

На правах рукописи

КОЛЬТЮКОВ Николай Александрович

**ОПТИМАЛЬНОЕ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ
СМЕСИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ И ПЕРЕРАБОТКЕ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2002

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре
"Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем".

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Муромцев Юрий Леонидович;
кандидат технических наук, доцент
Барышев Гертруд Алексеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Карапетян Рубен Миртадович;

доктор технических наук, профессор
Чайников Николай Александрович

Ведущая организация: АО "НИИРТМАШ", г. Тамбов.

Защита диссертации состоится " 28 " июня 2002 г. в " 13⁰⁰ " часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу:

392000. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу:
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, учёному секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТГТУ.

Автореферат разослан " ___ " мая 2002 года.

Ученый секретарь
диссертационного
А. Чуриков



совета

А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для промышленных предприятий затраты на электроэнергию относятся к числу основных и становятся сопоставимыми с затратами на сырье. На всех предприятиях, занимающихся производством и переработкой полимерных материалов, находят применение смесительные машины с электроприводами. Основной отличительной особенностью такого оборудования являются частые и значительные изменения нагрузки на приводную часть, которые ведут к существенному перерасходу энергии. В большей степени это проявляется на смесителях с асинхронным электроприводом, который в силу своих конструктивных особенностей имеет сильную зависимость КПД ($\cos\phi$) от величины нагрузки. Важным резервом снижения энергопотребления в таких машинах является оптимальное управление динамическими режимами с учетом изменяющейся нагрузки. Большинство смесительного оборудования содержит вспомогательные электроприводы (систем смазки, охлаждения), режимы работы которых, как правило, не оптимизируются. Теоретические исследования показывают, что при оптимальном управлении уменьшение затрат энергии в динамических режимах может достигать от 10 % до 30 % по сравнению с традиционным. Кроме того, при энергосберегающем управлении снижаются механические и тепловые нагрузки, что ведет к повышению долговечности и безопасности эксплуатации оборудования. Одним из главных сдерживающих факторов оптимального управления динамическими объектами является отсутствие алгоритмов оперативного синтеза управляющих воздействий, которые могут быть реализованы простыми встроенными микропроцессорными устройствами.

Поэтому данная работа, посвященная созданию алгоритмов и программ синтеза управляющих воздействий для оптимального управления энергоемким смесительным оборудованием, является своевременной и **актуальной**.

Цель работы заключается в разработке элементов теории оптимального энергосберегающего управления электроприводом в условиях непрерывно изменяющейся нагрузки; создании системы оптимального управления многоприводным объектом, обеспечивающей экономию электроэнергии в динамических режимах функционирования главных и вспомогательных электроприводов смесительных машин; внедрении методов энергосберегающего управления в промышленности для улучшения эксплуатационных характеристик резиносмесителей за счет снижения пиковых нагрузок как в моменты пуска, так и при устранении возмущающих воздействий. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: получить модели динамики электроприводов, пригодные для решения задач оптимального управления, учитывающие реальные условия эксплуатации, т.е. возможные изменения нагрузки и ограничение на ускорение; создать алгоритмическое обеспечение устройств оптимального управления учитывающее изменения нагрузки на электропривод и алгоритмы проектирования систем энергосберегающего управления многоприводными объектами; на основании литературного обзора выявить современные отечественные и зарубежные микропроцессорные средства, которые можно применять в системах управления технологическими процессами; выбрать аппаратные и разработать программные средства, удовлетворяющие необходимым условиям; разработать архитектуру системы оптимального управления; произвести отладку и испытания системы управления.

Научная новизна работы

Получены модели динамики установок с электроприводами, учитывающие нелинейности объектов, значительные изменения нагрузки на всех состояниях функционирования и пригодные для оперативного синтеза энергосберегающих управляющих воздействий.

Создано алгоритмическое обеспечение устройств оптимального управления, позволяющее при помощи прогнозирующей модели рассчитывать энергосберегающее управление как на этапе пуска электропривода, так и в последующей работе при устранении возмущающих воздействий.

Практическая значимость заключается в следующем.

Разработан пакет прикладных программ для оперативного синтеза алгоритмического обеспечения устройств энергосберегающего управления смесительными установками с электроприводами.

Разработана микропроцессорная система управления резиносмесителем, обеспечивающая снижение потребляемой энергии и повышение эксплуатационных характеристик оборудования. Система может быть установлена практически на любом объекте, содержащем электроприводы с тиристорным (симисторным) управляющим устройством. Предусмотрена возможность функционирования системы в составе различных по сложности автоматизированных системах управления технологическими процессами. Применение системы энергосберегающего управления динамическими режимами работы электроприводов смесителя не только снижает затраты энергии в среднем на 16 %, увеличивает срок службы электродвигателей и редукторов, но и позволяет более точно контролировать окончание цикла смешения, улучшить качество готовой смеси.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись и обсуждались на научных конференциях ТГТУ (2000 - 2002 гг.).

Публикации. По теме исследований опубликовано 9 печатных работ. Результаты работы по созданию оптимальных энергосберегающих систем управления электроприводами смесительных машин содержатся в трех отчетах НИР, выполненных по программе "Ресурсосберегающие технологии машиностроения".

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка использованной литературы, и 5 приложений. В диссертации также имеется 8 таблиц и 31 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы цели настоящей работы, определены ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы положения, выдвигаемые на защиту.

В первой главе приводится классификация смесительного оборудования, особенности его функционирования, энергетические характеристики процесса смешения. Выявлено, что для большинства смесительных машин характерны частые и значительные изменения нагрузки на приводную часть, которые являются следствием особенностей технологического процесса. На рис. 1 в качестве примера приведены типовые изменения нагрузки на приводную часть различных резиносмесителей.

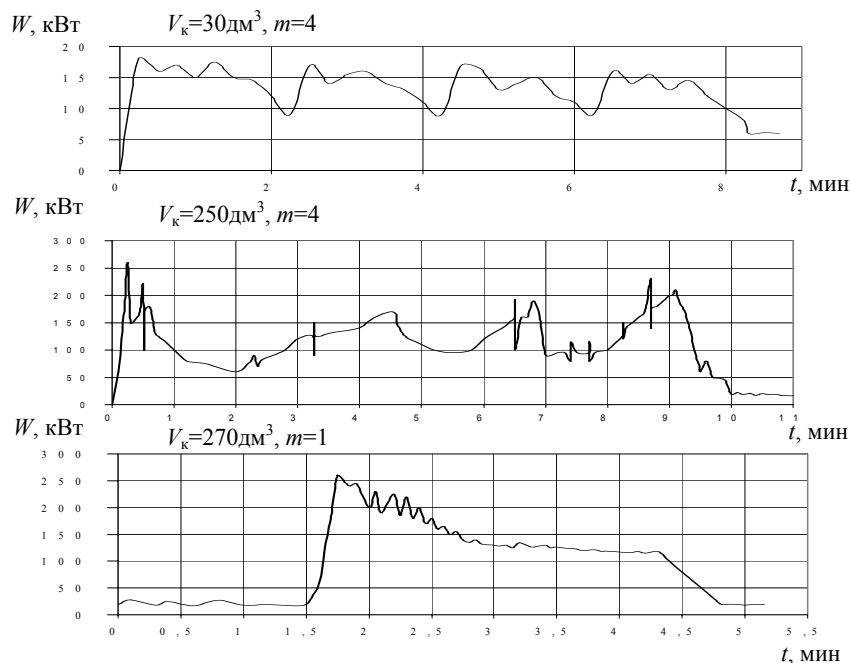


Рис. 1 Типовые изменения потребления мощности резиносмесителем за один цикл смешения (V_k – объем смесительной камеры; m – число загрузок ингредиентов за цикл смешения)

В главе дается, обзор отечественных и зарубежных микропроцессорных контроллеров для систем управления, однако, несмотря на их большое разнообразие, выявлено отсутствие алгоритмического обеспечения, способного осуществлять оптимальное энергосберегающее управление в условиях сильноизменяющейся нагрузки. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены математические модели работы электродвигателей, используемых в смесительных машинах, сформулированы задачи оптимального управления динамическими режимами работы электроприводов (ЭП) с учетом непрерывно изменяющейся нагрузки, люфта в механической части и при ограничении на ускорение. Осуществлена постановка задачи оптимального управления (ЗОУ) многоприводным объектом.

Структурная схема типовой смесительной установки с тремя электроприводами представлена на рис. 2, а на рис. 3 циклограмма ее работы.



Рис. 2 Структурная схема многоприводного объекта

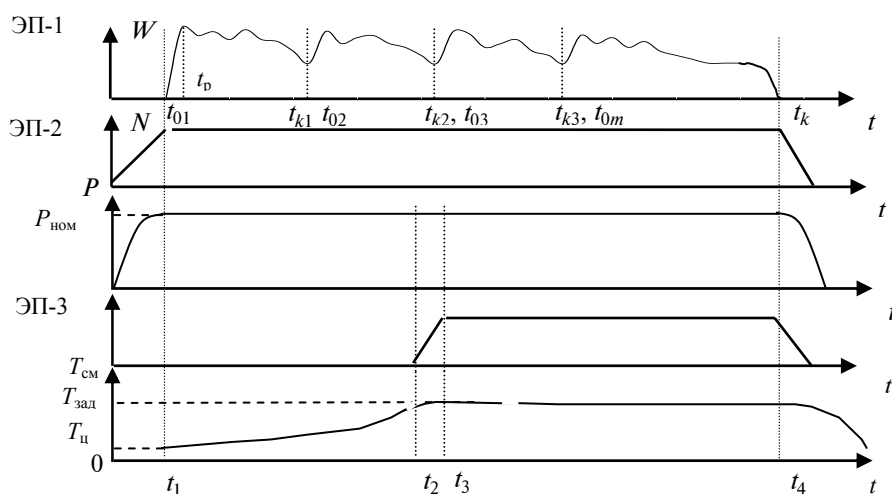


Рис. 3 Циклограмма работы многоприводной установки (W, N - потребляемые мощности; P - давление масла; T - температура охлаждающей жидкости; t - время)

Задача оптимального управления тремя электродвигателями (ЭД) объекта представленного на рис. 2 формулируется следующим образом:

$$\text{ЭД-1: } \dot{z} = f_1(z(t), u_{\text{ГЛ}}(t), w(t), A, B), t \in [t_1, t_4], \quad (1)$$

$$w_j^{\text{нр}}(t + \Delta t) = \varphi(w_j(t), \psi_j), j = \overline{1, m} \quad (2)$$

$$z = (z_1, z_2)^T, \quad \forall t \in [t_1, t_4]: u_{\text{ГЛ}}(t) \in [u_{\text{H}}, u_{\text{B}}], \quad (3)$$

$$z(t_{0i}) = z^{0i} \rightarrow z(t_{ki}) = z^{ki}, i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$P_{\text{M}}(t_1) \geq P_{\text{НОМ}}, \quad (5)$$

$$I_{\text{ГЛ}} = \sum_{i=1}^m \int_{t_{0i}}^{t_{ki}} u^2(t) dt \rightarrow \min_{u_{\text{ГЛ}}, t_{ki}} \quad (6)$$

где z - вектор фазовых координат; $u_{\text{ГЛ}}$ - управление (скалярное); A, B, ψ - параметры моделей; P_{M} - давление в системе смазки; $I_{\text{ГЛ}}$ - минимизируемый функционал.

$$\text{ЭД-2: } \dot{z} = f_2(z(t), u_{\text{M}}(t), A_2, B_2), t \in [t_0, t_1] \quad (7)$$

$$z = (z_1, z_2)^T, \quad \forall t \in [0, t_1]: u_{\text{M}}(t) \in [u_{\text{H}}, u_{\text{B}}], \quad (8)$$

$$z(t=0) = 0 \rightarrow z(t_1) = z^k, \quad (9)$$

$$P_{\text{M}} = f_{2a}(z(t), u(t), A_{2a}, B_{2a}), t \in [t_1, t_4], \quad (10)$$

$$\forall t \in [t_1, t_4]: u_{\text{M}}(t) \in [u_{\text{H}}, u_{\text{B}}], P_{\text{M}}(t) = P_{\text{НОМ}}, \quad (11)$$

$$I_{\text{M}} = \int_0^{t_1} u^2(t) dt \rightarrow \min_u \quad (12)$$

где u_{M} - управление (скалярное); A_2, B_2 - параметры модели; P_{M} - давление в системе смазки; I_{M} - минимизируемый функционал.

$$\text{ЭД-3: } \dot{z} = f_3(z(t), u(t), A_3, B_3), t \in [t_2, t_3] \quad (13)$$

$$z = (z_1, z_2)^T, \quad \forall t \in [t_2, t_3]: u(t) \in [u_{\text{H}}, u_{\text{B}}] \quad (14)$$

$$z(t_2) = 0 \rightarrow z(t_3) = z^k, \quad (15)$$

$$t_2 = f_{3a}(T_{\text{зад}}, W), \quad T_{\text{зад min}} \leq T_{\text{зад}}(t_2) \leq T_{\text{зад max}}, \quad (16)$$

$$W(t_2) \leq W_{\text{доп}},$$

$$T = f_{3b}(z(t), u(t), A_{3b}, B_{3b}), t \in [t_3, t_4], \quad (17)$$

$$\forall t \in [t_3, t_4]: u_{\text{ХЛ}}(t) \in [u_{\text{H}}, u_{\text{B}}], T_{\text{ХЛ}}(t) = T_{\text{доп}}, \quad (18)$$

$$I_{\text{ХЛ}} = \int_{t_2}^{t_3} u^2(t) dt \rightarrow \min_u \quad (19)$$

где $u_{\text{ХЛ}}$ - управление (скалярное); A_3, B_3 - параметры модели; T - температура охлаждающей жидкости; W - величина нагрузки на ЭД-1; $I_{\text{ХЛ}}$ - минимизируемый функционал.

Общий минимизируемый функционал для трех электродвигателей равен сумме функционалов (6), (12), (19)

$$I_{\Sigma} = I_{\text{M}}(u_{\text{M}}, 0, t_1) + I_{\text{ГЛ}}(u_{\text{ГЛ}}, t_{kj}; t_1, t_4) + I_{\text{ХЛ}}(u_{\text{ХЛ}}, t_2; t_2, t_3) \rightarrow \min_{u_{\text{ГЛ}}, u_{\text{ХЛ}}, u_{\text{M}}, t_2, t_{kj}} \quad (20)$$

Особенностью работы ЭД-1 смесительной установки с точки зрения энергосберегающего управления, являются частые и значительные изменения нагрузки на приводную часть, что в свою очередь ведет к повышенным энергозатратам. Для осуществления оптимального управления в таких условиях необходимо осуществлять прогнозирование изменения нагрузки. Косвенным показателем величины нагрузки на привод, является потребляемая мощность электродвигателя. На кривой $W(t)$ рис. 3 можно выделить ряд характерных участков процесса смешения: на временном отрезке $[t_{01}, t_{\text{P}}]$ – разгон электродвигателя до требуемого числа оборотов, на интервалах $[t_{\text{P}}, t_{k1}]$, $[t_{02}, t_{k2}]$, $[t_{03}, t_{k3}]$ и т.д. стадии процесса смешения.

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

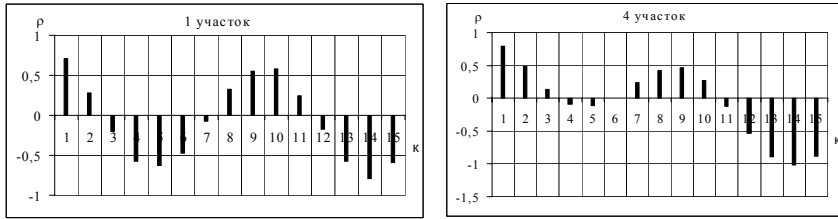


Рис. 4 Автокорреляционные функции

При выборе вида прогнозирующей модели (2) рассматривались модели: авторегрессии первого AP(1) и второго AP(2) порядков, проинтегрированного скользящего среднего ПСС(0,1,1), авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего АРПСС(1,1,1), т.е.

$$w_t^{np} = \bar{w} + \phi_1(w_{t-1} - \bar{w}), \quad \phi_1 = \rho_1, \quad (21)$$

$$w_t^{np} = \bar{w} + \phi_1(w_{t-1} - \bar{w}) + \phi_2(w_{t-2} - \bar{w}), \quad \phi_1 = \frac{\rho_1(1-\rho_2)}{1-\rho_1^2}, \phi_2 = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1-\rho_1^2}, \quad (22)$$

$$w_t^{np} = w_{t-1} - Q(w_{t-1} - w_{t-1}^{np}), \quad (23)$$

$$w_t^{np} = (1 + \phi)w_{t-1} - \phi w_{t-2} - Q(w_{t-1} - w_{t-1}^{np}), \quad \phi = \frac{r_2(\omega)}{r_1(\omega)}, \quad (24)$$

где $\phi_1 + \phi_2 < 1, \phi_2 - \phi_1 < 1, |\phi_2| < 1$; ϕ, ϕ_1, ϕ_2 , - параметры моделей; ряда; ρ_1, ρ_2 - коэффициенты корреляции; Q - параметр скользящего среднего определяется по значениям $\rho_1, \rho_2, r_1(\omega), \omega_t = w_t - w_{t-1}$; \bar{w} - среднее значение временного ряда w_t .

Результаты прогнозирования изменения нагрузки с использованием моделей (21) - (24) представлены на рис. 5, значения погрешностей прогноза приведены в табл. 1.

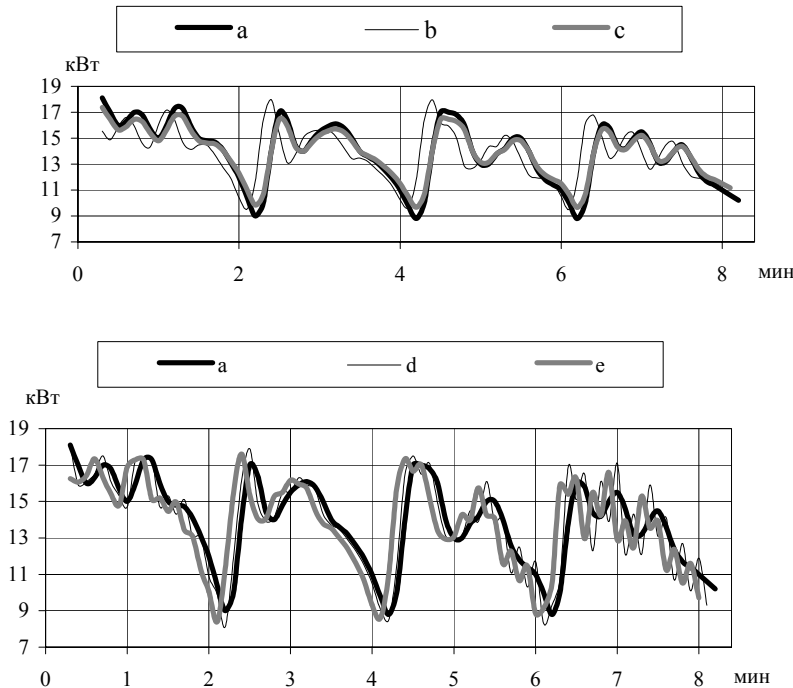


Рис. 5 Прогнозирование изменения нагрузки на привод резиносмесителя, (a - экспериментальная кривая, b - AP(1), c - AP(2), d - ПСС(0,1,1), e - АРПСС(1,1,1))

Модель Погрешность	АР(1)	АР(2)	ПСС(0,1,1)	АРПСС(1,1,1)
Максимальная абсолютная	1,9	1,4	2,0	2,1
Среднеквадратичная	0,6	0,3	0,4	0,5

Возможности микропроцессорных управляющих устройств при управлении объектами с электроприводами используются далеко не полностью. Практически нет систем оптимального управления, которые обеспечивают синтез в реальном масштабе времени энергосберегающих управляющих воздействий при изменениях состояний функционирования. В задачах управления с энергетическими функционалами для определения оптимальных программ широко используется принцип максимума. Однако его применение для пересчета программ при изменении исходных данных на временном интервале управления для многостадийных процессов, описываемых дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью, встречают серьезные трудности. Большие проблемы возникают при расчете оптимального управления (ОУ) методом динамического программирования как при численном решении задач, так и аналитическом выводе синтезирующих функций. Удобными в вычислительном отношении являются методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Однако здесь возникают проблемы, связанные с учетом ограничений на управление, выполнением терминальных условий и выбором весовых коэффициентов.

Каждый из рассмотренных методов в отдельности не дает возможности пересчитывать ОУ в реальном времени и в зависимости от обстоятельств реализовывать его в соответствии с программной или позиционной стратегией. Такая задача становится разрешимой применительно к широкому классу объектов, в том числе динамика которых описывается дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью, если принцип максимума и динамическое программирование использовать совместно с методом синтезирующих переменных. Последний метод позволяет оперативно определять вид и параметры функции ОУ непосредственно для задаваемого массива исходных данных - параметров модели объекта, ограничений на управление и др.

При решении задачи (1) - (6) модель объекта, учитывающая непрерывные изменения нагрузки, представляется дифференциальным уравнением с разрывной правой частью в виде m стадий

$$z = \begin{cases} A_1 z(t) + B_1 [u_{гп}(t) + w_1(t)], & z_j \in [z_j^0, z_j^{n1}], \\ \dots \\ A_m z(t) + B_m [u_{гп}(t) + w_m(t)], & z_j \in [z_j^{nm-1}, z_j^k], \end{cases} \quad (25)$$

$$w_j^{np}(t) = \bar{w}_j + \phi_{1j}(w_{t-1} - \bar{w}_j) + \phi_{2j}(w_{t-2} - \bar{w}_j), \quad (25, a)$$

где z - n -вектор фазовых координат; $w_j^{np}(t)$ - нагрузка на электродвигатель на j -й стадии z_j - компонента z , определяющая границы переключения стадии; z_j^0, z_j^k - начальное и конечное значения z_j ; $A_j, B_j, j = \overline{1, m}$ - матрицы параметров для m стадий.

В качестве компоненты z_j , назовем ее ведущей, рассматривается скорость или ток потребления ЭП. Объект с моделью (25) за фиксированный интервал времени $[t_0, t_k]$ переводится из начального состояния z^0 в конечное z^k , на управление наложены ограничения, т.е.

$$z(t_0) = z^0, \quad z(t_k) = z^k, \quad (26)$$

$$\forall t \in [t_{nj-1}, t_{nj}]: u(t) \in [u_{nj}, u_{bj}], \quad j = \overline{1, m}, \quad (27)$$

здесь $t_{ij} = t_i(z_i^{nj})$ - момент времени "переключения" с j -й стадии на $(j+1)$ -ю; u_{nj}, u_{bj} - нижняя и верхняя границы управления для j -й стадии.

В моменты t_{nj} должны выполняться условия неразрывности ведущей координаты и ограничения на разрыв остальных составляющих вектора z , т.е.

$$\begin{aligned} z_i(t_{nj}-0) &= z_i(t_{nj}+0), \\ |z_v(t_{nj}-0) - z_v(t_{nj}+0)| &\leq \Delta z_v, \quad v = \overline{i+1; n}; \quad j = \overline{1; m-1}. \end{aligned} \quad (28)$$

Минимизируется энергетический функционал вида

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt. \quad (29)$$

Требуется найти оптимальную программу

$$u^*(\bullet) = (u_{(1)}^*(t), t \in [t_0, t_{n1}^*]; \dots; u_{(m)}^*(t), t \in [t_{nm-1}^*, t_k]), \quad (30)$$

или синтезирующие функции S_j , т.е.

$$u_j^*(t) = S_j(z, y, w^{np}, t_j - t; R_j), \quad j = \overline{1, m}, \quad (31)$$

т.е. определить виды и параметры функций $u_{(j)}^*(t)$, значения t_{nj}^* и z_v^{nj*} , при которых выполняются условия (25) - (28) и функционал (29) минимален. Массив исходных данных задачи (25) - (30) имеет вид

$$\begin{aligned} R = (A_1, \dots, A_m, B_1, \dots, B_m, \phi_1^1, \dots, \phi_1^m, \phi_2^1, \dots, \phi_2^m, u_{n1}, u_{v1}, \dots \\ \dots, u_{nm}, u_{vm}, z^0, z_i^{n1}, \dots, z_i^{nm-1}, z^k, \Delta z_{i+1}, \dots, \Delta z_n, t_0, t_k). \end{aligned} \quad (32)$$

Учитывая, что на этапе пуска используется программная стратегия, а на последующих этапах позиционная, оптимальное управление будет выглядеть следующим образом

$$\begin{aligned} u_{\Sigma}^* = (u_{\Pi}^*(\bullet), S_j(z, y, w_{np}, t_j - t, R_j), j = \overline{1, m}), \\ R_j = (A_j, B_j, \psi_j, \phi_1, \phi_2, u_n, u_v, z^{j-1}, z^j, t_{j-1}, t_j). \end{aligned} \quad (33)$$

Определение 1. Модель (25) электропривода с изменяющейся нагрузкой назовем однородной, если вектор z имеет одинаковую размерность, а прогнозирующая модель один вид на всех стадиях.

Определение 2. Задачу (25) - (30) назовем общей задачей оптимального управления (ЗОУ), а задачу для j -й стадии при исходных данных

$$R_j = (A_j, B_j, u_{nj}, u_{vj}, z^{nj-1}, z^{nj}, t_{nj-1}, t_{nj}) \quad (34)$$

- частной ЗОУ, здесь $z^{nj} = z(t_{nj})$, $j = \overline{1, m-1}$; $z^{n0} = z^0$, $z^{nk} = z^k$.

Определение 3. Метод решения ЗОУ (25) - (30), предусматривающий определение видов функций ОУ на основе принципа максимума, расчет t_{nj}^* и z_v^{nj*} при стыковке стадий методом динамического программирования и расчет ОУ для частных задач при любых исходных данных (34) методом синтезирующих переменных назовем комбинированным.

Обозначим через ЗОУ (Δt_k) общую задачу, в которой конечное время t_k задано интервалом $[t_k, t_k + \Delta t_k]$.

При решении общей ЗОУ для главного электропривода резиносмесителя примем следующие допущения: 1) выполнен полный анализ оптимального управления на множестве состояний функционирования; 2) модель (25) однородная, собственные числа матриц A_j , $j = \overline{1, m}$ вещественные и различные; 3) для всех m стадий матрицы управляемости имеют ранг n .
Время перевода объекта из начального состояния j -й стадии z^{nj-1} в конечное z^{nj} , получающееся решением задачи оптимального быстрогодействия для данных (34), обозначим $\Delta t_{\delta j}$.

Утверждение 1. Если имеются такие z^{nj} , $j = \overline{1, m-1}$, что для всех стадий решения задач быстрогодействия существуют, то решение ЗОУ (Δt_k) имеет место при выполнении условия

$$t_{\delta \Sigma} = \sum_{j=1}^m \Delta t_{\delta j} \leq t_k + \Delta t_k - t_0. \quad (35)$$

Существование решения общей ЗОУ следует непосредственно из процедуры расчета $\Delta t_{\delta j}, j = \overline{2, m}$. Действительно, в результате решения задачи оптимального быстрогодействия для первой стадии определяются $\Delta t_{\delta 1}$ и $z^{n1}(t_0 + \Delta t_{\delta 1})$, причем $z_i(t_0 + \Delta t_{\delta i}) = z_i^{n1}$. Значение вектора $z^{n1}(t_0 + \Delta t_{\delta 1})$ рассматривается как начальное для второй стадии и т.д. Так получается одно из допустимых решений задачи с исходными данными (34).

Определение 4. Значения $t_{ij}, z_v^{ij}, j = \overline{1, m-1}, v \in \{1, \dots, n\}/i$, которые могут изменяться при решении общей ЗОУ, назовем переменными переключения.

Утверждение 2. Если решение общей ЗОУ существует и при расчете программного управления (30) значения переменных переключения определены методом динамического программирования, а управления $u_{(j)}(t), j = \overline{1, m}$ для частных задач получены с помощью принципа максимума, то программа $u(\cdot)$ является оптимальной для ЗОУ (Δt_k).

Это нетрудно продемонстрировать, представив минимизируемый функционал в виде

$$J_{\circ} = \sum_{j=1}^m J_{\circ j} = \int_{t_0}^{t_{n1}} u_{(1)}^2(t/z^{n1}) dt + \dots + \int_{t_{nm-1}}^{t_k} u_{(k)}^2(t/z^{nm-1}) dt. \quad (36)$$

Следствие утверждения 2. Программа $u(\cdot)$, в которой значения t_{ij}^* и z_v^{ij} определены методом динамического программирования, а функции $u_{(j)}^*(t), j = \overline{1, m}$ - методом синтезирующих переменных - оптимальна.

Это следует из того, что решения частных ЗОУ главным электроприводом, полученные методом синтезирующих переменных и с помощью принципа максимума, совпадают.

В третьей главе рассматривается задача оперативного проектирования системы оптимального энергосберегающего управления (СОЭУ). На многих предприятиях по производству и переработке полимерных материалов используются электроприводы средней и большой мощности, число которых в одном объекте может достигать 10 - 20. Таким объектом, например, может являться цех смесительных машин, где присутствуют основные и вспомогательные электроприводы (рис. 6). Каждому i -му ЭП при индивидуальном оптимальном управлении соответствуют различные математические модели (M^i), для них существуют различные ограничения (O^i), минимизируемые функционалы (Φ^i) и для управления применяются различные стратегии (C^i). Необходимо спроектировать для данного многоприводного объекта общую систему оптимального управления.

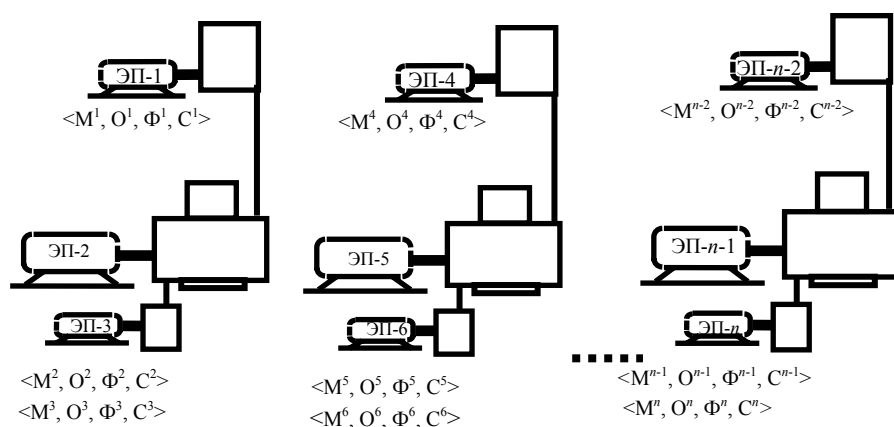


Рис. 6 Схема совокупности объектов с различными ЭП

Исходными данными для задачи оперативного проектирования СОЭУ являются модели ЗОУ отдельными ЭП (в случае отсутствия моделей ЗОУ задаются экспериментальные данные о динамических режимах или математические модели ЭП в форме дифференциальных уравнений и постановки ЗОУ отдельными ЭП), т.е.

$$E^i = \langle M^i, O^i, \Phi^i, C^i \rangle, \quad i = \overline{1, n}, \quad (37)$$

возможные реквизиты для решения задач оптимального управления

$$\{R^i, i = \overline{1, n}\}, \quad (38)$$

результаты решения ЗОУ для отдельных электроприводов

$$\{ALG^i, J_3^{*i}, i = \overline{1, n}\}, \quad (39)$$

где i - номер электропривода, n - количество электроприводов в объекте, ALG^i - алгоритм решения индивидуальной ЗОУ для i -го ЭП, J_3^{*i} - значение функционала "затраты энергии" для i -го ЭП при оптимальном управлении. На рис. 7 для примера приведены результаты решения ЗОУ для оптимального управления электродвигателями резиносмесителя, здесь видно, что они находятся в одной области, характеризующей вид функции ОУ.

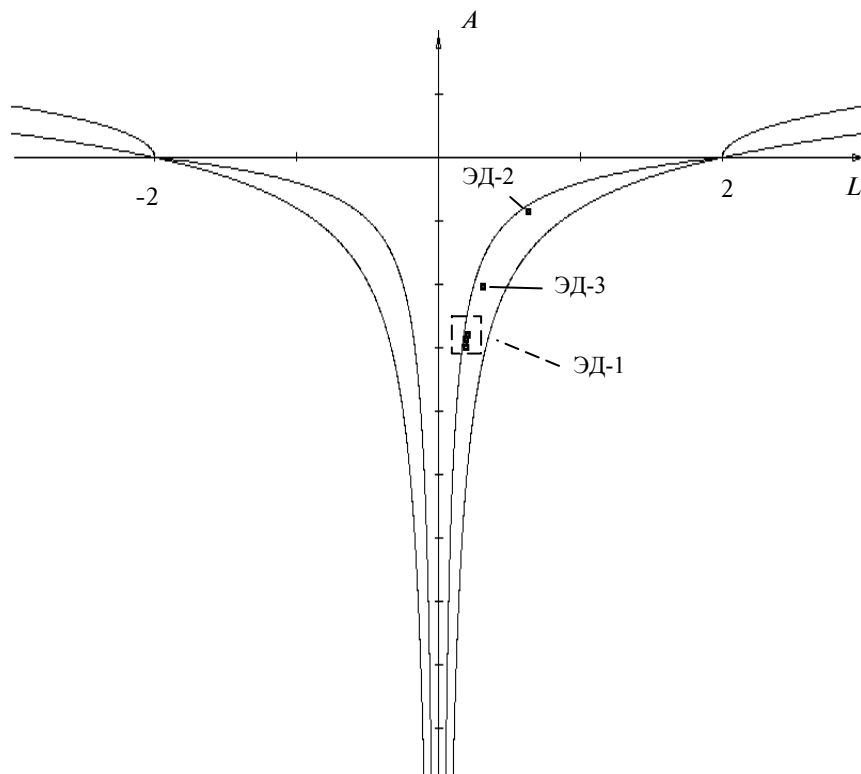


Рис. 7 Анализ энергосберегающего управления трех электроприводов

Задается векторный критерий оптимальности

$$Q = (q_1, q_2, q_3, q_4), \quad (40)$$

частные показатели, характеризуют проектируемую СОЭУ с точки зрения надежности функционирования q_1 , экономии энергозатрат q_2 , простоты математического q_3 и программного q_4 обеспечения системы.

Задаются несколько типов микропроцессорных контроллеров (МПК), для каждого из них определяется стоимость, аппаратная возможность управления несколькими ЭП и производительность S , зависящая от тактовой частоты и характеризующая возможность контроллера в реальном масштабе времени производить расчет ОУ.

Вводятся технологические ограничения на совместную работу различных ЭП, а также по стоимости и по времени создания системы управления.

Необходимо сформировать множество вариантов структуры системы ОУ, выбрать оптимальный и разработать для него алгоритмическое обеспечение.

Алгоритм оперативного проектирования СОЭУ многоприводным объектом включает следующие этапы.

1 Объект представляется множеством $\xi = \{\text{ЭП}_i, i = \overline{1, n}\}$, каждому элементу которого, соответствует задача оптимального управления, т.е.

$$\text{ЭП}_i \sim \langle M^i, O^i, \Phi^i, C^i \rangle, i = \overline{1, n}. \quad (41)$$

2 Множество ξ разбивается на N_1 групп $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{N_1}$, в которых динамика ЭП описывается одинаковым видом математической модели

$$\xi_1 = \{\text{ЭП}_i / M_1^i\}; \quad \xi_2 = \{\text{ЭП}_k / M_2^k\}; \quad \dots; \quad \xi_{N_1} = \{\text{ЭП}_l / M_{N_1}^l\}, \quad (42)$$

при этом выполняются условия

$$\xi = \bigcup_{i=1}^{N_1} \xi_i; \quad \xi_i \cap \xi_j = \emptyset, \quad i \neq j. \quad (43)$$

3 В каждой группе ξ_i выделяется m_i подгрупп с моделями в том числе и учитывающими изменяющуюся нагрузку, параметры которых одинаковы или различаются на допустимую величину.

4 В подгруппах m_i , содержащих более одного ЭП, производится проверка на идентичность минимизируемых функционалов Φ . При разных функционалах подгруппы делятся по количеству видов функционалов.

5 Анализируются условия и ограничения, в том числе технологические.

6 Проверяется идентичность стратегий реализации ОУ в подгруппах. В результате получаем группы ЭП, для которых допустимо использовать одно управляющее воздействие.

7 Для каждой группы электроприводов выбирается алгоритм управления и оцениваются вычислительные затраты на его программную реализацию с учетом числа пересчетов ОУ за единицу времени.

8 Формируются варианты структуры СОЭУ посредством компоновки групп ЭП и различных МПК. Вычислительные затраты на алгоритм управления одним МПК n_1 группами определяются как сумма вычислительных затрат на алгоритмы всех объединяемых групп, и дополнительного слагаемого, учитывающего возрастающую сложность при одновременном управлении.

9 Определяются стоимости вариантов и сопоставляются с соответствующими ограничениями.
10 Находится множество допустимых вариантов структуры СОЭУ многоприводным объектом.
11 Для вариантов определяются значения частных показателей q_1, \dots, q_4 . Если количественные значения показателей определить затруднительно, то используются их ранги, получаемые методом экспертных оценок.

12 Выделяется подмножество вариантов, оптимальных по Парето. Для окончательного определения оптимального варианта структуры СОЭУ используется "свертка" векторного критерия в скалярный.

В четвертой главе приводится пример разработки микропроцессорной СОЭУ резиносмесителем РС – 270 – 40 с тремя электроприводами. При этом для главного электропривода СОЭУ учитывает непрерывно изменяющееся значение нагрузки, люфт в механической части и ограничение на ускорение, для других осуществляется оптимальный пуск и регулирование с минимумом затрат энергии.

Для СОЭУ, разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение. Составлена функциональная схема СОЭУ, принципиальные схемы датчиков и блока согласования сигналов.

В памяти микропроцессорного устройства содержатся модели объекта управления для различных его состояний функционирования и программы, позволяющие синтезировать оптимальное управляющее воздействие. Это дает возможность производить автоматическую коррекцию управляющего воздействия при переходе из одного состояния в другое.

В приложение вынесены таблицы рассчитанных оптимальных управляющих воздействий, схема устройства связи с объектом управления, текст программы расчета ОУ с ограничением на ускорение и акты внедрения.

ВЫВОДЫ

1 Разработаны модели динамики электроприводов смесительных установок, учитывающие реальные условия эксплуатации, т.е. значительные изменения нагрузки и пригодные для решения задач оптимального энергосберегающего управления.

2 Сформулированы задачи энергосберегающего управления динамическими режимами электроприводов, в которых учитываются значительные изменения нагрузки, ограничения на ускорение и их совместную работу.

3 Выполнен анализ и синтез энергосберегающего управления, реализуемого комбинированной стратегией.

4 Разработано алгоритмическое обеспечение системы оптимального энергосберегающего управления многоприводной смесительной установкой.

5 Сформулирована задача оперативного проектирования системы оптимального энергосберегающего управления резиносмесителями и предложен алгоритм ее решения.

6 Разработана система энергосберегающего управления для роторных резиносмесителей типа РС, экономия электроэнергии составляет 7 - 20 %.

Используемые аббревиатуры: МСФ - множество состояний функционирования, ОУ - оптимальное управление, ЗОУ - задача оптимального управления, СОЭУ - система оптимального энергосберегающего управления, ЭП - электропривод, ЭД - электродвигатель.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1 Кольтюков Н. А. Оптимальное управление смесительными машинами резинотехнических производств // Труды ТГТУ: Сб. научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во ТГТУ. Вып. 5. 2000.

- 2 Кольтюков Н. А. Энергосберегающее управление электроприводами смесительных машин при изменяющейся нагрузке // Сб. тезисов докладов 5-й научной конференции ТГТУ. Тамбов. 2000. С. 252.
- 3 Шувалов А. М. Кольтюков Н. А. Многоцелевой малогабаритный выпрямитель с микропроцессорным управлением // Материалы международной научно-технической конференции и научно-технической школы "Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий", М.: НИИ "Автоэлектроника". 1998. Ч. 4. С. 19.
- 4 Шувалов А. М. Кольтюков Н. А. Снижение массогабаритных показателей в многоцелевом выпрямителе с микропроцессорным управлением // IV научная конференция: Краткие тезисы докладов. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1999.
- 5 Шувалов А. М. Кольтюков Н. А. Методы стабилизации выходного напряжения импульсного источника питания // Материалы международной конференции и Российской научной школы "Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий". М.: НИИ "Автоэлектроника" 1999. Ч. 4. С. 55.
- 6 Чернышов Н. Г. Кольтюков Н. А. Энергосберегающее управление сложными объектами резинотехнической промышленности // Труды ТГТУ: Сб. научных статей молодых ученых и студентов. Изд-во ТГТУ. Тамбов: Изд-во ТГТУ. 2001.
- 7 Кольтюков Н. А. Артемова С. В. Грибков А. Н. Применение прогнозирующей модели в системе оптимального энергосберегающего управления резиносмесителем // Труды ТГТУ: Сб. научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во ТГТУ. 2002.
- 8 Кольтюков Н. А. Артемова С. В. Грибков А. Н. Прогнозирующие модели в системе оптимального энергосберегающего управления электроприводом резиносмесителя // Сб. тезисов докладов 7-й научной конференции ТГТУ. Тамбов. 2000. С. 252.
- 9 Кольтюков Н. А. Оптимальное энергосберегающее управление электроприводами при непрерывно изменяющейся нагрузке / Вестник ТГТУ. № 2. 2002.