

УДК 681.513.6 + 621.31:681.513.6

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ МНОГОЗОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Е.В. Вставская

В работе рассматривается метод построения адаптивных систем многозонального управления энерготехнологическими объектами на базе оценки зональных характеристик в порядковых шкалах. Предложенный метод позволяет повысить энергетическую эффективность систем управления, что является перспективным направлением в области энергосбережения в настоящее время.

Ключевые слова: адаптивное многозональное управление, порядковые шкалы, дискриминантная функция, энерготехнологический объект, оценка качества.

Перспективным направлением развития энерготехнологических комплексов в настоящее время является их построение в виде адаптивных реконфигурируемых структур, позволяющих решать задачи энергосбережения и надежности при нестационарных режимах работы. Данные направления определены как перспективные в Федеральном законе от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные Законодательные акты Российской Федерации», п.24 «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2012 г. № 96).

Указанное направление развития представляет собой серьезную техническую проблему не только с энергетической точки зрения, но и с точки зрения построения адаптивных систем управления указанными энерготехнологическими объектами [1].

Распределенный энерготехнологический объект представляет собой многосвязный объект с распределенными параметрами [2]. Особенностью управления таким объектом является то, что каждая выходная величина характеризуется не конкретным значением, а некоторой зоной распределения значений, представленной в виде зональной характеристики. Управление распределенным энерготехнологическим объектом осуществляется с помощью изменения вектора входных управляющих воздействий. Причем изменение даже одного управляющего воздействия из распределенного набора приводит к изменению всех выходных зональных характеристик. Поэтому необходимо говорить о многозональном управлении, формирующем вектор входных управляющих воздействий на основании анализа выходных зональных характеристик и внешних условий.

В общем случае распределенный энерготехнологический объект можно представить структурной схемой, представленной на рис. 1.

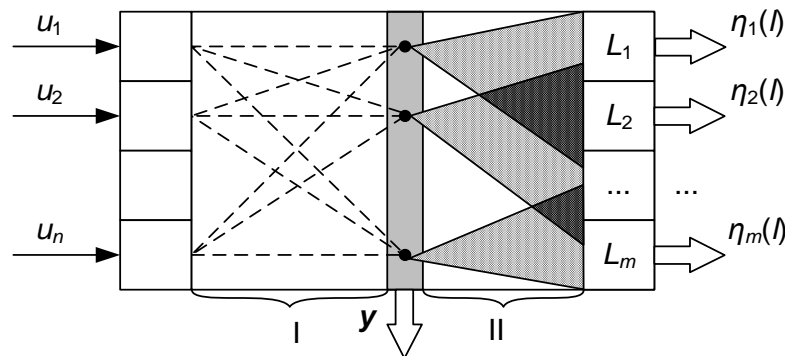


Рис. 1. Структура распределенного энерготехнологического объекта

$\mathbf{u} = (u_1; u_2; \dots; u_n)^T$ – вектор силовых управляющих воздействий;
 \mathbf{y} – вектор измеряемых режимных параметров; l – пространственная характеристика зон; L_i – метрическая область i -ой зоны;
 $\boldsymbol{\eta}(l) = (\eta_1(l); \eta_2(l); \dots; \eta_m(l))^T$ – вектор режимных параметров.

В общем случае распределенный энерготехнологический объект можно представить в виде двух областей. Область I определяет взаимосвязь между силовыми управляющими воздействиями и измеряемыми режимными параметрами. Данная область характеризуется связями с сосредоточенными параметрами. Область II характеризуется связями с распределенными параметрами. Она определяет воздействие режимных параметров на формирование распределенных зональных характеристик.

Система многозонального управления распределенным энерготехнологическим объектом содержит два контура регулирования (рис. 2).

Внутренний контур автоматического регулирования обеспечивает точное слежение режимных параметров объекта \mathbf{y} за оптимальным значением \mathbf{y}_0 . Внешний контур оперативного регулирования на основе оперативного принятия решений по оптимизации режимных параметров объекта задает оптимальные значения режимных параметров \mathbf{y}_0 на основе анализа показателей качества технологического процесса на объекте в порядковых шкалах.

Для оценки качества многозонального энерготехнологического объекта вводятся качественные показатели, принимающие значения на множестве порядковых оценок, например:

$$p_i \in H, \quad H = \{\text{отлично; хорошо; допустимо; недопустимо}\}, \quad i \in I_Z, \quad (1)$$

где I_Z – индексное множество зон.

Метод принятия эффективных решений в порядковых шкалах основан на введении зональных дискриминантных функций качества в форме:

$$q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) \geq 0, \quad i \in I_Z, \quad (2)$$

где \mathbf{a}_i – вектор структурных параметров дискриминантной функции; \mathbf{y} – вектор режимных параметров объекта.

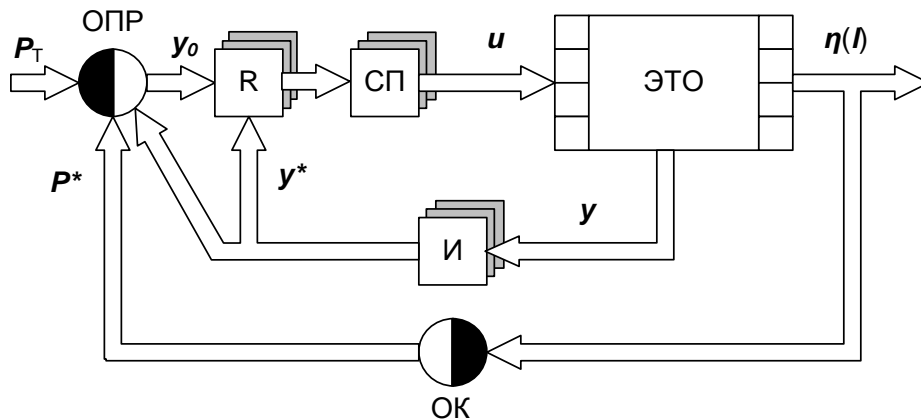


Рис. 2. Система многозонального управления распределенным энерготехнологическим объектом: ЭТО – энерготехнологический объект; СП – силовые преобразователи; И – измерители; R – локальные регуляторы; ОК – оперативный контроль; ОПР – оперативное принятие решений

Порядковые оценки связаны с дискриминантными функциями неравенствами. Например, для порядковых оценок (1) оценочные неравенства имеют вид:

$$\begin{aligned}
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) \geq q_{отл} &\Rightarrow p_i = \langle отл \rangle, \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) \geq q_{хор} &\Rightarrow p_i = \langle хор \rangle, \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) \geq q_{дон} &\Rightarrow p_i = \langle дон \rangle, \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) < q_{дон} &\Rightarrow p_i = \langle нд \rangle.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Дискриминантные функции определяются базовыми граничными значениями $q_{отл}$, $q_{хор}$, $q_{дон}$. В общем случае порядковая градация качества режимных параметров распределенного энерготехнологического объекта может быть другой.

Задача идентификации дискриминантных функций формулируется на основе данных эксплуатации, представленных в виде протоколов

$$(\mathbf{y}_s, \{p_{is}\}), \quad s \in S, \tag{4}$$

где S – индексное множество протоколов с данными эксплуатации.

В соответствии с данными эксплуатации составляется система неравенств:

$$\begin{cases}
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) \geq q_{отл}, & s \in S_{отл} \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) \geq q_{хор}, & s \in S_{хор} \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) \geq q_{дон}, & s \in S_{дон} \\
 q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) < q_{дон}, & s \in S_{нд}; \quad i \in I_Z.
 \end{cases} \tag{5}$$

Для решения системы неравенств (5) определяем квадратичную невязку решения:

$$Q_i = \sum_{s \in S_{oml}} (q_{oml} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \sum_{s \in S_{xop}} (q_{xop} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \quad (6)$$

$$+ \sum_{s \in S_{don}} (q_{don} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \sum_{s \in S_{no}} (q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) - q_{don})^{+2} \rightarrow \min$$

где индекс «+» означает, что рассматриваются только положительные компоненты, отрицательные компоненты обнуляются.

При совместном решении системы неравенств (5) по критерию (6) возникает вопрос о сходимости решения. Поскольку данные эксплуатации могут быть неполными, решение системы неравенств (5) может быть неоднозначным. В этом случае отсутствует сходимость рекуррентных алгоритмов минимизации невязки (6). С целью обеспечения сходимости рекуррентных алгоритмов минимизации невязки (6) вводится дополнительное условие:

$$\|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{iH}\|^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где \mathbf{a}_{iH} – номинальное значение вектора структурных параметров i -ой дискриминантной функции. Номинальное значение вектора структурных параметров \mathbf{a}_{iH} определяется на основе специальных исследований номинальных режимов работы энерготехнологического объекта при наладке автоматизированной системы управления. Введение дополнительного условия (7) осуществляет регуляризацию постановки задачи минимизации квадратичной невязки (6) решения системы неравенств (5).

С учетом составляющей регуляризации (7) целевая функция при решении задачи идентификации будет иметь вид:

$$Q_i = \sum_{s \in S_{oml}} (q_{oml} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \sum_{s \in S_{xop}} (q_{xop} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \quad (8)$$

$$+ \sum_{s \in S_{don}} (q_{don} - q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s))^{+2} + \sum_{s \in S_{no}} (q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}_s) - q_{don})^{+2} + \lambda \|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{iH}\|^2 \rightarrow \min$$

Для минимизации целевой функции (8) можно использовать рекуррентное соотношение градиентного метода:

$$\mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{a}_{i,k-1} + \lambda(\mathbf{a}_{i,k-1} - \mathbf{a}_{Hi}) + \gamma \left(\sum_{s \in S_{oml}} (q_{oml} - q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s))^{+} \nabla q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s) + \right.$$

$$+ \sum_{s \in S_{xop}} (q_{xop} - q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s))^{+} \nabla q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s) + \sum_{s \in S_{don}} (q_{don} - q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s))^{+} \times$$

$$\left. \times \nabla q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s) - \sum_{s \in S_{no}} (q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s) - q_{don})^{+} \nabla q_i(\mathbf{a}_{i,k-1}; \mathbf{y}_s) \right), \quad (9)$$

где γ, λ – коэффициенты релаксации, $\gamma \geq 0, \lambda \geq 0, \gamma + \lambda = 1$.

Коэффициенты релаксации выбираются из условия сходимости рекуррентной процедуры (9). При указанных условиях рекуррентная процедура (9) сходится к искомому решению задачи идентификации.

Нахождение оптимальных значений режимных параметров нестационарного энерготехнологического объекта осуществляется на основе последовательного решения двух задач. На первом этапе решается задача оптимального построения области допустимых значений режимных параметров в порядковых шкалах. Данная задача сводится к нахождению максимально совместных подсистем взвешенных неравенств, определяемых дискриминантными функциями. На втором этапе в построенной области допустимых значений режимных параметров определяется оптимальное значение параметров по критерию минимума потребления энергии. Более подробно решение указанной задачи изложено в [2, 3].

В итоге будет получено значение вектора режимных параметров, которое обеспечивает для подмножества наиболее важных зон энерготехнологического объекта уставку с порядковой оценкой «отлично». Для менее важного подмножества зон обеспечивается порядковая оценка качества «хорошо», для наименее критичного подмножества зон – порядковая оценка качества «допустимо».

В целом решаемая задача формирует эффективную область допустимых значений режимных параметров энерготехнологического объекта.

Постановка задачи оптимизации режимных параметров многозонального энерготехнологического объекта основана на использовании критерия минимума энергетических затрат на управление. Данный критерий можно сформулировать, например, в следующем виде:

$$C_E = \|\mathbf{u}\|^2, \quad (10)$$

где \mathbf{u} – вектор силовых управляющих воздействий.

Искомое решение – вектор оптимальных значений \mathbf{y}_{opt} режимных параметров \mathbf{y} . Для решения данной задачи необходимо определить зависимость вектора силовых управляющих воздействий \mathbf{u} от уставок \mathbf{y}_0 автоматической системы регулирования значений режимных параметров \mathbf{y} (рис. 2). Данная зависимость является статической, поскольку динамика процесса регулирования определяется при проектировании указанной следящей системы. Дополнительные энергетические потери, возникающие вследствие динамики процесса регулирования, минимизируются повышением точности автоматической системы регулирования, которая обеспечивается известными методами.

С учетом сказанного для решения поставленной задачи необходимо определить зависимость

$$\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y}). \quad (11)$$

Зависимость (11) может быть получена экспериментально на основе обработки статистики наблюдений за поведением автоматической системы регулирования режимных параметров энерготехнологического объекта.

В результате постановка задачи оптимизации будет иметь следующий вид:

$$\min_{\mathbf{y}} C_E(\mathbf{u}), \quad \mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y}) \quad (12)$$

$$\begin{cases} q_i(\mathbf{y}) \geq q_{oml}, & i \in I_Z^{oml} \\ q_i(\mathbf{y}) \geq q_{xop}, & i \in I_Z^{xop} \\ q_i(\mathbf{y}) \geq q_{don}, & i \in I_Z^{don}. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь ограничения (13) представляют собой решение задачи формирования эффективной области допустимых значений режимных параметров.

Задача (12)–(13) является типовой задачей математического программирования и решается известными методами, изложенными, например, в [4].

Особенностью функциональных характеристик многозональных энерготехнологических объектов является наличие областей с сосредоточенными параметрами и областей с параметрами, распределенными по зонам. Вследствие сложности определения характеристик областей с параметрами, распределенными по зонам, оперативное управление подобными объектами представляет серьезную проблему. Одним из подходов к решению данной проблемы является применение методов управления, основанных на использовании порядковых оценок качества.

Библиографический список

1. Вставская, Е.В. Построение систем управления сложными комплексами наружного освещения / Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 14. – № 23 (240). – С. 98–102.

2. Вставская, Е.В. Метод адаптивного многозонального управления энерготехнологическими объектами в порядковых шкалах / Е.В. Вставская, Л.С. Казаринов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13. – № 4. – С. 94–102.

3. Вставская, Е.В. Комитетный метод настройки технологических процессов в порядковых шкалах / Е.В. Вставская, Л.С. Казаринов // Приборостроение: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 117–120.

4. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление (когнитивный подход): научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

[К содержанию](#)