

## ОПТИМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРИ НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

Н.А. Кольтюков

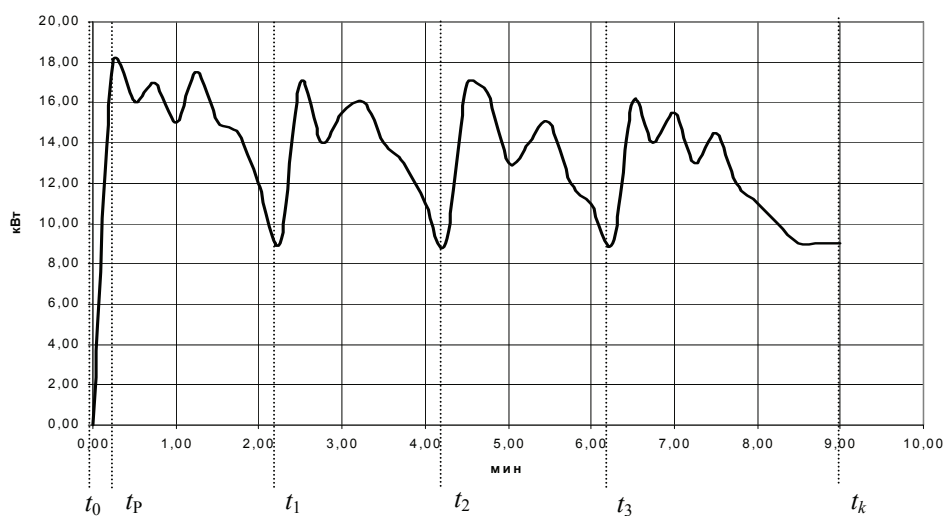
*Кафедра "Конструирование радиоэлектронных  
и микропроцессорных систем", ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором Ю.Л. Муромцевым*

**Ключевые слова и фразы:** автокорреляционная функция; оптимальное управление; прогнозирующая модель; смесительные установки; энергосбережение.

**Аннотация:** Решается задача оптимального энергосберегающего управления электроприводом смесительной установки при изменяющейся нагрузке с применением прогнозирующей модели.

На предприятиях, занимающихся производством и переработкой полимерных материалов, широкое применение находят различные смесительные установки с электроприводами. Особенностью работы этих установок с точки зрения энергосберегающего управления являются частые и значительные изменения нагрузки на приводную часть, что в свою очередь ведет к повышенным энергозатратам [1]. Косвенным показателем влияния величины нагрузки на привод является потребляемая мощность электродвигателя. На рис. 1 показана типовая зависимость потребления энергии резиносмесителем за один цикл смешения.



**Рис. 1** Изменение потребления мощности резиносмесителем за один цикл смешения

На рис.1 можно выделить ряд характерных участков процесса смешения: на временном отрезке  $[t_0, t_p]$  – разгон электродвигателя до требуемого числа оборотов, на

интервалах  $[t_p, t_1)$ ,  $[t_1, t_2)$ ,  $[t_2, t_3)$  и т.д. – стадии процесса смешения. Задача оптимального управления с учетом вышесказанного формулируется следующим образом.

Заданы:

– модель динамики объекта

$$\dot{z} = \begin{cases} A_1 z(t) + B_1 [u(t) + w_1(t)], & t \in [t_0, t_p), \\ A_2 z(t) + B_2 [u(t) + w_2(t)], & t \in [t_p, t_2), \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ A_k z(t) + B_k [u(t) + w_k(t)], & t \in [t_{k-1}, t_k), \end{cases} \quad (1)$$

$$y(t) = \begin{cases} C_1(z(t)), \\ C_j(z(t), w_j(t)), & j = \overline{2, k}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $z$  – вектор фазовых координат;  $u$  – управление;  $w_j$  – нагрузка на  $j$  - стадии;  $y$  – выходная переменная;  $A_j, B_j, C_j$  – матрицы параметров модели соответствующих размерностей;  $k$  – число стадий;  $t_0, t_p$  – начало и конец разгона электродвигателя;  $t_j, j = \overline{2, k}$  – время окончания  $j$  - стадии;

– модель прогнозирования значений нагрузки

$$w_j^{\text{пп}}(t + \Delta t) = \varphi(w_j(t), \psi_j), \quad j = \overline{2, k}, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – временной шаг прогнозирования;  $\psi_j$  – массив параметров модели;

– условия и ограничения

$$\forall t \in [t_0, t_k] : u(t) \in [u_n, u_v], \quad (4)$$

$$z(t_0) = z^0, \quad z(t_p) = z^P; \quad y(t_j) \in [y_j^H, y_j^B], \quad j = \overline{2, k}, \quad (5)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k] : \dot{z}_2(t) \leq \dot{z}_2^{\text{доп}}, \quad t_p \leq t_p^{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $u_n, u_v$  – границы изменения управляющего воздействия;  $z^0, z^P$  – начальное и конечное значение вектора фазовых координат этапа разгона;  $y_j^H, y_j^B$  – границы интервала допустимых значений выходной переменной в конце  $j$  – стадии;  $\dot{z}_2^{\text{доп}}$  – допустимое значение для  $\dot{z}_2$  (ускорения);  $t_p^{\text{доп}}$  – допустимое время разгона;

– минимизируемый функционал

$$J = \sum_{j=1}^k \int_{t_0}^{t_j} u^2(t) dt,$$

здесь  $t_1 = t_p$ .

Требуется выбрать стратегию и определить оптимальные управления  $u_j^*(t), t \in [t_{j-1}^*, t_j^*], j = \overline{1, k}$  для каждой стадии, т.е. виды функций  $u_j^*(t)$ , значения их параметров и моменты "переключения" стадий  $t_j^*$ .

Для исследования характера изменения нагрузки рассчитывались автокорреляционные функции (АКФ)  $\rho(k)$  для различных стадий смешения. На рис. 2 показаны АКФ для 1-го и 4-го участков, полученные при обработке кривой рис. 1 с временным шагом 3 с. Анализ АКФ показывает, что для различных стадий смешения имеют место однородные колебательные составляющие.

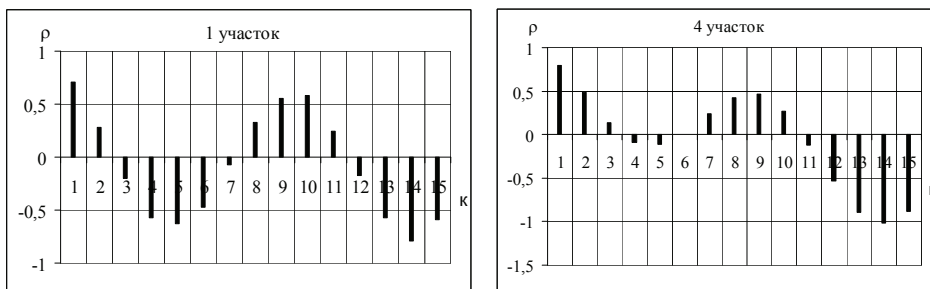


Рис. 2 Автокорреляционные функции

Выбор модели (3) производился из следующего набора: авторегрессия первого AP(1) и второго AP(2) порядков, модель проинтегрированного скользящего среднего ПСС(0,1,1), авторегрессия проинтегрированного скользящего среднего АРПСС(1,1,1), т.е.

$$w_t^{пп} = \bar{w} + \phi_1(w_{t-1} - \bar{w}), \quad (7)$$

$$w_t^{пп} = \bar{w} + \phi_1(w_{t-1} - \bar{w}) + \phi_2(w_{t-2} - \bar{w}), \quad (8)$$

$$w_t^{пп} = w_{t-1} - Q(w_{t-1} - w_{t-1}^{пп}), \quad (9)$$

$$w_t^{пп} = (1 + \phi)w_{t-1} - \phi w_{t-2} - Q(w_{t-1} - w_{t-1}^{пп}), \quad (10)$$

где  $\phi_1 = \frac{\rho_1(1 - \rho_2)}{1 - \rho_1^2}$ ,  $\phi_2 = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2}$ ;  $\phi = \frac{r_2(\omega)}{r_1(\omega)}$ ;  $\phi_1 + \phi_2 < 1$ ,  $\phi_2 - \phi_1 < 1$ ,  $|\phi_2| < 1$ ;

$\omega_t = w_t - w_{t-1}$ ;  $r_k(\omega) = \frac{1}{(N-2)\sigma_\omega^2} \sum_{i=1}^{N-2} (\omega_i - \bar{\omega})(\omega_{i+k} - \bar{\omega})$ ;  $\phi_1 = \rho_1$  – параметр модели

авторегрессии первого порядка;  $w_t$  – член временного ряда;  $\rho_1, \rho_2$  – коэффициенты корреляции;  $Q$  – параметр скользящего среднего определяется из таблицы функции  $r_1(\omega)$ ;  $\sigma_\omega^2$  – дисперсия временного ряда;  $\bar{w}$  – среднее значение временного ряда;  $r_k(\omega)$  – нормированный коэффициент корреляции;  $N$  – размер выборки.

На рис. 3 представлены результаты прогнозирования с использованием моделей AP(1) и AP(2). При выборе учитывались ошибка прогноза (см. табл.) и временной шаг.

Таблица

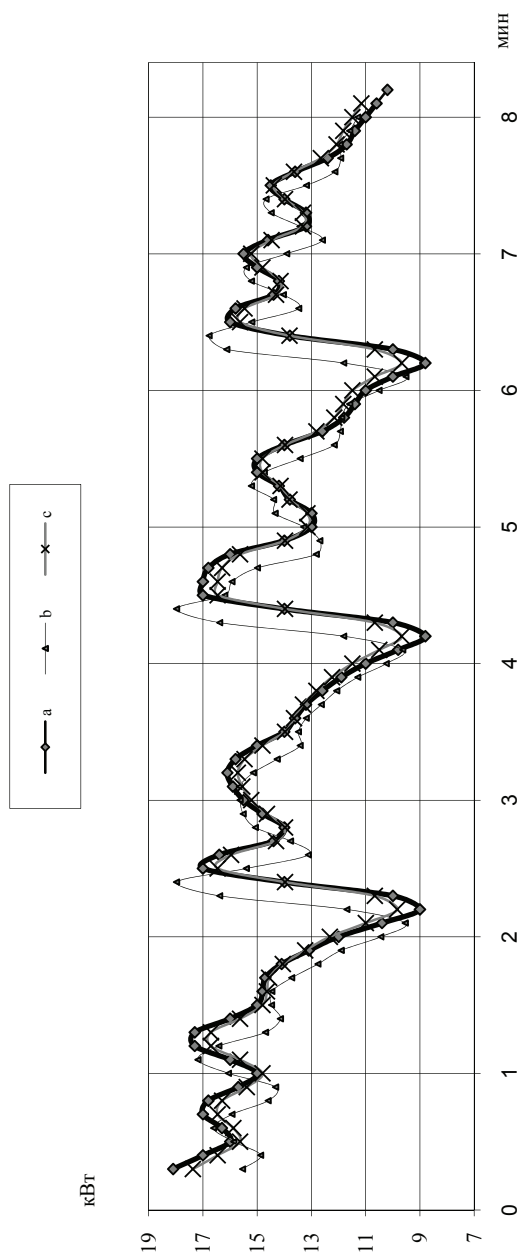
Погрешности прогнозирования

Модель	AP(1)	AP(2)	ПСС(0,1,1)	АРПСС(1,1,1)
Максимальная абсолютная погрешность	3,3349	2,3072	3,1	3,3238
Среднеквадратичная ошибка	1,2093	0,9017	1,0762	1,0219

Учитывая характер динамики процесса смещения (см. рис. 1), для управления используется комбинация программной и позиционной стратегий. На временном интервале  $[t_0, t_p]$  реализуется оптимальная программа

$$u_1^*(\bullet) = (u_1^*(t), t \in [t_0, t_p]) \quad (11)$$

для исходных данных



**Рис. 3 Прогнозирование потребления мощности резиносмесителем:**  
*a* - экспериментальная кривая, *b* - прогноз по модели AR(1),  
*c* - прогноз по модели AR(2)

$$R_1 = (A_1, B_1, u_H, u_B, z^0, z^P, t_0, t_P^{\text{доп}}, \bar{w}_1)$$

где  $z^P$  – значение  $z$  в конце разгона;  $\bar{w}_1$  – среднее значение нагрузки на первой стадии.

На последующих стадиях  $j = \overline{2, k}$  используются синтезирующие функции  $S_j$ , т.е.

$$u_j^*(t) = S_j(z, y, w^{\text{пр}}, t_j - t; R_j), \quad (12)$$

$$R_j = (A_j, B_j, \psi_j, u_H, u_B, z^{j-1}, z^j, y^j, t_{j-1}, t_j),$$

где  $z^j, y^j$  – задаваемые значения переменных соответственно  $z, y$  при  $t = t_j$ . Оптимальные значения моментов переключения  $t_j^*, j = \overline{1, k}$  определяются методом динамического программирования в сочетании с методом синтезирующих переменных.

Эффект энергосбережения (10-15%) достигается за счет следующих факторов:

- оптимальных значений моментов переключения  $t_j, j = \overline{2, k}$ ;
- оптимального разгона, т.е. использования программной стратегии  $u_1^*(\bullet)$ ;
- оптимального регулирования на стадиях смещения с использованием прогнозирующего значения нагрузки.

#### *Список литературы*

1. Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. – М.: Машиностроение, 1972. – 278 с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
3. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. – М.: Высш. шк., 1982. – 562 с.

### **Optimum Energy-Saving Control of Electric Drive under Constantly Changing Load**

**N.A. Koltjukov**

*Department "Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems", TSTU*

**Key words and phrases:** auto-correlation function; optimum control; prediction model; energy saving.

**Abstract:** The problem of optimum energy saving control of electric drive of mixer device under constantly changing load using the prediction model is being solved.

### **Optimale energiesparende Steuerung der elektrischen Antriebe bei der laufend verändernden Beladung**

**Zusammenfassung:** Es wird die Aufgabe der optimalen energiesparenden Steuerung der Mischungsanlage bei der verändernden Beladung mit der Anwendung vom prognostizierenden Modell gelöst.

**Gestion optimale conservant l'énergie des commandes électriques avec la charge sans discontinuer**

**Résumé:** Il s'agit du problème de la gestion optimale conservant l'énergie du mélangeur par une commande électrique avec la charge sans discontinuer avec l'utilisation du modèle de prévision.

---