



УДК 681.5.013

© 2017 г. Д.Ю. Муромцев, д-р техн. наук,

А.Н. Грибков, д-р техн. наук,

В.Н. Шамкин, д-р техн. наук

(Тамбовский государственный технический университет)

МЕТОДИКА ВЫБОРА АЛГОРИТМА СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МНОГОМЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ*

Рассмотрены алгоритмы синтеза управляющих воздействий, применяемые в системах энергосберегающего управления многомерными технологическими объектами. Разработана методика выбора алгоритма синтеза энергосберегающих управляющих воздействий, учитывающая возможные изменения состояния функционирования многомерного объекта в процессе реальной эксплуатации.

Ключевые слова: энергосберегающее управление, многомерный объект, множество состояний функционирования.

DOI: 10.22250/isu.2016.53.109-118

Введение

Как показывает практика, применение систем энергосберегающего управления (СЭУ) технологическими установками позволяет существенно снизить затраты энергоресурсов и повысить качество выпускаемой продукции. Зачастую разработка таких систем представляет собой сложную научно-техническую задачу, поскольку в процессе разработки алгоритмического обеспечения СЭУ требуется достаточно сложный математический аппарат.

Проблеме создания алгоритмического обеспечения для СЭУ посвящено множество исследований, в данной предметной области работали Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко, Р. Беллман, А.М. Летов,

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект №17-08-00457-а.

А.А. Красовский, А.М. Ляпунов, М. Атанс, П. Фалб, В.А. Трапезников, Н.Н. Красовский, В.А. Бесекерский, А.Г. Александров, В.В. Солодовников, А.А. Воронов, К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, В.И. Зубов, В.С. Пугачев, Б.Т. Поляк, И.П. Норенков, Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо, Дж. Лэннинг, Р. Бэттин, Д. Ньютон, Л. Гулд, Д. Кайзер, А.А. Фельдбаум, Ю.Л. Муромцев, А.М. Цыкунов, Е.А. Паршева, Е.Л. Еремин, А.З. Асанов и др.

В статье рассмотрены алгоритмы синтеза энергосберегающих управляющих воздействий, применяемые при разработке алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления многомерными технологическими объектами. Предложена методика выбора алгоритма синтеза энергосберегающих управляющих воздействий, учитывающая возможные изменения состояния функционирования многомерного объекта в процессе реальной эксплуатации.

Математическая постановка задачи оптимального управления многомерным объектом на множестве состояний функционирования

Постановку задачи оптимального управления (ЗОУ) динамическими режимами многомерного объекта можно сформулировать, задавая в общем виде:

модель динамики объекта в виде уравнения состояния

$$\frac{d\mathbf{Z}(t)}{dt} = f_1(\mathbf{Z}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{W}(t), t), \quad t \in [t_0, t_k] \quad (1)$$

и уравнения наблюдения

$$\mathbf{Y}(t) = f_2(\mathbf{Z}(t), \mathbf{V}(t), t); \quad (2)$$

границы изменения вектора фазовых координат

$$\mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}^0 \rightarrow \mathbf{Z}(t_k) = \mathbf{Z}^k; \quad (3)$$

ограничения, накладываемые на компоненты вектора управляющих воздействий в каждый момент времени

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \mathbf{U}(t) \in [\mathbf{U}^H, \mathbf{U}^B]; \quad (4)$$

вид минимизируемого функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_3(\mathbf{Z}(t), \mathbf{U}(t), t) dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

В задаче (1)–(5) применяются следующие обозначения $\mathbf{Z}(t) = (Z_1(t), \dots, Z_n(t))^T$ – n -мерный вектор фазовых координат; $\mathbf{U}(t) = (U_1(t), \dots, U_m(t))^T$ – m -мерный вектор управляющих воздействий; $\mathbf{W}(t) = (W_1(t), W_2(t), \dots, W_p(t))^T$ – p -мерный вектор возмущающих воздействий в канале управления; $[t_0, t_k]$ – временной интервал управления; $\mathbf{Y}(t) = (Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_o(t))^T$ – o -мерный вектор выходных перемен-

ных; $\mathbf{V}(t) = (V_1(t), V_2(t), \dots, V_q(t))^T$ – q -мерный вектор возмущающих воздействий в канале измерения; $\mathbf{Z}^0 = (Z_1^0, Z_2^0, \dots, Z_n^0)^T$, $\mathbf{Z}^K = (Z_1^K, Z_2^K, \dots, Z_n^K)^T$ – векторы начальных и конечных значений $\mathbf{Z}(t)$; $\mathbf{U}^H = (U_1^H, U_2^H, \dots, U_m^H)^T$, $\mathbf{U}^B = (U_1^B, U_2^B, \dots, U_m^B)^T$ – границы изменения вектора управляющих воздействий; J – минимизируемый функционал; f_1, f_2, f_3 – функции.

Исходные данные для численного решения ЗОУ (1) – (5) задаются в виде массива \mathbf{R} , который должен включать: параметры модели динамики объекта (параметры функций f_1, f_2); границы временного интервала управления $[t_0, t_K]$; начальное \mathbf{Z}^0 и конечное \mathbf{Z}^K значения вектора фазовых координат; границы изменения вектора управляющих воздействий $\mathbf{U}^H, \mathbf{U}^B$; характеристики возмущающих воздействий в каналах управления и измерения.

Решение ЗОУ (1) – (5) заключается в определении значений компонентов вектора управляющих воздействий $\mathbf{U}^*(t)$, при которых для модели (1), (2), с учетом условий (3) и ограничений (4), достигается минимум функционала (5).

При проектировании СЭУ необходимо учитывать, что в процессе реальной эксплуатации могут происходить изменения параметров технологического процесса, окружающей среды, интенсивности возмущающих воздействий и т.д. Эти изменения влияют на значения компонентов массива исходных данных ЗОУ, поэтому при проектировании СЭУ необходимо рассматривать постановки ЗОУ и решать их на множестве состояний функционирования (МСФ) [1].

При рассмотрении ЗОУ на МСФ используется переменная h , обозначающая текущее состояние функционирования. При этом $h \in \mathbf{H}$, где \mathbf{H} – множество состояний функционирования, т.е. множество возможных значений переменной h . На практике изменение значения переменной h может происходить в случайные моменты времени.

Множество состояний функционирования \mathbf{H} также включает в себя множество состояний работоспособности технических средств объекта управления \mathbf{H}^P , которое содержит состояния с нормальной работоспособностью и с отказами отдельных элементов.

В множестве состояний функционирования \mathbf{H} можно выделить:

1. Подмножество наиболее вероятных состояний функционирования

$$\mathbf{H}_B = \{h_0, h_1, \dots, h_{g_1}\}.$$

2. Подмножество критических состояний функционирования

$$\mathbf{H}_K = \{h_{g_1+1}, \dots, h_{g_2}\}.$$

В подмножество \mathbf{H}_B , как правило, включаются состояния с нормальной

работоспособностью технических средств, а в подмножество \mathbf{H}_K – состояния с отказами. При разработке СЭУ, обеспечивающих решение ЗОУ на МСФ, создается алгоритмическое обеспечение, в состав которого включаются алгоритмы синтеза управляющих воздействий для $h \in \mathbf{H}_B$, а также возможные алгоритмы и действия для $h \in \mathbf{H}_K$.

Следует заметить, что в качестве факторов, непосредственно влияющих на изменение значения переменной состояния функционирования, могут учитываться: изменения температуры окружающей среды, атмосферного давления, влажности, параметров технологического процесса и т.д.

Алгоритмы синтеза управляющих воздействий

На основе результатов анализа ЗОУ разрабатываются алгоритмы синтеза оптимальных управляющих воздействий, которые включаются в состав алгоритмического обеспечения СЭУ. Для синтеза оптимальных управляющих воздействий используются две основные стратегии – программная и позиционная (с обратной связью). В алгоритме синтеза оптимального управления (ОУ) с программной стратегией (*PR*-алгоритм) рассчитывается оптимальная траектория изменения управляющего воздействия $U^*(t) = f^{Pr}(t, \mathbf{R})$, а в алгоритме синтеза ОУ с позиционной стратегией (*PZ*-алгоритм) – определяется синтезирующая функция, устанавливающая связь между управляющим воздействием и выходной переменной с учетом оставшегося времени управления, т.е. $U^*(t) = f^{Pz}(Y(t), t_k - t, \mathbf{R})$. Однако при выработке оптимальных управляющих воздействий на них существенное влияние оказывают шумы в каналах управления и измерения, что приводит к неточной реализации ОУ и снижению вероятности достижения цели управления.

Для снижения влияния шумов в канале измерения применяется алгоритм синтеза ОУ с оптимальной фильтрацией (*FK*-алгоритм), который является разновидностью *PZ*-алгоритма. При этом в формулу расчета управляющего воздействия вместо значения выходной переменной $Y(t)$ подставляется оценка фазовой координаты $\hat{Z}(t)$, получаемая при помощи фильтра Калмана.

Для снижения влияния шумов в канале управления и повышения точности реализации управляющих воздействий применяется алгоритм управления с прогнозирующей моделью (*PM*-алгоритм). При этом в качестве стратегии реализации управления может быть использована как позиционная, так и программная. Прогнозирующая модель выбирается с учетом требуемой точности прогнозирования и возможности ее использования управляющим устройством.

При аналитическом конструировании оптимальных регуляторов возникают серьезные трудности выбора весовых коэффициентов для обеспечения выполне-

ния интегрального ограничения на управляющее воздействие, т.е. если требуется не перерасходовать выделенный лимит энергии или запас топлива. С учетом этого возникла необходимость создания алгоритма аналитического конструирования оптимальной программы управления (*AK*-алгоритма), позволяющего обеспечивать различные ограничения на управление и фазовые координаты. В качестве оптимального управления используется функция вида [2]

$$U^*(t) = \begin{cases} \alpha_{ак} U_6^*(t) + (1 - \alpha_{ак}) U_3^*(t), & t \in [t_0, t_{п}], \\ U_{эК}^*(t), & t \in (t_{п}, t_{к}], \end{cases}$$

где $U_6^*(t)$ – управление, получаемое при решении задачи оптимального быстрого действия; $U_3^*(t)$ – оптимальное управление при решении задачи минимизации затрат энергии; $U_{эК}^*(t)$ – скорректированное оптимальное управление задачи с интервалом времени $(t_{п}, t_{к}]$; $\alpha_{ак}$ и $t_{п}$ – параметры настройки управления.

В процессе реальной эксплуатации параметры объекта управления могут иметь некоторую неопределенность, связанную с возможным влиянием случайных возмущений, изменениями состояния функционирования объекта и т.д. Каждое состояние объекта однозначно определяется вектором синтезирующих переменных Λ . При этом на практике траектория изменения вектора синтезирующих переменных может отклоняться от расчетной. Отклонение вектора синтезирующих переменных обозначим $\Delta\Lambda = |\Lambda - \Lambda_p|$, где Λ_p – расчетное значение вектора синтезирующих переменных.

Для снижения влияния параметрических возмущений используется интеллектуальный алгоритм синтеза ОУ на основе нечеткой логики (*FL*-алгоритм), в котором за счет весового коэффициента выбирается оптимальное сочетание стратегий управления по следующей формуле [3]:

$$U(t) = \alpha_f U^{pz}(t) + (1 - \alpha_f) U^{pr}(t),$$

где $U^{pz}(t)$, $U^{pr}(t)$ – функции ОУ при позиционной и программной стратегиях управления; α_f – весовой коэффициент, подбираемый с использованием теории нечетких множеств в зависимости от отклонения значений вектора синтезирующих переменных от расчетных.

От влияния параметрических возмущений в значительной мере зависит вероятность достижения цели управления. Поэтому часто при решении ЗОУ (в случае отклонения параметров модели в заданных допустимых пределах) требуется за счет изменения некоторых ограничений задачи гарантированно получать решение ЗОУ. Для обеспечения гарантированного решения ЗОУ используется алгоритм робастного управления (*RB*-алгоритм) [4]. Под робастным управлением понимается такое управление, при котором обеспечивается основная цель управле-

ния с соблюдением строгих ограничений за счет отклонения от нестрогих. Например, в некоторых случаях для достижения цели управления расширяется временной интервал управления $t \in [t_0, t_k + t^r]$, где t^r – время, на которое увеличивается временной интервал. Основные этапы *RB*-алгоритма:

1) имитационное моделирование и расчет статистических характеристик параметров модели при наличии случайных возмущений;

2) исследование области существования решения ЗОУ;

3) расчет показателя робастности $P^r = \frac{N_{sum} - N_o}{N_{sum}}$,

где N_{sum} – объем выборки (количество опытов, проведенных на этапе имитационного моделирования); N_o – количество точек, выходящих за границы области существования ЗОУ;

4) если показатель робастности $P^r < 1$, то осуществляется пересчет временного интервала управления и повторно выполняются этапы 1 – 3.

Рассмотренные алгоритмы управления используются в основном для решения ЗОУ применительно к отдельным зонам многомерных объектов. Решение общей ЗОУ многомерным объектом имеет некоторые особенности, связанные с необходимостью учета взаимного влияния зон объекта друг на друга. Для решения этой задачи используется алгоритм адаптивного управления (*АС*-алгоритм) [5], включающий следующие этапы:

1) на основе результатов анализа ЗОУ путем подбора оптимального значения t_i^K рассчитываются оптимальные программы управления для каждой зоны объекта $U_i^*(t)$, $i = \overline{1, n}$;

2) определяется максимальное конечное время разогрева $t_{max}^K = \max \{t_i^K\}$;

3) вычисляются времена начала разогрева для каждой секции, относительно максимального времени: $t_i^H = t_{max}^K - t_i^K$;

4) получившееся в результате множество программ $\{U_1^*(\bullet), U_2^*(\bullet), \dots, U_n^*(\bullet)\}$, реализуемых на рассчитанных интервалах времен $[t_i^H, t_{max}^K]$, позволяет минимизировать функционал по всем зонам совместно и обеспечивает выполнение условия $t_1^K = t_2^K = \dots = t_n^K$, которое дает возможность обеспечить одновременное завершение динамических режимов во всех зонах многомерного объекта.

Методика выбора оптимального алгоритма синтеза управляющих воздействий

Рассмотренные алгоритмы синтеза ОУ являются основой для разработки алгоритмического обеспечения СЭУ, однако для синтеза управляющих воздейст-

вий в условиях реальной эксплуатации необходимо решить задачу выбора наиболее подходящего алгоритма синтеза ОУ в зависимости от текущего состояния функционирования объекта. Решение задачи заключается в выборе наилучшего алгоритма синтеза управляющих воздействий $AC_i, i = \overline{1, N_{AC}}$ для каждого из возможных значений переменной состояния функционирования объекта $h \in \mathbf{H}$. В качестве критериев сравнения алгоритмов используются минимум значения функционала J и точность достижения цели управления для заданной постановки ЗОУ $CP_j, j = \overline{1, N_{CP}}$ и массива исходных данных $R_k, k = \overline{1, N_R}$.

Предлагается методика выбора алгоритма синтеза управляющих воздействий, основанная на совместном применении методов имитационного моделирования и теории планирования эксперимента, включающая следующие этапы:

- 1) составление плана эксперимента, варьируемыми переменными в котором являются CP_j, R_k и AC_i ;
- 2) задание объема выборки, т.е. числа экспериментов, проводимых для конкретных CP_j, R_k, AC_i ;
- 3) проведение численных экспериментов, по результатам которых определяются значение функционала и точность достижения цели управления для конкретных CP_j, R_k, AC_i ;
- 4) сопоставление алгоритмов управления AC_i ;
- 5) составление таблицы, в которой для конкретных CP_j и R_k указываются предпочтительные алгоритмы синтеза управляющих воздействий AC_i .

В дальнейшем на основе составленных таблиц разрабатываются продукционные правила, включаемые в базу знаний СЭУ, по которым осуществляется выбор наиболее подходящего алгоритма синтеза ОУ для текущего состояния функционирования объекта управления в процессе реальной эксплуатации.

Практический пример

Рассмотрим практический пример применения разработанной методики для разработки алгоритмического обеспечения СЭУ динамическими режимами многосекционной конвективной сушильной установки вальце-ленточного типа (СВЛ), применяемой для сушки пастообразных материалов [6]. Сушильную установку можно рассматривать как многомерный объект, в котором в качестве управляющих воздействий используются степени открытия клапанов подачи пара в калориферы, а в качестве фазовых координат – значения температур в каждой секции СВЛ. Влияние соседних секций друг на друга, возникающее вследствие разницы температур, можно рассматривать как возмущающие воздействия.

В результате структурной идентификации были определены оптимальные структуры моделей динамики для различных секций СВЛ по критерию минимума абсолютной погрешности модели.

Структура модели динамики СВЛ выглядит следующим образом:

$$\mathbf{M} = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}, \quad M_1 : \text{ДА} + \text{ДА}, \quad M_2 : \text{РДИ} + \text{А} + \text{А}, \\ M_3 : \text{ДИ} + \text{А} + \text{А}, \quad M_4 : \text{ДА} + \text{ДА}, \quad M_5 : \text{ДА} + \text{РДИ},$$

где $M_i, i = \overline{1,5}$ – модели отдельных секций СВЛ; А – апериодическое звено; ДА – двойное апериодическое звено; ДИ – двойной интегратор; РДИ – реальный двойной интегратор.

Следует заметить, что в результате перехода с одной стадии на другую могут изменяться параметры модели и размерность вектора фазовых координат.

Рассмотрим особенности определения состояний функционирования для пятисекционной СВЛ. В качестве факторов, оказывающих влияние на значение переменной h , можно выделить: внутренние факторы, связанные с возможными изменениями структуры и параметров моделей динамики секций СВ ($H_i^{\text{мд}}, i = \overline{1,5}$); внешние факторы, в том числе: $H^{\text{дп}}$ – возможные изменения давления пара, подаваемого в калориферы секций СВЛ; $H^{\text{тс}}$ – возможные изменения температуры окружающей среды. Элементы подмножества $H_i^{\text{мд}}, i = \overline{1,5}$ могут принимать два или три состояния, в зависимости от вида и параметров модели j -й стадии i -й секции: $H_1^{\text{мд}} = \{\hbar_{1,1}^{\text{мд}}, \hbar_{1,2}^{\text{мд}}\}$, $H_2^{\text{мд}} = \{\hbar_{2,1}^{\text{мд}}, \hbar_{2,2}^{\text{мд}}, \hbar_{2,3}^{\text{мд}}\}$, $H_3^{\text{мд}} = \{\hbar_{3,1}^{\text{мд}}, \hbar_{3,2}^{\text{мд}}, \hbar_{3,3}^{\text{мд}}\}$, $H_4^{\text{мд}} = \{\hbar_{4,1}^{\text{мд}}, \hbar_{4,2}^{\text{мд}}\}$, $H_5^{\text{мд}} = \{\hbar_{5,1}^{\text{мд}}, \hbar_{5,2}^{\text{мд}}\}$.

Здесь и далее символ « \hbar » обозначает возможные значения переменной h .

Составляющую переменной h , связанную с подмножеством $H_i^{\text{мд}}$, можно представить в виде следующего кортежа: $H^{\text{мд}} = \langle \hbar_1^{\text{мд}}, \hbar_2^{\text{мд}}, \hbar_3^{\text{мд}}, \hbar_4^{\text{мд}}, \hbar_5^{\text{мд}} \rangle$, где $\hbar_i^{\text{мд}}, i = \overline{1,5}$ – компонент $H^{\text{мд}}$, обозначающий определенную структуру и параметры модели i -й секции.

По результатам проведенных замеров давление пара, подаваемого в калориферы секций СВЛ, может изменяться в пределах 2 – 4 атм. В связи с этим возможно выделение трех основных состояний: $\hbar_{\text{н}}^{\text{дп}} \leq 2,5$ атм. (низкое давление пара), $\hbar_{\text{о}}^{\text{дп}} \in (2,5; 3,5)$ атм. (оптимальное давление) и $\hbar_{\text{в}}^{\text{дп}} \geq 3,5$ атм. (высокое давление), а подмножество $H^{\text{дп}}$ можно записать в виде $H^{\text{дп}} = \{\hbar_{\text{н}}^{\text{дп}}, \hbar_{\text{о}}^{\text{дп}}, \hbar_{\text{в}}^{\text{дп}}\}$.

Для учета сезонных колебаний температуры окружающей среды можно использовать обозначения: зимняя температура – $\hbar_{\text{з}}^{\text{тс}} \leq 10^\circ\text{C}$; весенняя и осенняя – $\hbar_{\text{во}}^{\text{тс}} \in (10; 20)^\circ\text{C}$; летняя – $\hbar_{\text{л}}^{\text{тс}} \geq 20^\circ\text{C}$, т.е. $H^{\text{тс}} = \{\hbar_{\text{л}}^{\text{тс}}, \hbar_{\text{во}}^{\text{тс}}, \hbar_{\text{з}}^{\text{тс}}\}$.

Помимо рассмотренных факторов, на изменение значения переменной состояния функционирования существенное влияние могут оказывать возмущающие воздействия. Соответствующее подмножество H_i^{HSH} может принимать четыре состояния: \hbar_0^{HSH} – возмущающими воздействиями можно пренебречь, \hbar_y^{HSH} – возмущение по каналу управления, $\hbar_{\text{и}}^{\text{HSH}}$ – возмущение по каналу измерения, $\hbar_{\text{иу}}^{\text{HSH}}$ – возмущения по каналам измерения и управления, т.е.

$$H_i^{\text{HSH}} = \{\hbar_0^{\text{HSH}}, \hbar_y^{\text{HSH}}, \hbar_{\text{и}}^{\text{HSH}}, \hbar_{\text{иу}}^{\text{HSH}}\}.$$

Составляющая переменной состояния функционирования, связанная с H_i^{HSH} представляет собой кортеж $\langle \hbar_1^{\text{HSH}}, \hbar_2^{\text{HSH}}, \hbar_3^{\text{HSH}}, \hbar_4^{\text{HSH}}, \hbar_5^{\text{HSH}} \rangle$, где $\hbar_i^{\text{HSH}}, i = \overline{1,5}$ – компонент кортежа для i -й секции СВЛ.

В общем виде МСФ для динамических режимов СВЛ можно записать следующим образом:

$$\mathbf{H}^{\text{Д}} = H_1^{\text{МД}} \times H_2^{\text{МД}} \times H_3^{\text{МД}} \times H_4^{\text{МД}} \times H_5^{\text{МД}} \times H^{\text{ДП}} \times H^{\text{ТС}} \times H_1^{\text{HSH}} \times H_2^{\text{HSH}} \times H_3^{\text{HSH}} \times H_4^{\text{HSH}} \times H_5^{\text{HSH}}.$$

При изменении значения переменной состояния функционирования h происходит изменение одного или нескольких компонентов массива исходных данных ЗОУ. В частности, при изменении компонента h , связанного с подмножеством $H^{\text{МД}}$, происходит изменение структуры и параметров модели динамики объекта; при изменении давления пара ($H^{\text{ДП}}$) – изменение верхней границы управления и временного интервала; при изменении температуры окружающей среды ($H^{\text{ТС}}$) – изменение начального значения вектора фазовых координат.

С помощью методики, рассмотренной в предыдущем пункте, была сформирована таблица, которая легла в основу разработки продукционной базы знаний СЭУ динамическими режимами СВЛ [7].

| Состояние функционирования | Значения компонентов h | | | | Алгоритм |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------|
| | $H^{\text{МД}}$ | $H^{\text{ДП}}$ | $H^{\text{ТС}}$ | H^{HSH} | |
| h_0 | $\hbar_{\text{ДА}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{О}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_{\text{Л}}^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{О}}^{\text{HSH}}$ | PR |
| h_1 | $\hbar_{\text{ДА}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{Н}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_3^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{иу}}^{\text{HSH}}$ | FL |
| h_2 | $\hbar_{\text{А}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{О}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_{\text{ВО}}^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{и}}^{\text{HSH}}$ | FK |
| h_3 | $\hbar_{\text{РДИ}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{В}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_{\text{ВО}}^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{у}}^{\text{HSH}}$ | PM |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| $h_{g_{1-1}}$ | $\hbar_{\text{А}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{Н}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_{\text{Л}}^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{О}}^{\text{HSH}}$ | PZ |
| h_{g_1} | $\hbar_{\text{ДИ}}^{\text{МД}}$ | $\hbar_{\text{О}}^{\text{ДП}}$ | $\hbar_{\text{Л}}^{\text{ТС}}$ | $\hbar_{\text{иу}}^{\text{HSH}}$ | $PM+FK$ |

Заключение

В статье рассмотрены алгоритмы синтеза энергосберегающих управляющих воздействий и методика выбора оптимального алгоритма синтеза, учитывающая возможные изменения состояния функционирования многомерного объекта в процессе реальной эксплуатации. Приведен практический пример разработки алгоритмического обеспечения СЭУ динамическими режимами многосекционной сушильной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муромцев Ю.Л., Ляпин Л.Н., Попова О.В. Моделирование и оптимизация сложных систем при изменениях состояния функционирования. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992.
2. Артемова С.В., Грибков А.Н., Муромцев Д.Ю. Информационная технология аналитического конструирования энергосберегающего управления // Информационные системы и процессы. – Тамбов – Москва – С.-Петербург – Баку – Вена: Изд-во «Нобелистика», 2004. – С.48-52.
3. Артемова С.В., Грибков А.Н. Информационная технология анализа и синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики // Информационные системы и процессы. – Тамбов – Москва – С.-Петербург – Баку – Вена: Изд-во «Нобелистика», 2003. – С.165-169.
4. Артемова С.В., Грибков А.Н. Система робастного энергосберегающего управления процессами нагрева // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – №5. – С.31-34.
5. Грибков А.Н., Артемова С.В. Алгоритм ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок // Известия Томского политех. ун-та. – 2008. – Т.313, №4. – С. 48-50.
6. Артемова С.В., Грибков А.Н. Математическая модель многосекционной сушильной установки на множестве состояний функционирования // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т.12, №4А. – С.969-974.
7. Грибков А.Н. Информационно-управляющая система динамическими режимами в многосекционных сушильных установках // Информатика и системы управления. – 2009. – №2(20). – С.123-129.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Муромцев Дмитрий Юрьевич – crems@crems.jesby.tstu.ru;

Грибков Алексей Николаевич – GribkovAlexey@yandex.ru;

Шамкин Валерий Николаевич – crems@crems.jesby.tstu.ru.