе квазиоптимальных по топливной экономичности и токсичности отработавших газов законов управления h_p , θ и Q_g дизель-генератора с газотурбинным наддувом на основе принципа максимума.

Рассмотрим в качестве примера критерий качества для СУ стационарного агрегата. Основными показателями качества переходных режимов, вызванных резкими изменениями нагрузки, являются отклонение частоты вращения от заданного уровня, длительность переходного процесса, дымность и токсичность отработавших газов, а также расход топлива на этих режимах. Дымность и расход топлива не противоречат друг другу, так как

при прочих равных условиях дымность тем больше (меньше), чем больше (меньше) расход топлива [7]. Однако отклонение частоты вращения при набросах нагрузки и длительность переходного процесса сокращаются с ростом расхода топлива, то есть в данном случае имеет место противоречие между управлением и показателями качества СУ. Для снижения дымности и расхода топлива в случае наброса нагрузки необходимо увеличивать воздушный заряд в цилиндрах двигателя, например, путем подачи дополнительного воздуха в агрегат.

Одним из факторов, существенно влияющих на расход топлива в переходных режимах и токсичность отработавших газов двигателя, является угол опережения впрыскивания топлива θ [7]. Однако здесь отсутствует однозначная зависимость между θ и указанными показателями, так как в одних случаях изменение указанного угла приводит к снижению (росту) расхода топлива и снижению (росту) содержания соединений углерода в отработавших газах дизеля и увеличению (снижению) доли соединений азота в этих газах [7], то есть наблюдается полное противоречие между управляющим воздействием и показателями качества СУ ДВС.

Следовательно, возникает задача оптимизации процесса управления. В общем виде эта задача заключается в синтезе управлений, оптимизирующих один или несколько показателей качества, с учетом требований к остальным параметрам в виде ограничений на их значения [9].

Как уже отмечалось, требования малых провалов частоты вращения и длительности переходного процесса, с одной стороны, и низкого расхода топлива, с другой стороны, и ограниченные дымность и содержание вредных токсичных компонентов в отработавших газах двигателя, с – третьей являются противоречивыми. В связи с этим критерий качества управления может быть различным. Применительно к рассматриваемому случаю можно отметить, что необходимо минимизировать как положительные, так и отрицательные отклонения угловой скорости вала от заданного значения, особенно большие по абсолютной величине. Кроме того, необходимо снизить в особенности большие расходы топлива и близкие к допустимым нормам значения токсичности отработавших газов. Поэтому представляется целесообразным и оправданным введение в критерий качества квадратов указанных показателей. Сам же этот критерий можно представить в виде аддитивного функционала.

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left\{ \left[\omega_n - \omega(t) \right]^2 + \lambda_1 h_p^2(t) + \lambda_2 v^2 \right\} dt,$$

где t_0 – момент начала переходного процесса; t_k – момент окончания переходного процесса; ω_n – номинальная угловая скорость вала; $\omega(t)$ – текущая угловая скорость в переходном режиме дизеля; $h_p(t)$ – текущее значение выхода рейки топливного насоса; v – количество токсичных

выбросов в отработавших газах дизеля; λ_1 и λ_2 – весовые коэффициенты.

Задачей оптимального управления является отыскание управлений $h_p(t)$, $Q_g(t)$ и $\theta(t)$ из области допустимых управлений U , переводящих объект регулирования из состояния X_0 в конечное состояние X_1 в течение времени $[t_0, t_k]$ и минимизирующее критерий-функционал.

Динамика объекта задана системой дифференциальных уравнений (1), (2) при начальных условиях (3–5) и обозначены ограничения в виде неравенств (6–8):

$$\begin{cases} J_k \frac{d\omega_k}{dt} = M_T - M_k, \\ J \frac{d(\omega + \xi)}{dt} = M_i - M_{II} - M_H, \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = & b_1 + b_2 h_p + b_3 Q_g + b_4 h_p Q_g + b_5 h_p^2 + b_6 Q_g h_p^2 + \\ & + \beta_1 \theta + \beta_2 h_p \theta + \beta_3 Q_g \theta + \beta_4 \theta^2 + \beta_5 Q_g \theta^2 + \beta_6 h_p \theta^2; \end{aligned}$$

$$\frac{d\omega_k}{dt} = b_7 + b_8 Q_g + b_9 Q_g h_p + b_{10} Q_g^2 + b_{11} Q_g^2 h_p + b_{12} h_p; \quad (2)$$

$$\omega_{(0)} = \omega_n, \quad \omega_k(0) = \omega_{ki}, \quad \theta_{(0)} = \theta_{ki}; \quad (3)$$

$$0 < h_p \leq h_{p \max}; \quad (4)$$

$$0 < Q \leq Q_{g \max}; \quad (5)$$

$$0 < \theta \leq \theta_{\max}. \quad (6)$$

В фазовом пространстве $X(\omega, \omega_k)$ движения объекта даны две точки X_0 и X_1 и требуется из всех допустимых управлений $h_p(t)$, $Q_g(t)$, $\theta(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, переводящих изображающую точку из положения X_0 в положение X_1 , выбрать такое, которое придает функционалу минимально возможное значение.

Для оптимальности (в смысле минимума критерия-функционала)

процесса $h_p(t)$, $Q_g(t)$, $\theta(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, необходимо существование такой константы $\Psi \leq 0$ и такого нетривиального решения $\Psi(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$ системы

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = -\frac{dH[\Psi, X(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{dX_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

что для любого момента t выполнено условие максимума.

Так

$$\max H[\psi(t), x(t), h_p(t), \theta(t), Q_g(t)] \equiv 0, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad h_p, \theta, Q_g \in U, \quad (9)$$

где

$$H(\Psi, X, h_p, Q, \theta) = \sum_{i=0}^n \Psi_i f_i(X, h_p, Q_g, \theta) \quad (10)$$

Ψ_i – сохраненная переменная; f_i – уравнение движения объекта регулирования; H – гамильтониан (оператор набла); n – количество уравнений объекта регулирования.

Условие равенства нулю максимума гамильтониана (9) справедливо для рассматриваемого объекта регулирования, поскольку система уравнений консервативная, время окончания переходного процесса не задано и подынтегральная функция критерия-функционала консервативная. Тогда система уравнения (7), (9), (10) гамильтониана имеет такую форму

$$\begin{aligned} H\{\psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)\} = & \psi_0 f_0(x, u) + \psi_1 [b_1 + \\ & + b_2 h(p) + b_3 Q_g(t) + b_4 Q_g(t) h_p(t) + b_5 h_p^2 + b_6 Q_g(t) h_p^2(t)] + \\ & + \psi_2 [b_7 + b_8 Q_g(t) + b_9 Q_g(t) h_p(t) + b_{10} Q_g(t) + b_{11} Q_g^2(t) h_p(t) + \\ & + b_{12} h_p(t)] + \psi_3 [\beta_1 \theta(t) + \beta_2 h_p(t) \theta(t) + \beta_3 Q_g(t) \beta_4 \theta^2(t) + \\ & + \beta_5 Q_g(t) \theta^2(t) + \beta_6 Q_g(t) \theta^2(t)], \end{aligned} \quad (11)$$

где f_0 – подынтегральная функция критерия-функционала; u – управление.

В уравнении (11) кроме управлений $h_p(t)$, $Q_g(t)$ и $\theta(t)$ неизвестными являются также $\Psi_1(t)$ и $\Psi_2(t)$, так как сопряженное уравнение

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = -\sum \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \Psi_k, \quad (i = \overline{0, n}, t_0 < t < t_1)$$

однородно относительно Ψ_i и можно произвольным образом выбрать константу в уравнении:

$$\Psi_0(t) = \text{const} \leq 0, \quad (t_0 \leq t \leq t_1).$$

Принимаем $\Psi(t) = -1$.

Для решения уравнения (11) относительно неизвестных $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$ и Ψ_3 и получения уравнений, из которых можно найти оптимальные

величины $h_p(t)$, $Q_g(t)$, $\theta(t)$, воспользуемся следующим положением принципа максимума: если точка $u(t)$ является внутренней точкой области управления u , то для выполнения условия максимума (9) необходимо равенство нулю следующих частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial h_p} &= 0; \\ \frac{\partial H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial Q_g} &= 0; \\ \frac{\partial H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial \theta} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Систему уравнений (12) с учетом (11) представим в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H[\psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial h_p} &= \psi_0 \frac{\partial f_0(x, u)}{\partial h_p} + \\ &+ \psi_1(t)[b_2 + b_4 Q_g(t) + 2b_5 h_p(t) + 2b_6 Q_g(t) h_p(t)] + \\ &+ \psi_2(t)[b_9 Q_g(t) + b_{11} Q_g^2(t) + b_{12}] + \psi_3(t)[\beta_2 \theta(t) + \beta_6 \theta^2(t)] = 0 \\ \frac{\partial H[\psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial Q_g} &= \psi_0 \frac{\partial f_0(x, u)}{\partial Q_g} + \\ &+ \psi_1(t)[b_3 + b_4 h_p(t) + b_6 h_p^2(t)] + \psi_2(t)[b_8 + b_9 h_p(t) + \\ &+ 2b_{10} Q_g(t) + 2b_{11} h_p Q_g] + \psi_3(t)[\beta_3 \theta(t) + \beta_5 \theta^2(t)] = 0; \\ \frac{\partial H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)]}{\partial \theta} &= \Psi_0 \frac{\partial f(x, u)}{\partial \theta} + \\ &+ \Psi_3(t)[\beta_1 + \beta_2 h_p(t) + \beta_3 Q_g(t) + 2\beta_4 \theta(t) + 2\beta_5 Q_g \theta(t) + \\ &+ 2\beta_6 h_p(t) \theta(t)] = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение (11) и система (13) образуют систему 4 уравнений, которые надо решать относительно трех неизвестных $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$, $\Psi_3(t)$. В результате получим некоторую функцию вида

$$F[x(t), h_p(t), Q_g(t), \theta(t)] = 0. \quad (14)$$

Это равенство определяет необходимое условие оптимальности управления.

Поскольку приращения момента M_n нагрузки, вызывающие переходный процесс, различны по величине, а основные показатели рабочего процесса дизеля (мощность, частота вращения и др.) во время переходного

процесса зависят от времени, то и оптимальные управляющие воздействия должны быть функциями момента нагрузки и времени, т.е. $h_p = h_p(t, M_n)$; $Q_g = Q_g(t, M_n)$; $\theta = \theta(M_n, t)$. Координаты точки состояний объекта регулирования $x(t)$ определяются значениями $\omega(t)$ и $\omega_k(t)$. С учетом этого выражение (8) можно записать следующим образом:

$$F[\omega(t), \omega_k(t), h_p(t, M_n), Q_g(t, M_n), \theta(t, M_n), M_n] = 0. \quad (15)$$

Управление (15) является решением задачи вычисления оптимальных управляющих воздействий. Это значит, что в любой точке фазового пространства можно определить такие управляющие воздействия $h_p(t, M_n)$, $Q_g(t, M_n)$, $\theta(t, M_n)$, принадлежащие области управлений U , $t_0 \leq t \leq t_k$, при которых выполняется равенство (15). Согласно *принципу максимума* таких сочетаний управляющих воздействий h_p , θ , Q_g будет несколько.

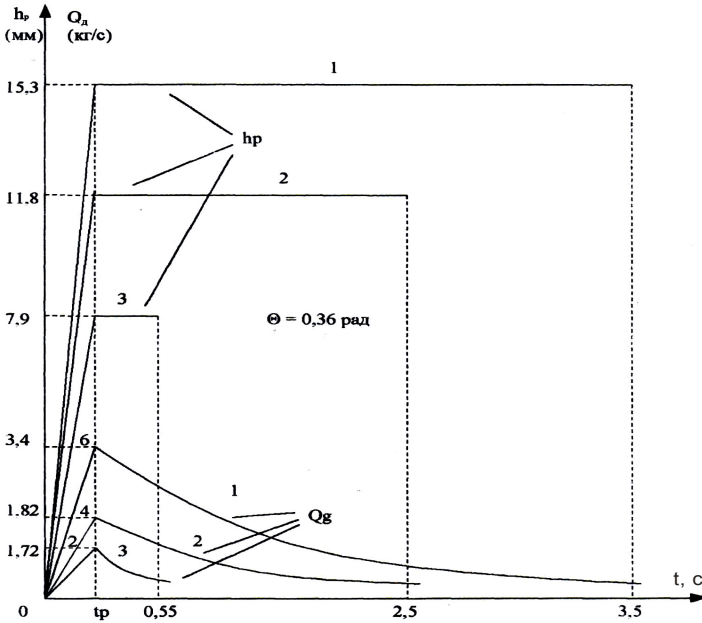


Рисунок 1 – Оптимальные зависимости $h_p(t)$ и $Q_g(t)$ при набросе нагрузки:

1 – $M_H = M_{HH}$; 2 – $M_H = 0,75M_{HH}$; 3 – $M_H = 0,5M_{HH}$.

Задачу определения оптимальных законов управления фазой и количеством подаваемого топлива, а также массой дополнительно подаваемого воздуха решали с помощью компьютера.

В результате расчета квазиоптимальных управлений получены траектории $h(t)$, $Q_g(t)$, $\theta(t)$ для агрегата Д80, приведенные на рис. 1 – 4.

Результаты натурных испытаний одноцилиндрового агрегата Д80, проведенные на ГП «Завод имени Малышева», подтвердили правильность теоретического анализа. При этом максимальное отклонение расчетных и экспериментальных траекторий $h_p(t, M_n)$, $\theta(t, M_n)$, $Q_g(t, M_n)$ не превышает 10%, что вполне приемлемо в рамках решаемой задачи.

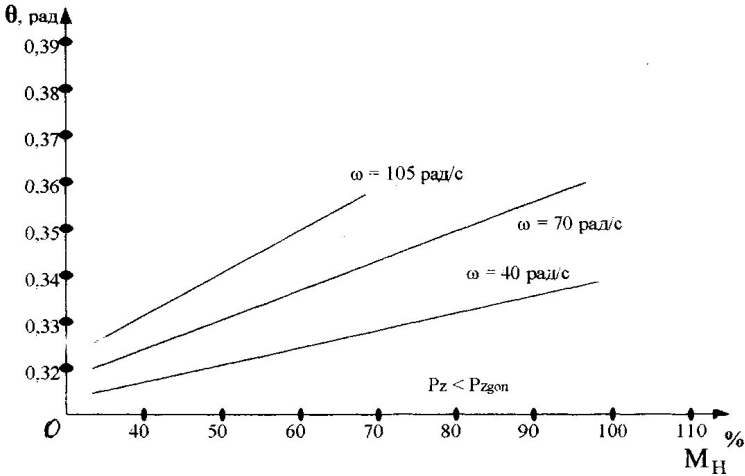


Рисунок 2 – Оптимальные зависимости $\theta(\omega)$ при $M_H = const$ и $P_z < P_{zdon}$.

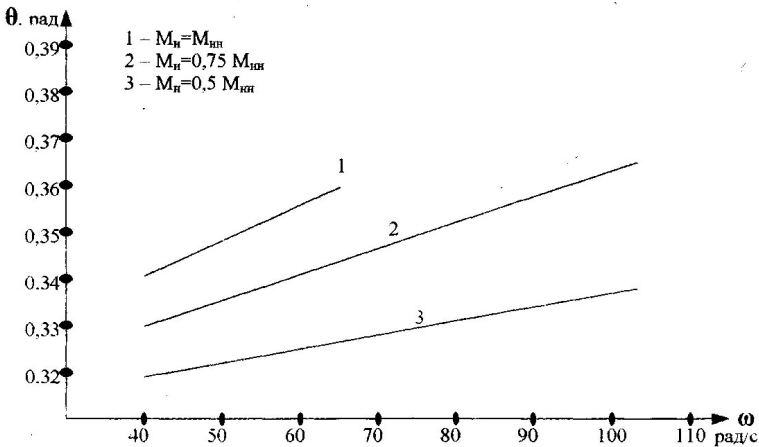


Рисунок 3 – Оптимальная зависимость $\theta(M_H)$ при $\omega = const$.

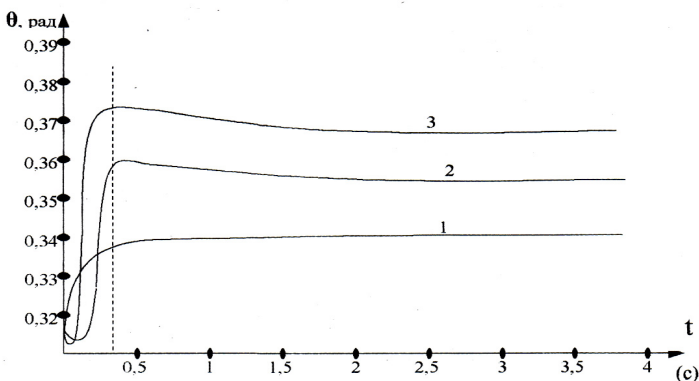


Рисунок 4 – Оптимальная зависимость при $\theta(t)$ при $P_Z < P_{Z_{дон}}$.

Выводы. Полученные результаты показывают, что близкие к желаемым законы управления топливopодачей и воздуxоснабжением реального объекта могут быть достигнуты при оснащении его соответствующими электронными средствами. При наличии же только штатной гидромеханической системы реализация указанных законов невозможна.

Перспективы дальнейших исследований. Дальнейшие исследования должны быть направлены на реализацию квазиоптимальных управлений по топливopодаче и воздуxоснабжению многоцилиндровых дизель-генераторов по замкнутому алгоритму, предусматривающему возможность текущего контроля фактических значений h_p , θ и Q_g в переходных режимах.

Представляется также целесообразным учет возможной неравномерности загрузки дизеля и его текущего технического состояния при формировании квазиоптимальных управлений $h_p(t, M_n)$, $\theta(t, M_n)$, $Q_g(t, M_n)$, что в свою очередь, требует создания многофункциональной информационно-измерительной системы.

Список литературы: 1. Marine application of emission methods law speed diesel engines/Grohe Ote//Hansa.-1990.-127,№22. – С.1526-1530. Англ. 2. Котиков Ю.Г., Горев А.Э., Блякинштейн Н.М. Цифровые системы автоматического управления силовыми установками автомобилей с дизельными двигателями (обзор). //Двигателестроение, – №4, – 1985. 3. Итоги науки и техники. Двигатели внутреннего сгорания. Т.4. В.А. Лурье, В.А. Мангушев, И.В. Маркова, Б.Я. Черняк. – М.:1985 – 284с. 4. Пинский Ф.И., Мельдзин Н.Х. Структурные особенности электронных адаптивных систем управления дизелем. //Двигателестроение. – 1988, – №6, – С.14-16. 5. Пинский Ф.И. Оптимизация режима работы дизелей электронным управлением впрыска топлива. – Автореф. дис. доктора техн. наук. – Харьков, М., 1987. – 32с. 6. Долгих И.Д. Разработка систем автоматического непрерывно дискретного регулирования транспортных дизелей. – Автореф. дис. доктора техн. наук. – Харьков, ХИИТ, 1993. – 47с. 7. Лиханов В.А., Сайкин А.М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – М.:ВО АГРОПРОМИЗДАТ, 1991 – 208с. 8. Атаке М., Фалб П. Оптимальное управление. – М.: Машиностроение, -1968. – 764с. 9. Борисенко А.М. Теория и практика компьютеризованных информационно-вимірвальних систем для управління та діагностики дизель-генераторів: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора техн. наук/ Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2010. – 31с.

Поступила в редколлегию 20.04.2012