

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С.В. Артемова, Д.Ю. Муромцев, А.Н. Грибков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем», ТГТУ*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Бодровым

Ключевые слова и фразы: апериодическое звено; вектор фазовых координат; оптимальное управление; позиционная стратегия оптимального управления; прогноз возмущения; функционал затрат энергии.

Аннотация: Рассматриваются вопросы энергосберегающего управления динамическими объектами в условиях помех по каналу управления. Предложен алгоритм компенсации возмущения с использованием модели прогнозирования возмущения.

Введение

В связи с ростом цен на энергоносители в настоящее время возрастает роль систем энергосберегающего управления энергоемкими объектами, в том числе тепловыми аппаратами, электродвигателями, транспортными средствами. На практике фактические значения напряжения электросети могут отличаться от номинального на 10 – 25 % в сторону уменьшения и на 10 – 17 % в сторону увеличения, частота снижаться до 49,3 Гц, нелинейные искажения могут достигать 18 % [1]. Эти изменения можно рассматривать как возмущения в системах автоматического управления, что существенно влияет на их работу, снижает точность выхода на заданные режимы и приводит к увеличению потребления энергии. При использовании аппаратных средств стабилизации напряжения повышается стоимость системы управления и увеличиваются затраты электроэнергии за счет питания стабилизаторов. Статья посвящена разработке алгоритмов корректировки управляющего воздействия с учетом прогноза возмущения типа «цветной» шум.

1 Постановка задачи энергосберегающего управления с учетом возмущения

Пусть решается задача оптимального управления динамическим объектом при ограничении на управление, частично закрепленными концами траектории изменения фазовых координат, минимизируемом функционале – затраты энергии и наличии возмущения в канале управления типа «цветной» шум. В этом случае в дискретной форме математическая постановка задачи при использовании позиционной стратегии управления имеет вид:

$$x_{i+1} = \mathbf{F}x_i + \mathbf{G}u_i^*, \quad i = \overline{0, N-1}; \quad (1)$$

$$y_i = \mathbf{H}x_i; \quad (2)$$

$$u_i^* = L_i y_i + w_i; \quad (3)$$

$$J_{\mathcal{J}} = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} u_i^{*2} \rightarrow \min; \quad (4)$$

$$\forall i \in [0, N-1], \quad u_i^* \in [u_n, u_b]; \quad (5)$$

$$x_0 = x^0, \quad x_N \in \chi^k, \quad (6)$$

здесь x_i, u_i, y_i, w_i – значения, соответственно, вектора фазовых координат, управления (скалярного), выходной переменной на i -м шаге и возмущения типа «цветной» шум; L_i – оператор синтеза управляющего воздействия; $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$ – матрицы соответствующих размерностей; $J_{\mathcal{J}}$ – минимизируемый функционал (затраты энергии); δt – временной шаг дискретизации; N – число шагов на временном интервале управления; u_n, u_b – границы изменения управляющего воздействия; x^0, χ^k – начальное значение вектора x и конечная область, в которую требуется перевести объект за N шагов.

Требуется рассчитывать на каждом шаге оптимальное управляющее воздействие с учетом возмущения w_i .

Предполагается, что исходные данные задачи, т.е. массив реквизитов \mathfrak{R} , остаются неизменными на временном интервале управления $\Delta t = N \delta t$, т.е. система находится в одном состоянии функционирования. Помехой в канале измерения можно пренебречь.

Массив реквизитов задачи имеет вид

$$\mathfrak{R} = (\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, \sigma_w). \quad (7)$$

Блок-схема замкнутой системы энергосберегающего управления (СЭУ) представлена на рис. 1.

Необходимо алгоритмически скорректировать управляющее воздействие с целью снижения влияния возмущения w_i . Эффективность функционирования данной СЭУ может быть повышена за счет прогнозирования возмущения и корректировки управляющего воздействия.

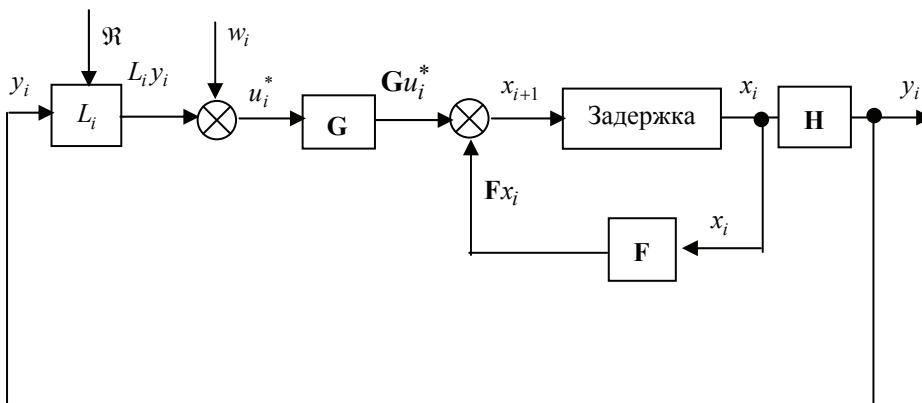


Рис. 1 Блок-схема системы энергосберегающего управления

2 Коррекция оптимального управления на основе прогноза возмущения

Для снижения влияния возмущения w_i введем компенсационную добавку \tilde{w}_i , определенную путем оптимального линейного прогноза в простейшем случае по формуле [2]

$$\tilde{w}_i = \bar{w} + \phi_1 (w_{i-1} + \bar{w}), \quad (8)$$

где $\phi_1 = \frac{1}{(N_B - 1)\sigma_w^2} \sum_{j=1}^{N_B-1} (w_j - \bar{w})(w_{j+1} - \bar{w})$ – параметр прогнозирующей модели

(8). Здесь σ_w^2 – дисперсия w_j ; \bar{w} – математическое ожидание w_j ($\bar{w} = 0$); N_B – объем выборки.

Управляющее воздействие с учетом прогноза возмущения будет иметь следующий вид

$$\tilde{u}_i^* = L_i y_i + w_i - \tilde{w}_i. \quad (9)$$

Блок-схема СЭУ с учетом прогноза возмущения представлена на рис. 2.

Модель (8) выбирается с учетом требуемой точности прогнозирования и возможности ее использования простым управляющим устройством. При необходимости для увеличения точности прогноза могут применяться более сложные модели, например скользящего среднего, авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего или другие. Необходимо учитывать, что эффективная работа системы зависит от выбранного шага квантования и среднеквадратичного отклонения w_i . Окончательный выбор модели прогноза производится на основе имитации работы системы с различными параметрами.

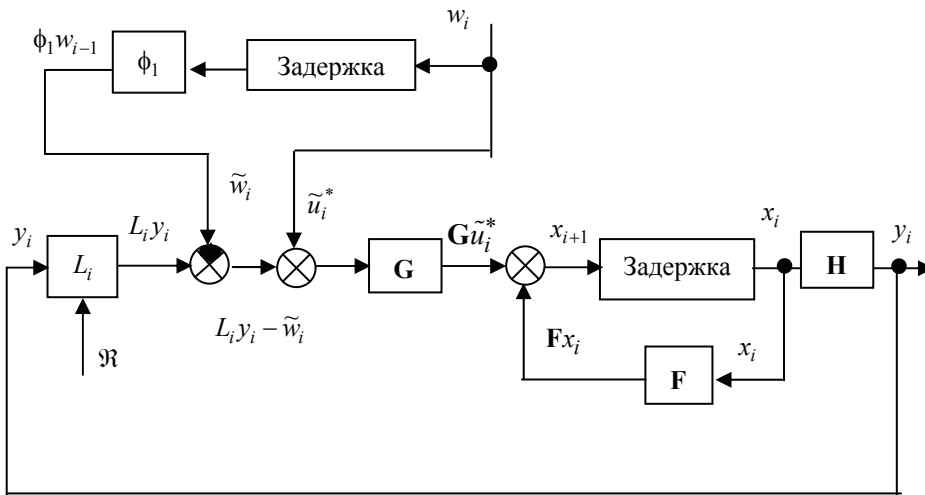


Рис. 2 Блок-схема СЭУ с учетом прогноза возмущения

3 Имитация работы системы энергосберегающего управления в условиях помех

Целью имитационного моделирования является анализ функционирования СЭУ при различных интенсивностях помех (среднеквадратичного отклонения) в канале управления σ_w . В простейшем случае возмущение w_i можно представить в виде двух составляющих

$$w_i = \rho_1 w_{i-1} + \beta_i, \quad i = \overline{0, N-1}, \quad (10)$$

здесь $\rho_1 w_{i-1}$ – коррелированная составляющая, где ρ_1 – коэффициент корреляции (для данного случая $\rho_1 = \phi_1$); β_i – «белая» составляющая.

Имитация производилась при различных интенсивностях «цветного» шума σ_w и белой составляющей σ_β , а также коэффициента корреляции ρ_1 . При фиксированных $N, \sigma_w, \sigma_\beta$ брались усредненные значения по 100 опытам, в каждом опыте значения функции (10) имитировались дважды в прямой и обратной последовательности.

Рассмотрим проведение эксперимента на конкретном примере.

В качестве модели динамики объекта использовалось апериодическое звено. При $a = -0,1053605$, $b = 0,20721$ параметрах, полученных при идентификации, ограничении на управление $u_i \in [u_n = -3; u_b = 3]$ объект требуется перевести из начального состояния $x_0 = 10$ в конечную область $\chi^k \in [-0,1; 0,1]$ с минимумом затрат энергии.

Параметры \mathbf{F} и \mathbf{G} можно получить решая задачу Коши:

$$\mathbf{F} = \mathbf{e}^{a \delta t}, \quad \mathbf{G} = -\frac{b}{a} (1 - \mathbf{e}^{a \delta t}). \quad (11)$$

Оптимальное управление рассчитывалось по формуле (для рис. 1)

$$u_i^* = \frac{2ay_i}{b(\mathbf{e}^{-2a(\Delta t - i\delta t)} - 1)} + w_i. \quad (12)$$

Оптимальное управление с учетом прогноза возмущения (для рис. 2)

$$\tilde{u}_i^* = \frac{2ay_i}{b(\mathbf{e}^{-2a(\Delta t - i\delta t)} - 1)} - \tilde{w}_i + w_i. \quad (13)$$

При определении синтезирующей функции в качестве конечного значения x_N задавалась середина интервала χ^k , т.е. $x_N = 0$. Для расчета функционала затрат энергии J , управление на последнем шаге u_{N-1}^* рассчитывалось из условия $\mathbf{F}x_{N-1} + \mathbf{G}u_{N-1}^* = 0$.

Результаты имитационного моделирования для различного числа шагов N , интенсивностей «цветного» шума σ_w , его «белой» составляющей σ_β , значения минимизируемого функционала J без прогноза возмущения (см. рис. 1) и с прогнозом $J_{\text{пр}}$ (см. рис. 2), а также значения экономии энергии, рассчитанные по

формуле $\Delta J, \% = 100 - 100 \frac{J_{\text{пр}}}{J}$ приведены в табл. Коэффициент корреляции менялся в пределах $\rho_1 = 0,4 \dots 0,9$ в зависимости от числа шагов.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что при увеличении числа шагов и использовании алгоритма управления, использующего прогноз возмущения w_i , экономия энергии растет.

На рис. 3 приведены траектории изменения оптимального управления объектом для трех случаев: программная (a), с прогнозом возмущения (b) и без него (c), из которых видно, прогноз позволяет уменьшить колебательную составляющую управления, что приводит к уменьшению затрат.

Коэффициент корреляции возмущения оказывает заметное влияние на экономию энергии, что отражено на рис. 4.

Таблица

Моделирование работы СЭУ

N	σ_w	σ_δ	J	$J_{пр}$	$\Delta J, \%$
20	0,5	0,2	11,84065	10,92324	7,748003
40	0,5	0,2	11,46157	8,225784	28,23163
80	0,5	0,2	11,41536	7,455179	34,69168

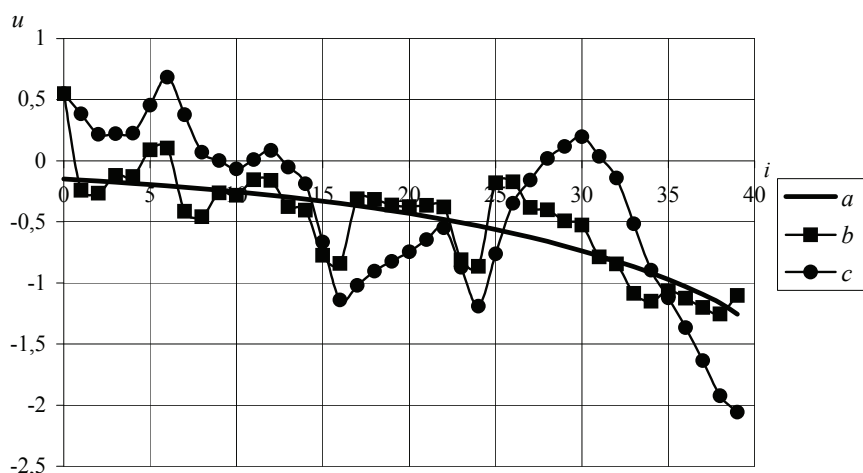


Рис. 3 Графики оптимального управления:

a – программное; b – с прогнозом возмущения; c – без прогноза возмущения при $N = 40$

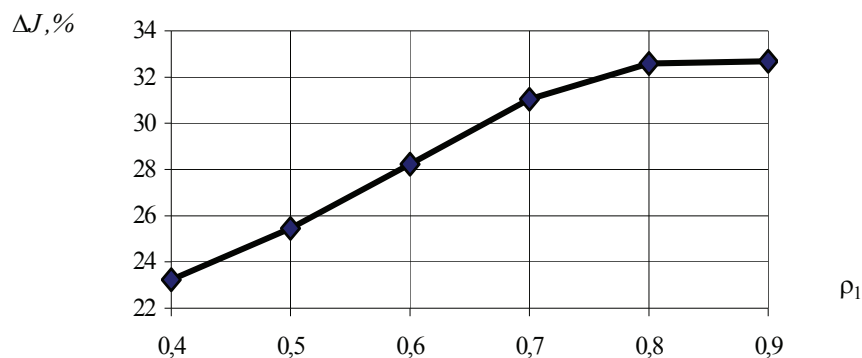


Рис. 4 Зависимость экономии энергии ΔJ от коэффициента корреляции ρ_1

Выводы

1. При наличии возмущения по каналу управления на эффективность работы системы энергосберегающего управления существенное влияние оказывают величина шага дискретизации и параметры случайного процесса изменения возмущения.

2. Использование модели прогнозирования возмущения в алгоритме управления позволяет увеличить экономию энергии на 7...30 %.

3. Предложенный алгоритм может реализоваться простыми микропроцессорными устройствами.

Список литературы

1. Сайт НПМП «СВЯЗЬЭНЕРГОСЕРВИС» www.kupol.com.ua
2. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Аппроксимативные методы анализа случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 177 с.

Forecast and Disturbance Compensation in Optimal Control Systems

S.V. Artemova, D.Yu. Muromtsev, A.N. Gribkov

Department "Design of Radio-electronic Devices and Microprocessor Systems", TSTU

Key words and phrases: non-periodic element; phase coordinates vector; optimal control; positioning strategy of optimal control; disturbance forecast.

Abstract: Matters of energy-saving control of dynamic objects in terms of disturbance in control channel are considered. The algorithm of disturbance compensation using the model of disturbance forecast is offered.

Prognosierung und Kompensierung der Störung in den Systemen der Optimalsteuerung

Zusammenfassung: Es werden die Fragen der energiesparenden Steuerung von den dynamischen Objekten unter Störungsbedingungen im Steuerungskanal betrachtet. Es ist den Algorithmus der Kompensierung der Störung mit der Benutzung des Modells der Störungsprognosierung vorgeschlagen.

Prévision et compensation de la perturbation dans les systèmes de la commande optimale

Résumé: Sont examinés les problèmes de la commande conservant de l'énergie pour les objets dynamiques dans les conditions des erreurs par la chaîne de commande. On a proposé l'algorithme de la compensation de la perturbation avec l'utilisation du modèle de la prévision de la perturbation.