

УДК 629.424.3:621.314.12

А. Н. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук

Е. Е. Светличная

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРА

*В статье решаются вопросы повышения технико-экономических показателей автономной дизель электрической станции в эксплуатационных режимах, связанных с резкими изменениями мощности нагрузки за счет оптимизации управляющих воздействий по принципу максимума.*

*У статті вирішуються питання підвищення техніко-економічних показників автономною дизель електричної станції в експлуатаційних режимах, пов'язаних з різкими змінами потужності навантаження за рахунок оптимізації дій, що управляють, за принципом максимуму.*

### Постановка проблемы

Автономные дизель-электрические станции мощностью 1000-5000кВт достаточно широко распространены во многих отраслях народного хозяйства страны, прежде всего, в связи с простотой их эксплуатации, обслуживания и мобильностью. Большинство технико-экономических показателей таких установок зависит от законов управления дизельного двигателя, являющегося их основой. Формирующиеся при этом управляющие воздействия должны обеспечивать требуемый критерий качества.

Анализ литературы показывает, что близкие к оптимальным управлениям в ряде случаев удается реализовать на двигателях транспортного назначения [1,5,6,7,8]. На стационарных же дизель-генераторах, используемых в качестве электростанций, это осуществить гораздо сложнее, особенно при резких набросах полной нагрузки [1,9,10].

### Основная часть

**Цель статьи** – на основе принципа максимума Понтрягина определить квазиоптимальные по расходу топлива, частоте вращения и токсичности выпускных газов двигателя, управляющие воздействия дизель-генератора в переходных режимах его работы. При резких изменениях момента нагрузки на его валу, вызванных подключением потребителей электроэнергии.

Согласно работе [1], математическая модель стационарного дизель-генератора имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = & b_1 + b_2 h_p + b_3 Q_d + b_4 h_p Q_d + b_5 h_p^2 + b_6 Q_d h_p^2 + \beta_1 \theta + \beta_2 h_p \theta + \\ & + \beta_3 Q_d \theta + \beta_4 \theta^2 + \beta_5 Q_d \theta^2 + \beta_6 h_p \theta^2 ; \\ \frac{d\omega_k}{dt} = & b_7 + b_8 Q_d + b_9 Q_d h_p + b_{10} Q_d^2 + b_{11} Q_d^2 h_p + b_{12} h_p \cdot \end{aligned} \quad (1)$$

где  $b_1, b_{12}, \beta_1, \beta_6$  – коэффициенты аппроксимации;

$\omega$  – угловая скорость вала дизель-генератора;

$h_p$  – координата рейки топливоподающего органа;

$Q_d$  – расход дополнительного воздуха;

$\theta$  – угол опережения топливоподачи;

$\omega_k$  – угловая скорость ротора турбокиспрессора.

При начальных условиях

$$u_{(0)} = u_n, \quad (2)$$

$$u_{k(0)} = u_{ki}, \quad (3)$$

$$u_0 = u_{ki}. \quad (4)$$

Область допустимых управлений и ограничения запишем в виде:

$$t_0 \leq t \leq t_k$$

$$0 < h_p \leq h_{p \max}, \quad (5)$$

$$0 < Q \leq Q_{д \max}, \quad (6)$$

$$0 < u \leq u_{\max}. \quad (7)$$

Для математического описания объекта надо задать закон его движения и область управлений  $U$ . Допустимым управлением является кусочно-непрерывная функция  $U(t)$ ,  $t_0 \leq t \leq t_k$  со значениями в области управлений  $U$ , непрерывная на концах отрезка  $t_0 \leq t \leq t_k$ , где она задана.

Область управлений в случае стационарного дизеля представляет собой параллелепипед, показанный на рис. 1. На основе этого формируются максимально возможные управляющие воздействия.

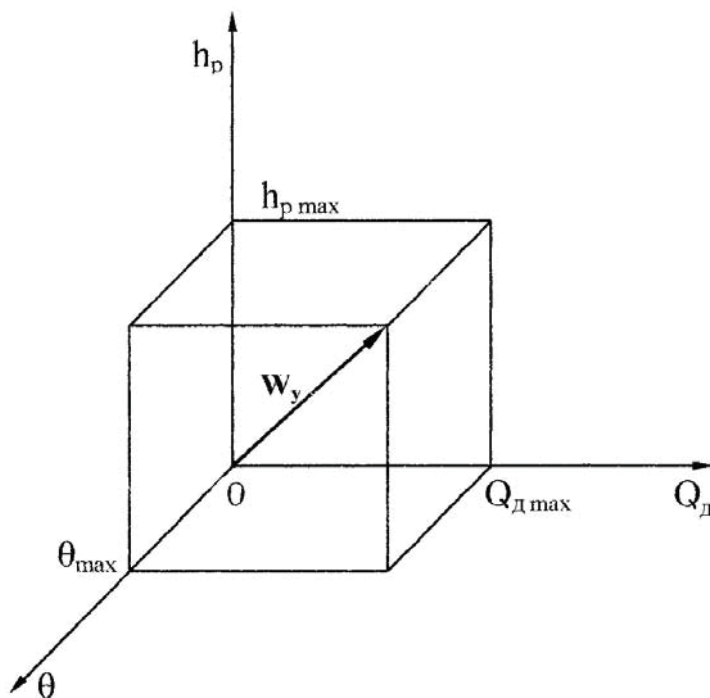


Рис.1. Вектор управления ДГ по трем координатам

Рассмотрим вначале критерий качества для системы управления СУ дизеля электростанции. 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 [2]. 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 [3].

Одним из факторов, существенно влияющих на расход топлива в переходных режимах и токсичность отработавших газов двигателя, является угол опережения впрыскивания топлива  $\theta$  [2]. Однако здесь отсутствует однозначная зависимость между  $\theta$  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 [2], то есть полное противоречие между управляющим воздействием и показателями качества СУ дизель-генератора.

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.

Как уже отмечалось, требования малых провалов частоты вращения и длительности переходного процесса, с одной стороны, 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 по модулю 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.

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left\{ [(\omega_n - \omega(t))]^2 + l_1 h_p^2(t) + l_2 v^2 \right\} dt,$$

где  $t_0$  – момент начала переходного процесса;

$t_k$  – момент окончания переходного процесса;

$\omega_n$  – 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;

$l_1$  и  $l_2$  – 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 начального состояния  $X_0$  в конечное состояние  $X_1$  в течение времени  $[t_0, t_k]$  и минимизирующее критерий-функционал.

В фазовом пространстве  $X(\omega, \omega_k)$  движения объекта даны две точки  $X_0$  и  $X_1$ ; требуется из всех допустимых управлений  $h_p(t), Q_d(t), \theta(t), t_0 \leq t \leq t_1$ , переводящих фазовую точку из положения  $X_0$  в положение  $X_1$ , выбрать такое управление, которое придает минимальное значение критерию-функционалу [3].

Динамика объекта задана системой дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях (2–4) и обозначены ограничения в виде неравенств (5–7). В фазовом пространстве  $X(\omega, \omega_k)$  движения объекта даны две точки  $X_0$  и  $X_1$  и требуется из всех допустимых

управлений  $h_p(t), Q_D(t), u(t), t_0 \leq t \leq t_1$ , 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  $h_p(t), Q_D(t), u(t), t_0 \leq t \leq t_1$ , необходимо существование такой константы  $\Psi \leq 0$  и такого нетривиального решения  $\Psi(t), t_0 \leq t \leq t_1$  системы

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

что для любого момента  $t$ , являющегося точкой непрерывности управлений  $h_p(t), Q_D(t), u(t)$ , выполнено условие максимума.

Так

$$\max H[u(t), x(t), h_p(t), u(t), Q_D(t)] \equiv 0, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad h_p, u, Q_D \in U, \quad (8)$$

$$\text{где } H(\Psi, X, h_p, Q, u) = \sum_{i=0}^n \Psi_i f_i(X, h_p, Q, u), \quad (9)$$

где  $\Psi_i$  – сопряженная 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, так как система уравнений инвариантна во времени, время окончания переходного процесса не задано и подынтегральная функция критерия-функционала инвариантна во времени. Тогда выражение для гамильтониана имеет такую форму

$$\begin{aligned} H\{u(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), u(t)\} = & w_0 f_0(x, u) + w_1 [b_1 + \\ & + b_2 h(p) + b_3 Q_D(t) + b_4 Q_D(t) h_p(t) + b_5 h_p^2 + b_6 Q_D(t) h_p^2(t)] + \\ & + w_2 [b_7 + b_8 Q_D(t) + b_9 Q_D(t) h_p(t) + b_{10} Q_D(t) + b_{11} Q_D^2(t) h_p(t) + \\ & + b_{12} h_p(t)] + \Psi_3 [\varepsilon_1 u(t) + \varepsilon_2 h_p(t) u(t) + \varepsilon_3 Q_D(t) \varepsilon_4 u^2(t) + \\ & + \varepsilon_5 Q_D(t) u^2(t) + \varepsilon_6 Q_D(t) u^2(t)], \quad (10) \end{aligned}$$

где  $f_0$  – подынтегральная функция критерия-функционала;

$u$  – управление.

В уравнении (10), кроме управлений  $h_p(t), Q_D(t)$  и  $\theta(t)$ , неизвестными являются также  $(t)$  и  $\Psi_2(t)$ , так как сопряженное уравнение

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

однородно относительно  $\Psi_i$  и можно произвольным образом выбрать константу в уравнении:

$$\Psi_0(t) = const \leq 0, (t_0 \leq t \leq t_1).$$

Принимаем  $\Psi(t) = -1$  [4].

Для решения уравнения (10) относительно неизвестных  $\Psi_1(t), \Psi_2(t)$  и  $\Psi_3$  и получения уравнений, из которых можно найти квазиоптимальные величины  $h_p(t), Q_D(t), u(t)$ , воспользуемся следующим положением принципа максимума: если точка  $u(t)$  является внутренней точкой области управления  $u$ , то для выполнения условия максимума гамильтониана (9) необходимо равенство нулю следующих частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{h_p} &= 0; \\ \frac{H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{Q_D} &= 0; \\ \frac{H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{\theta} &= 0. \end{aligned} \tag{11}$$

Систему уравнений (11) с учетом (10) представим в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{H[\psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{h_p} = \\ &= \psi_0 \frac{f_0(x, u)}{h_p} + \psi_1(t)[b_2 + b_4 Q_D(t) + 2b_5 h_p(t) + \\ &+ 2b_6 Q_D(t) h_p(t)] + u_2(t)[b_9 Q_D(t) + b_{11} Q_D^2(t) + b_{12}] + \\ &+ \psi_3(t)[\beta_2 \theta(t) + \beta_6 \theta^2(t)] = 0 \\ &\frac{H[\psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{Q_D} = \psi_0 \frac{f_0(x, u)}{Q_D} + \\ &+ u_4(t)[b_3 + b_4 h_p(t) + b_6 h_p^2(t)] + u_2(t)[b_8 + b_9 h_p(t) + \\ &+ 2b_{10} Q_D(t) + 2b_{11} h_p Q_D] + \Psi_3(t)[\epsilon_3 u(t) + \epsilon_5 u^2(t)] = 0; \\ &\frac{H[\Psi(t), x(t), h_p(t), Q_D(t), \theta(t)]}{\theta} = \Psi_0 \frac{f(x, u)}{t} + \\ &+ \Psi_3(t)[\epsilon_1 + \epsilon_2 h_p(t) + \epsilon_3 Q_D(t) + 2\epsilon_4 u(t) + 2\epsilon_5 Q_D u(t) + \\ &+ 2\epsilon_6 h_p(t) u(t)] = 0. \end{aligned} \tag{12}$$

Уравнение (10) и система (12) 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

$$F[x(t), h_p(t), Q_D(t), u(t)] = 0. \tag{13}$$

Это равенство определяет необходимое условие оптимальности управления.

Поскольку приращения момента  $M_H$  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.  $h_p = h_p(t, M_H)$ ;  $Q_D = Q_D(t, M_H)$ ;  $u = u(M_H, t)$ . Координаты точки состояний объекта

регулирования  $x(t)$  определяются значениями  $\omega(t)$  и  $\omega_k(t)$ . С учетом этого выражение (13) можно записать следующим образом:

$$F[u(t), u_k(t), h_p(t, M_H), Q_d(t, M_H), u(t, M_H), M_H] = 0. \quad (14)$$

Решение этого уравнения является решением задачи оптимального управления.

В результате расчета квазиоптимальных управлений в качестве примера получены траектории  $h(t)$ ,  $Q_d(t)$ , для серийно выпускаемого дизель-генератора Д70, показанные на рис. 2.

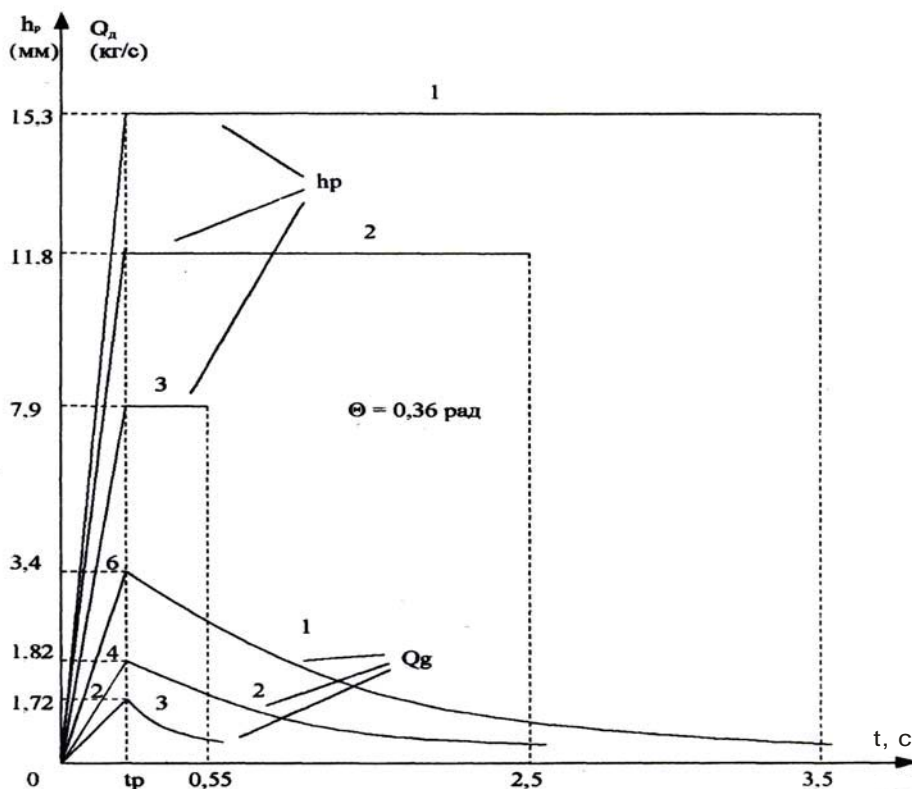
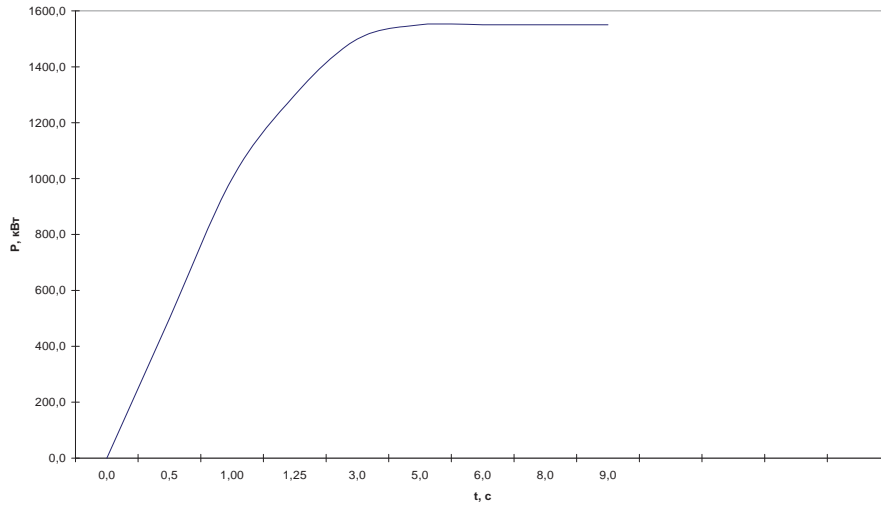


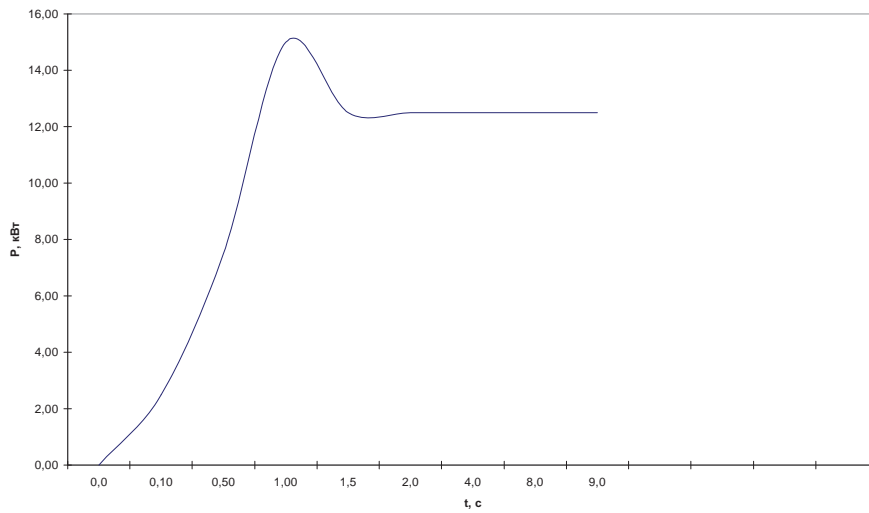
Рис. 2. Квазиоптимальные зависимости выхода рейки топливного насоса и расхода дополнительного сжатого воздуха в функции времени при различных моментах нагрузки: 1–100 %; 2–75 %; 3–50 %

Характер полученных зависимостей справедлив для любых дизелей с газотурбинным наддувом, работающих в условиях резких изменений момента нагрузки на валу.

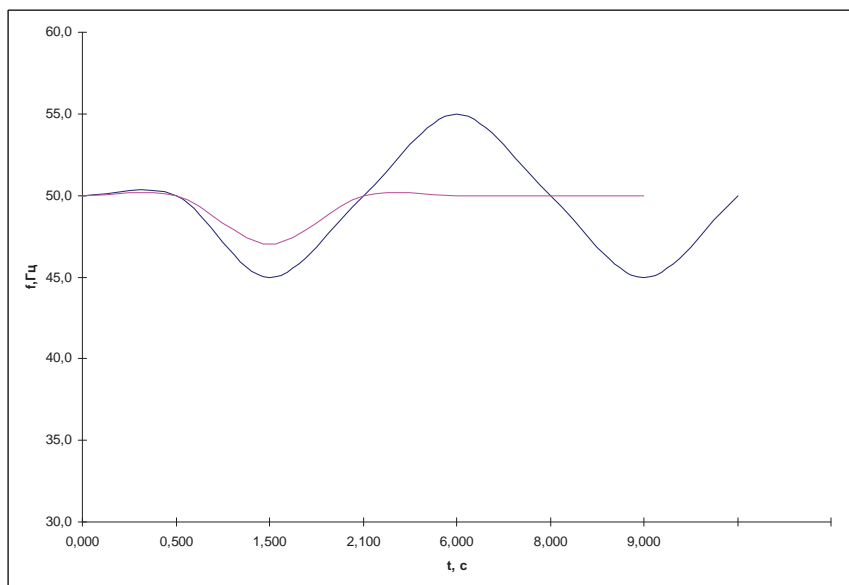
На рис. 3 приведены осциллограммы переходных процессов агрегата мощностью 2000 кВт при набросе 75% полной нагрузки, полученные на ПО «Завод имени Малышева». При этом кривая 1 соответствует приращению активной мощности, кривая 2 – перемещение рейки топливodoзирующего органа по квазиоптимальному закону, а кривая 3 – изменению частоты вырабатываемого напряжения при реализации такого закона. Здесь же кривая 4 показывает изменение частоты вырабатываемого напряжения при штатной системе регулирования агрегата. Из сравнения графиков видно, что, благодаря оптимизации закона управления дизель-генератора, существенно сокращаются отклонение частоты вырабатываемой электроэнергии от заданного значения и сокращается продолжительность переходного процесса.



а)



б)



в)

Рис. За, б, в. Осциллограммы переходных процессов агрегата мощностью 2000 кВт при набросе 75 % полной нагрузки, полученные экспериментально.



**Вывод**

Таким образом, оптимизация управлений дизель-электрической станции по топливоподаче и воздухообеспечению на основе принципа максимума позволяет повысить ее энергоэффективность.

**Список литературы**

1. Эволюционные методы компьютерного моделирования / Верлань А. Ф., Дмитриенко В. Д., Корсунов Н. И., Шорох Е. А. – К.: Наука, 1992. – 256 с.
2. Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. – М.: ВО АГРОПРОМИЗДАТ, 1991. – 208 с.
3. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1968. – 307 с.
4. Maner Georg F. Watts Robert J. On-line cylinder diagnostics on combustion engines by noncontact torque and speed measurements // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. – № 890485. – С. 123 – 130.
5. Пинский Ф. И. Оптимизация режима работы дизелей электронным управлением впрыска топлива: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: 1987. – 32 с.
6. Долгих И. Д. Разработка систем автоматического непрерывно дискретного регулирования транспортных дизелей: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук/ Харьковский институт инженеров транспорта. – Харьков, 1993. – 47 с.
7. Богаевский А. Б. Эксплуатационные характеристики тепловозных дизель-генераторов и резервы повышения их топливной экономичности/ А. Б. Богаевский // Политранспортные системы в 2-х ч. Ч.1. Новосибирск: издательство СГУПС 2009. – С. 103–106.
8. Колыбин Ю. Н. Квазиоптимальные электронные регуляторы переходных режимов стационарных дизель-генераторов с дополнительным воздухообеспечением: Автореферат дис. на соискание степени кандидата технических наук/ Харьковский политехнический институт. – Харьков, 1986. – 18 с.
9. Мельдзин Н. Х. Повышение качества управления дизель-генератором применением двухконтурной системы управления: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – М.: 1989. – 19 с.
10. Богаевский А. Б. Повышение топливной эффективности мощной транспортной дизельной установки за счет применения микроконтроллерного регулятора частоты вращения и мощности / А. Б. Богаевский // Сборник доклады, XI научно-техническая конференция с международного участия, [Транспорт, экология, устойчивое развитие], ЕкоВарна. 2005. – С. 459–463.

**INCREASE OF ENERGOEFFEKTIVNOSTI OF AUTONOMOUS  
POWER-STATION FOR ACCOUNT OF OPTIMIZATION  
OF MANAGEMENT OF DIESEL-GENERATOR**

A. N. BORISENKO, Dr. Scie. Tech., E. E. SVETLICHNAJA

*In the article the questions of increase of tekhniko-ekonomicheskikh indexes decide autonomous diesel of the electric station in the operating modes, related to the sharp changes power of loading due to optimization of managing influences on principle of maximum.*

Поступила в редакцию 04.04 2012 г.