

С.В. Артемова, А.Н. Грибков\*

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА  
В СИСТЕМЕ TRACE MODE**

В связи с ростом цен на энергоносители возрастает роль систем энергосберегающего управления. На эффект энергосбережения и точность поддержания режимных параметров существенное влияние оказывают помехи по каналам управления и измерения. Например, значения напряжения электросети могут колебаться в значительных пределах и отличаться от номинального на 10...25 %. Эти изменения можно рассматривать как помехи по каналу управления. Для устранения их влияния в настоящее время применяются два метода: аппаратный – использование стабилизаторов напряжения и алгоритмический. Последний метод широко применяется и для снижения влияния помех по каналу измерения (вызванные погрешностями датчиков, квантованием аналоговых сигналов и т.д.).

Важным этапом проектирования системы энергосберегающего управления (СЭУ) является анализ ее работы в условиях помех, интенсивность которых влияет на выбор структуры управляющего устройства (регулятора). В данной работе рассматривается методика имитационного моделирования оптимальных регуляторов при наличии помех по каналам управления и измерения с использованием системы TRACE MODE [1].

Наиболее часто рассматриваются три случая представления основных уравнений изменения переменных системы оптимального управления при наличии помех. В первом случае учитываются помехи в канале измерения

$$M_1 : x_{i+1} = Fx_i + Gu_i, y_i = Hx_i + v_i, u_i = L_i(R_{1q})y_i, i = \overline{0, N-1}, R_{1q} \in \mathfrak{R}_1,$$

во втором случае – помехи в канале управления

$$M_2 : x_{i+1} = Fx_i + Gu_i, y_i = Hx_i, u_i = L_i(R_{2q})y_i + w_i, i = \overline{0, N-1}, R_{2q} \in \mathfrak{R}_2$$

и в третьем – помехи в каналах управления и измерения

$$M_3 : x_{i+1} = Fx_i + Gu_i, y_i = Hx_i + v_i, u_i = L_i(\mathfrak{R}_{3q})y_i + w_i, i = \overline{0, N-1}, R_{3q} \in \mathfrak{R}_3,$$

здесь  $x_i, u_i, y_i$  – значения соответственно вектора фазовых координат, управления и выходной переменной на  $i$ -ом шаге;  $w_i, v_i$  – шумы в каналах управления и измерения соответственно;  $F, G, H$  – матрицы параметров объекта управления соответствующих размерностей;  $\mathfrak{R}_j$  – множество массивов реквизитов задачи оптимального управления (ЗОУ) случая  $M_j$ ;  $L_i(R_{jq})$  – оператор синтеза управляющего воздействия;  $q$  – индекс состояния функционирования, соответствующего конкретным исходным данным ЗОУ;  $N$  – число шагов на временном интервале управления.

Пусть управляющее устройство решает ЗОУ при ограничении на управление, с частично закрепленными концами траектории изменения фазовых координат, минимизируемом функционале – затраты энергии, при наличии помех в каналах управления и измерения.

Рассматриваемую ЗОУ можно представить в виде

$$M_j \in \mathbf{M}, j = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

$$J_j = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\forall i \in [0, N-1]: u_i \in [u_n, u_b], \quad (3)$$

$$x_0 = x^0, x_N \in \chi^k, \quad (4)$$

где  $J_j$  – минимизируемый функционал (затраты энергии);  $\delta t$  – временной шаг дискретизации;  $u_n, u_b$  – границы изменения управляющего воздействия;  $x^0, \chi^k$  – начальное значение вектора  $x$  и конечная область, в которую требуется перевести объект за  $N$  шагов;

Массивы реквизитов ЗОУ в  $M_j, j = \overline{1, 3}$  содержат следующие составляющие исходных данных:

$$\mathfrak{R}_1 = \{R_{1q} = (F, G, H, x_i, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, \sigma_v)_q\},$$

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Ю.Л. Муромцева.

$$\mathfrak{R}_2 = \{R_{2q} = (F, G, H, x_i, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, \sigma_w)_q\},$$

$$\mathfrak{R}_3 = \{R_{3q} = (F, G, H, x_i, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, \sigma_w, \sigma_v)_q\},$$

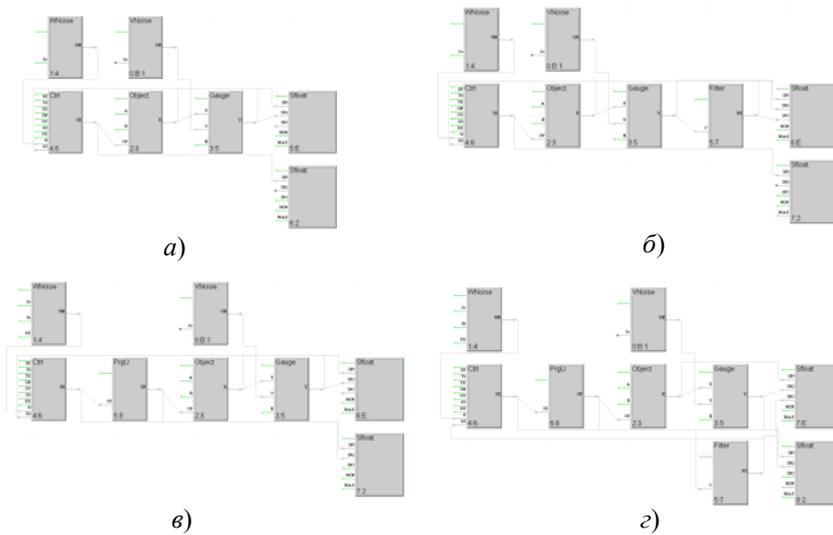
где  $\sigma_w, \sigma_v$  – интенсивности помех в каналах управления и измерения.

Для повышения эффективности работы СЭУ в условиях помех могут применяться алгоритмы оптимальной фильтрации и прогнозирования [2 – 4]. В зависимости от этого возможны четыре структуры алгоритмов управления:

$C_1$  – алгоритм управления без фильтра и прогнозирования,  $C_2$  – алгоритм, содержащий фильтр Калмана,  $C_3$  – алгоритм с прогнозированием и компенсацией помехи по каналу управления и  $C_4$  – алгоритм, использующий фильтрацию и прогнозирование.

Задача проектирования СЭУ заключается в выборе такого алгоритма управления  $C_m \in C, m = \overline{1,4}$ , при котором для заданных  $\langle M_j, \mathfrak{R}_j \rangle$  достигается цель управления и обеспечивается наибольшая экономия энергозатрат. Для решения данной задачи используется метод имитационного моделирования.

Возможности системы TRACE MODE позволяют составить схемы алгоритмов управления и оценить их эффективность применительно к ЗОУ (1 – 4). На рис. 1 приведены структурные схемы СЭУ для алгоритмов  $C_m \in C, m = \overline{1,4}$ .



**Рис. 1 Структурные схемы СЭУ с алгоритмами:**  
а –  $C_1$ ; б –  $C_2$ ; в –  $C_3$ ; з –  $C_4$

Методика имитационного исследования СЭУ включает следующие этапы.

1 Составляется план эксперимента, варьируемыми переменными в нем являются: случаи  $M_j \in M, j = \overline{1,3}$ , массивы реквизитов  $R_{jq} \in \mathfrak{R}_j, j = \overline{1,3}$ , алгоритмы управления  $C_m \in C, m = \overline{1,4}$ . В плане эксперимента учитываются значения нормированной относительно  $R_{jq}$  интенсивности шумов  $\Sigma_p$ . Для нормирования используются конечная область  $\chi^k$  и диапазон изменения  $u_i$ .

2 Задается объем выборки, т.е. число экспериментов, проводимых для конкретных  $M_j, R_{jq}, C_m, \Sigma_p$ .

3 Проводятся численные эксперименты, по результатам которых определяются границы доверительных интервалов  $[J_3^H, J_3^B]$  и  $[x_H^k, x_B^k]$  для конкретных  $M_j, R_{jq}, C_m, \Sigma_p$ .

4 Строятся зависимости, характеризующие изменение  $[J_3^H, J_3^B]$  и  $[x_H^k, x_B^k]$  от  $\Sigma_p$ , а также линии равного уровня, отражающие эффективность включения в алгоритм фильтрации и прогнозирования.

5 Проводится сопоставление алгоритмов  $C_m$ , в качестве критериев сравнения используются  $[J_3^H, J_3^B]$  и  $[x_H^k, x_B^k]$ .

6 По результатам имитационных экспериментов составляются таблицы, в которых для конкретных  $M_j, R_{jq}, \Sigma_p$  указываются предпочтительные алгоритмы  $C_m$ .

Данная методика использовалась при разработке алгоритмического обеспечения СЭУ тепловыми аппаратами и машинами с электроприводами. Проведенные исследования показали, что эффект

энергосбережения в значительной степени зависит от вида и интенсивностей помех. Введение в алгоритмы управления фильтрации и прогнозирования позволяет снизить затраты энергии на 5...20 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Руководство пользователя TRACE MODE/AdAstra Research Group, Ltd., 2000.
- 2 Артемова С.В., Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н. Влияние интенсивности помех на минимизируемый функционал при энергосберегающем управлении с оптимальной фильтрацией // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 8. № 3. С. 402 – 409.
- 3 Kalman R.E., Busy R.C. New results in linear filtering and prediction theory. «Trans. ASME, J. Of Basic Engineering», 1961, v. 83, № 1.
- 4 Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Аппроксимативные методы анализа случайных процессов. М.: «Энергия», 1974. 177 с.

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»*