

**А.Н. БОРИСЕНКО**, д-р техн. наук, проф., НТУ “ХПИ”;  
**В.И. РЕВУЦКИЙ**, преподаватель – стажер, НТУ “ХПИ”

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ДИЗЕЛЬ – ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ

У статті оцінено середньоквадратичну похибку реалізації квазіоптимального закону управління автономною дизель - електричною станцією при впливі декількох факторів.

В статье оценена среднеквадратическая погрешность реализации квазиоптимального закона управления автономной дизель – электрической станцией при воздействии нескольких факторов.

In the article has been rated mean square error the implementation of quasi-optimal control law autonomous diesel - power station under the influence of several factors.

**Постановка проблемы.** В последние годы получили довольно широкое распространение автономные электростанции мощностью от одной до нескольких тысяч киловатт на базе дизелей с газотурбинным наддувом, они достаточно мобильны и просты в эксплуатации и обслуживании. В то же время их технико – экономические и экологические показатели, такие, как топливная экономичность, длительность переходного процесса и отклонение частоты вырабатываемой электроэнергии от заданного значения при резких изменениях нагрузки, дымность и токсичность отработанных газов и др., существенно зависят от законов управления топливоподачей и воздухоподачей [1].

Анализ литературы показывает, что многие работы посвящены вопросам выбора и обоснования критерия качества систем регулирования дизель – генераторов, синтезу квазиоптимальных законов управления и разработке программно – аппаратных средств для их технической реализации [2]. В ряде случаев приводятся экспериментальные данные, подтверждающие правильность основных положений теоретических исследований, но точность реализации выбранного критерия качества не оценивается [3].

**Цель статьи.** Определение случайной погрешности оценки критерия – функционала и квазиоптимального закона управления по топливоподаче и воздухоподаче на примере дизель – электрической станции мощностью 2000 кВт, в которую входит агрегат типа Д70 или Д80.

Критерий-функционал, рассмотренный в [2], можно записать следующим образом [4]

$$I = \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot I_j, \quad (1)$$

где 
$$I_j = \int_0^{t_k} x_j^2(t) dt, \quad (j = \overline{1,3}) \quad (2)$$

Функционалы (2) имеют различные размерности, следовательно, различные размерности должны также иметь весовые коэффициенты  $\beta_j$ , ( $j = \overline{1,3}$ ). В связи с этим введем обозначения

$$I_j = \frac{1}{x_{j \max}^2} \int_0^{t_k} x_j^2(t) dt = \frac{I_j}{x_{j \max}^2}; \quad (3)$$

$$\beta_j = \overline{\beta}_j x_{j \max}; \quad (j = \overline{1,3}), \quad (4)$$

где  $x_{j \max}$  – максимально допустимое значение компоненты  $x_j(t)$  вектора состояния дизель – генератора (ДГ). Тогда функционал (1) принимает вид

$$I = \sum_{j=1}^3 \overline{\beta}_j^2 \cdot \overline{I}_j \quad (5)$$

причем в соотношении (5) все функционалы  $\overline{I}_j$ , ( $j = \overline{1,3}$ ) имеют одинаковые размерности, а весовые коэффициенты  $\overline{\beta}_j$ , ( $j = \overline{1,3}$ ) – безразмерные.

Обозначим через  $\overline{I}_j^*$ , ( $j = \overline{1,3}$ ) минимальные значения функционалов (3), которые имеют место при минимизации каждого из этих функционалов, тогда при фиксированных значениях весовых коэффициентов  $\overline{\beta}_j$ , ( $j = \overline{1,3}$ ) минимально возможное значение функционала (5) составляет

$$I = \sum_{j=1}^3 \overline{\beta}_j^2 \cdot \overline{I}_j^*. \quad (6)$$

Согласно работе [4] запишем

$$\bar{\beta}_j = \frac{1}{I_j^* \sum_{j=1}^3 \frac{1}{I_j^*}}, \quad (j = \overline{1,3}), \quad (7)$$

$$\beta_j = \frac{x_{j \max}}{I_j^* \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{x_{j \max}^2}{J_j^*}}, \quad (j = \overline{1,3}). \quad (8)$$

Значения функционалов (2) и  $x_{j \max}$  определим из экспериментальных данных, полученных на реальном ДГ при его натурных испытаниях. Соответствующие графики приведены на рисунке 1.

Найдем вначале

$$I_{2(1)} = \int_0^{t_k} h_p^2(t) dt, \quad (9)$$

аппроксимируя экспериментально полученную кривую 1 на рис.1 экспонентой (кривой 2 на этом же рисунке),

$$I_{2(2)} = \int_0^{t_k} h_{pm}^2 (1 - e^{-t/\tau_1})^2 dt. \quad (10)$$

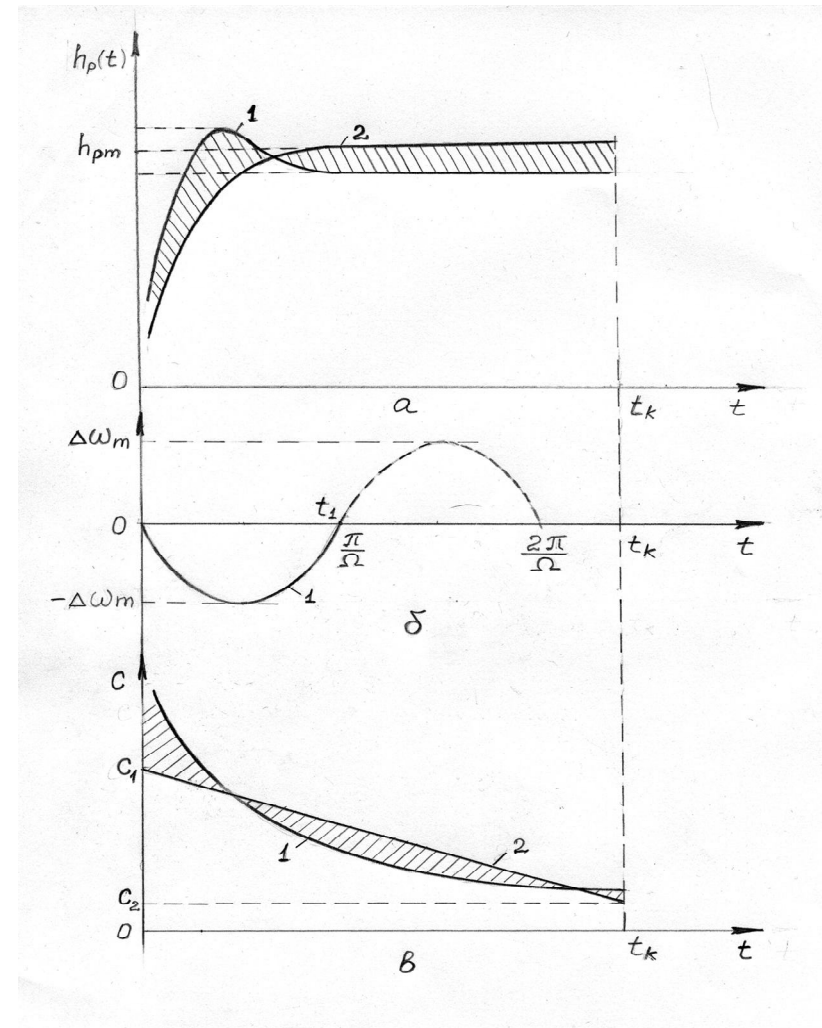


Рис. 1 - Экспериментальные (1) и аппроксимированные (2) зависимости для ДГ типа Д80: а – перемещение топливозолирующего органа в переходном режиме; б – изменение угловой скорости вала в переходном режиме; в – изменение массы выбросов сажи в переходном режиме

Постоянную времени  $\Phi$  найдем следующим образом

$$\tau_1 = \frac{t_k}{4,6},$$

а интервал времени  $[0, t_k]$  возьмем из рисунка. После соответствующих преобразований (10) получим

$$I_{2(2)} = 7,1h_{pm}^2.$$

Полагая, что функционалы (9) и (10) одинаковы, запишем

$$I_{2(1)} = I_{2(2)} = 7,1h_{pm}^2. \quad (11)$$

Определим теперь

$$I_1 = \int_0^{t_k} [\omega_n - \omega(t)]^2 dt = \int_0^{t_k} \Delta\omega^2(t) dt, \quad (12)$$

считая кривую  $\Delta\omega(t)$  полувошной синусоиды, получаем

$$\Delta\omega(t) = -\Delta\omega_m \sin \Omega t,$$

где  $\Omega = \frac{\pi}{t_1}$  – угловая частота упомянутой выше синусоиды.

Поскольку при  $t > t_1$   $\Delta\omega(t) = 0$ , то верхний предел в функционале (12) заменим на  $t_1$  и после соответствующей подстановки запишем

$$I_1 = \int_0^{t_1} \Delta\omega_m^2 \sin^2 \Omega t dt = \int_0^{\frac{p}{\Omega}} Du_m^2 \sin^2 \Omega t dt \quad (13)$$

Согласно [5] после соответствующих преобразований (13) получим

$$I_1 = \frac{\Delta\omega_m^2 \cdot \Omega}{2}. \quad (14)$$

Рассмотрим функционал

$$I_3 = \int_0^{t_k} v^2(t) dt, \quad (15)$$

считая, что основную часть вредных токсичных компонентов в отработанных газах (ОГ) составляет углерод С (сажа). Для упрощения расчетов аппроксимируем кривую 1 на рис. 1 в кривую 2.

Тогда вместо функционала (15) запишем

$$I_{3(2)} = \int_0^{t_k} C^2(t) dt, \quad (16)$$

где  $C(t) = K_c t + C_2$ ,  $K_c = \frac{C_2 - C_1}{t_k}$ .

Функционал (16) можно представить в виде

$$\begin{aligned} I_{3(2)} &= \int_0^{t_k} (K_c t + C_2)^2 dt = \int_0^{t_k} K_c^2 t^2 dt + 2 \int_0^{t_k} K_c C_2 t dt + \int_0^{t_k} C_2^2 dt = \\ &= \frac{K_c^2 t_k^3}{3} + K_c C_2 t_k^2 + C_2^2 t_k \end{aligned} \quad (17)$$

Получим значения функционала (2) с учетом (17), (14), (10) и имеющихся экспериментальных данных, согласно которым при набросе 75% нагрузки  $h_{pm} = 85$  мм;  $\Omega = 2,72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\Delta\omega_m = 1,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $C = 0,45 \frac{\text{мг}}{\text{л}}$ ;  $\bar{I}_1 = 7,1$ ;  $\bar{I}_2 = 0,8$ ;  $\bar{I}_3 = -4,84$ .

Найдем теперь весовые коэффициенты  $\beta_j$  согласно формуле

(9)

$$\bar{\beta}_1 = \frac{1}{\bar{I}_1 \cdot \left( \frac{1}{\bar{I}_1} + \frac{1}{\bar{I}_2} + \frac{1}{\bar{I}_3} \right)} = 1,055;$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{1}{\bar{I}_2 \cdot \left( \frac{1}{\bar{I}_1} + \frac{1}{\bar{I}_2} + \frac{1}{\bar{I}_3} \right)} = 0,119;$$

$$\bar{\beta}_3 = \frac{1}{\bar{I}_3 \cdot \left( \frac{1}{\bar{I}_1} + \frac{1}{\bar{I}_2} + \frac{1}{\bar{I}_3} \right)} = -0,18.$$

Принимая во внимание найденные  $\overline{\beta}_1, \overline{\beta}_2, \overline{\beta}_3$ , функционал (1) можно записать следующим образом

$$I = 0,66I_1 + 1,96I_2 + 0,16I_3. \quad (18)$$

После подстановки в (18) выражений (17), (14) и (10) получим

$$I = 0,9(\Delta\omega_m)^2 + 13,9h_{pm}^2 + 0,8C_2^2 + 0,416 \quad (19)$$

$$\text{или} \quad I = R_\omega + R_{hp} + R_c, \quad (20)$$

где  $R_\omega = 0,9(\Delta\omega_m)^2$ ;

$$R_{hp} = 13,9h_{pm}^2;$$

$$R_c = 0,8C_2^2 - 2,5C_2 + 0,416.$$

Далее найдем коэффициенты чувствительности [6,7] для номинального режима работы ДГ

$$\frac{\partial R_\omega}{\partial \omega} = 2,34 \text{ рад/с}; \quad \frac{\partial R_{hp}}{\partial h_p} = 2,36 \text{ м};$$

$$\frac{\partial R_c}{\partial C_2} = 1,78 \text{ мг/л}. \quad (21)$$

Предполагая, что погрешности измерения  $\omega$ ,  $h_p$  и  $C$  распределены по нормальному закону, с учетом [4, 6, 8], можно записать выражения для среднеквадратических отклонений

$$\sigma_\omega = \frac{\overline{\Delta\sigma}}{3} = 0,166\%;$$

$$\sigma_{h_p} = \frac{\overline{\Delta h_p}}{3} = 0,333\%; \quad \sigma_c = \frac{\overline{\Delta C}}{3} = 1\%, \quad (22)$$

где  $\overline{\Delta\omega}$  – предельная относительная погрешность измерения угловой скорости;

$\overline{\Delta h_p}$  – предельная относительная погрешность измерения координаты топливodoзирующего органа;

$\overline{\Delta C}$  – предельная относительная погрешность массы сажи в ОГ.

Считая  $\sigma_\omega$ ,  $\sigma_{h_p}$  и  $\sigma_c$  некоррелированными, найдем для номинального режима среднеквадратическую ошибку реализации критерия-функционала [3, 4].

$$\sigma_I = \left[ \left( \frac{\partial R_\omega}{\partial \omega} \cdot \frac{\sigma_\omega}{\Delta\omega_m} \right)^2 + \left( \frac{\partial R_{hp}}{\partial h_p} \cdot \frac{\sigma_{h_p}}{h_{pm}} \right)^2 + \left( \frac{\partial R_c}{\partial C} \cdot \frac{\sigma_c}{C_2} \right)^2 \right]^{1/2} = 7,9\%.$$

**Выводы.** Таким образом, можно считать, что среднеквадратическая погрешность реализации квазиоптимального закона управления лежит в пределах 4–8%, и вполне приемлема для решения практических задач.

**Список литературы:** 1. Долгих И.Д. Разработка систем автоматического непрерывно дискретного регулирования транспортных дизелей: автореф. дис. докт. наук / И.Д. Долгих. – Харьков, 1993. – 47с. 2. Борисенко А.Н. Синтез квазиоптимального закона управления фазой, цикловой подачей и воздухообеспечением дизель-генератора с наддувом / А.Н.Борисенко, В.П.Самсонов, О.И.Чемоданов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков, 2003.– №7 –151с.–С.7–14. 3. Богаевский А.Б. Испытания дизеля 1Д80Б с электронным регулятором типа СУДМ – 01. / А.Б. Богаевский, А. Ф. Агулов, А.В. Басов, В.Н. Зайончковский, В.А. Рузов // Межвуз. сб. научн. трудов “Совершенствование конструкции локомотивов и системы их обслуживания.” С. – Петербург, ПГУПС. – 2004. – С. 49-56. 4. Корн Г, Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г.Корн, Т.Корн. – М.: Наука, 1978. – 832с. 5. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.:Наука 1977. – 224 с. –С. 223-224. 6. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1980. – 557 с. 7. Первачев С.В. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем / С.В.Первачев, А.А.Валуев, В.М.Чиликин. – М.: Советское радио, 1973.– 488 с. 8. Статистические методы исследования электромеханических систем / Е.Е.Александров, Б.И.Кузнецов, А.Н.Сиротенко, Т.Е.Василец, Т.Б.Никитина. – Харьков, 2006. – 303 с.

Поступила в редколлегию 21.03.2012