

СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ*

Н. Г. Чернышов¹, С. И. Дворецкий²

Кафедры: «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем» (1); n-c-h@rambler.ru; «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

Ключевые слова: когнитивная графика; множество состояний функционирования; синтез; система управления; энергосберегающее управление.

Аннотация: Рассмотрена задача синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами с применением методов когнитивной графики. Выполнена декомпозиция общей задачи синтеза системы оптимального энергосберегающего управления. Показано, что методы и средства когнитивной графики обеспечивают визуализацию и оперативность решения задач синтеза энергосберегающего управления. Представление результатов синтеза оптимального управления в виде когнитивных графических образов на множестве состояний функционирования, сформированных в адресном пространстве постоянного запоминающего устройства, позволяет сократить время вычисления управляющих воздействий, уменьшить стоимость и повысить эффективность функционирования систем энергосберегающего управления, а также предоставляет разработчику широкий набор возможных вариантов построения системы управления.

Введение

Дороговизна и дефицит энергоресурсов в современном мире становятся одними из основных сдерживающих факторов развития экономики. Это способствует активному поиску новых подходов к проектированию энергоемкого оборудования и систем управления им. Исследования показывают, что экономия энергоресурсов при оптимальном управлении (ОУ) динамическими режимами таких объектов может составлять от 4 до 30 % [1]. Несмотря на прогресс в развитии современной электроники, стремление сделать системы энергосберегающего управления предельно компактными и легко интегрируемыми в штатную систему управления, разработчикам приходится сталкиваться с рядом требований, которые ограничивают потенциал применения подобных устройств. В первую очередь к таким требованиям относится значительный объем вычислений, проводимых устройством управления в масштабе реального времени. Одним из эффективных путей сокращения количества вычислений является использование методов когнитивной графики [2, 3], которые обеспечивают визуализацию сложных задач, повышают оперативность нахождения их решения в процессе разработки системы управления и во время ее эксплуатации. Полномасштабный анализ оптимального управления

* По материалам доклада на конференции ММТТ-27 (см. Вестник ТГТУ, т. 20, № 4).

динамикой объекта позволяет определить синтезирующие переменные и в их пространстве построить когнитивный графический образ, а также выполнить декомпозицию задачи синтеза системы оптимального энергосберегающего управления [4].

Постановка задачи оптимального управления

Математический аппарат синтеза энергосберегающего управления включает методы анализа множества состояний функционирования объекта в динамике [5], оптимального управления линейными объектами; оперативного синтеза ОУ для линейных объектов с запаздыванием и при изменении массива реквизитов задачи оптимального управления в случайные моменты времени [4]. Основой всего математического аппарата является методология анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования (МСФ) [5].

В результате решения традиционной задачи ОУ требуется определить управление

$$u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]), \quad (1)$$

которое обеспечивает перевод объекта из начального состояния z^0 в конечное z^k и доставляет минимум функционалу затраченной энергии. Задачу оптимального управления можно записать в виде кортежа из четырех символов

$$T = \langle M, J_E, S, O \rangle, \quad (2)$$

где M – модель динамики объекта; J_E – вид минимизируемого функционала; S – стратегия реализации оптимального управления (программная или позиционная) и O – характерные ограничения и связи.

Для решения задачи ОУ, то есть определения конкретного вида функций ОУ $u^*(t)$, а также значений $z^*(t)$, $t \in [t_0, t_k]$ и $J_E^* = J_E(u^*)$ необходимо задать исходные данные (реквизиты)

$$R = f(A, B, C, \Theta, u_0, u_1, z^0, z^k, t_0, t_k), \quad (3)$$

где A, B, C – массивы параметров модели объекта (при z, u, w); Θ – массив времен запаздывания по каналам u и w ; w – возмущающее воздействие; u_0, u_1 – нижнее и верхнее граничные значения интервала изменения управляющего воздействия соответственно.

Если на интервале времени $[t_0, t_k]$ четверка T и значения массива R остаются неизменными, то будем говорить, что задача оптимального управления (2) с массивом (3) соответствует одному состоянию функционирования h . Данное обстоятельство отражается индексом h у соответствующих обозначений J_h, R_h, A_h и др.

В процессе эксплуатации конкретного объекта вследствие изменения работы технических средств, смены производственных ситуаций могут изменяться как отдельные компоненты модели задачи оптимального управления, например J_E и S , так и значения составляющих массива R . Эти изменения в J_E и R соответствуют смене значений переменной h [5]. Возможные значения переменной h , которым соответствуют различные модели задачи оптимального управления и значения массива R применительно к конкретному объекту управления в процессе его эксплуатации, образуют множество состояний функционирования H_0 . В общем случае множество H_0 можно записать как декартово произведение

$$H_0 = M \times J_E \times S \times O \times R, \quad (4)$$

где M, J_E, S, O, R – множества различных моделей динамики объекта, видов функционала, стратегий управления, ограничений и значений массива R соответственно.

Декомпозиция задачи синтеза системы оптимального энергосберегающего управления

В общем случае под синтезом понимается процесс создания новой системы управления с оптимизацией ее свойств и показателей. Выделим две группы задач синтеза системы оптимального энергосберегающего управления (СОЭУ). К первой группе относятся задачи синтеза ОУ, результатом решения которых являются соотношения для оперативного расчета энергосберегающих управляющих воздействий, которые составляют основу алгоритмического обеспечения СОЭУ. Ко второй – задачи синтеза устройств энергосберегающего управления, в том числе выбор стратегии ОУ, структуры СОЭУ и т.д. [6]. При решении перечисленных задач используются результаты полного анализа задачи ОУ (2), представленные в виде когнитивных графических образов и видов оптимального управления.

Задача синтеза СОЭУ для конкретного объекта представляет собой наукоемкий проект, включающий в себя ряд сложных подзадач. Сформулируем кратко данную задачу: требуется определить такие $f_j(v^*) \in F$, $v^* \in V$ на МСФ объекта $h_j \in F$, которые обеспечили бы решение задачи ОУ (2) и максимальную экономическую эффективность s системы:

$$s = \sum_{j=1}^7 f_j(v^*) \rightarrow \max, \quad V = \{v_1, v_1, \dots, v_n\}, \quad (5)$$

где f_j – одна из подзадач синтеза системы F ; V – множество альтернативных вариантов v_j применительно к рассматриваемой разработке; v^* – наилучший вариант.

Альтернативные варианты могут относиться к разработке в целом, отдельным частям, а также выполнению работ на разных этапах. При реализации вариантов $v \in V$ могут возникать различные ситуации, вероятности которых иногда приближенно известны. На основании имеющейся экспертной информации принимается решение о наилучшем варианте $v^* \in V$, с учетом ограничений, заданных на этапе предпроектного исследования.

На рисунке 1 приведена декомпозиция общей задачи синтеза СОЭУ на основные подзадачи.

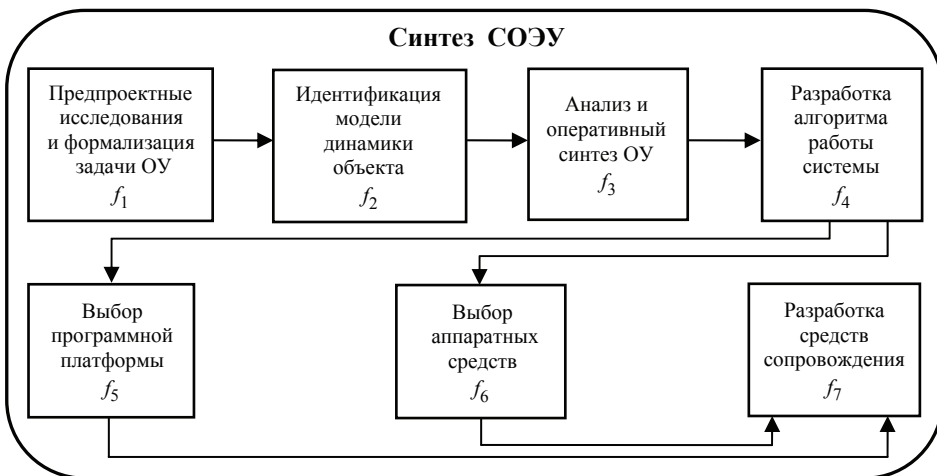


Рис. 1. Основные подзадачи разработки, внедрения и сопровождения СОЭУ

В целях формализации задачи (2) проводятся предпроектные исследования, то есть определяются свойства объекта, его особенности при реальной эксплуатации, выдвигаются гипотезы о возможном виде минимизируемого функционала и стратегиях реализации ОУ, рассматриваются ограничения на изменение фазовых координат и управляющие воздействия. По результатам исследований в общем виде записывается математическая постановка задачи (2).

Важным этапом синтеза систем энергосберегающего управления является идентификация моделей динамики. Задача данной идентификации в общем случае формулируется следующим образом: по результатам измеренных значений входных x и выходных y переменных объекта должна быть получена оптимальная в некотором смысле или допустимая по величине погрешности модель, пригодная для решения задач анализа и синтеза оптимального управления на МСФ. В зависимости от конкретной ситуации возможны различные постановки частных задач идентификации [7].

Модель динамики, которая предназначена для использования вычислительными устройствами при синтезе ОУ, должна удовлетворять ряду требований: достаточная точность в широком диапазоне изменения фазовых координат, пригодность для оперативного решения задачи (2), возможность использования в различных состояниях функционирования, учет влияния различного рода возмущающих воздействий и др. Отдельные из этих требований противоречивы. Построение модели динамики исследуемого объекта предполагает определение вида основных уравнений, которые, с одной стороны, могут быть использованы при анализе и синтезе ОУ, с другой – должны достаточно точно отражать реальные процессы, а также оценку параметров по экспериментальным данным и проверку адекватности в различных состояниях функционирования.

На этапе анализа и синтеза ОУ окончательно формулируется задача (2) с учетом полученной модели динамики, выполняется ее полномасштабный анализ на МСФ, решаются задачи синтеза алгоритмического обеспечения для управляющего устройства, выбирается стратегия реализации ОУ и т.д.

На заключительном этапе синтеза СОЭУ разрабатывается алгоритм работы системы, производится выбор программной платформы, аппаратных средств и создаются средства сопровождения СОЭУ, необходимые при ее эксплуатации.

Решение приведенных подзадач представляет собой трудоемкие научные исследования. Как было отмечено в постановке задачи (2), в процессе реальной эксплуатации объектов происходят изменения состояний функционирования h_j , обусловленные возмущающими воздействиями и приводящие к изменениям исходных данных (3), а, следовательно, к необходимости получения нового решения сложной задачи.

Синтез энергосберегающего управления

Система оптимального энергосберегающего управления должна быть, с одной стороны, достаточно дешевой, чтобы ее использование было экономически оправдано, с другой – обладать вычислительными возможностями, позволяющими оперативно рассчитывать ОУ при изменении исходных данных. Среди перечня функций современных вычислительных средств систем управления энергоемкими объектами оптимальное энергосберегающее управление либо отсутствует, либо напрямую не заявлено производителем.

Как было отмечено выше, объем расчетов на этапе анализа ОУ, предшествующий получению синтезирующих функций для МСФ объекта, является главным препятствием, которое не позволяет оперативно, в реальном масштабе времени, реализовать требуемое энергосберегающее управление. Это побуждает раз-

работчика использовать высокопроизводительные дорогостоящие вычислительные средства, существенно снижающие экономический эффект от использования СОЭУ. Представление результатов анализа ОУ на МСФ для разных режимов работы и состояний функционирования энергоемкого объекта в виде множества когнитивных графических образов дает возможность в процессе синтеза энергосберегающего управления избежать подобных расчетов, тем самым существенно сократить время вычислительных процедур, используя результаты предварительных расчетов.

Проиллюстрируем применение элементов когнитивной графики для синтеза энергосберегающего управления тепловым электронагревательным элементом одной из термических зон экструдера.

На предпроектном этапе исследуются статические и динамические свойства экструдера и уточняются особенности его эксплуатации. По результатам исследований для каждого нагревательного элемента термической зоны экструдера формулируется в общем виде математическая постановка задачи ОУ: требуется перевести объект из начального состояния $z(t_0)$ в конечное $z(t_k)$ при ограничении на управление

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \quad u(t) \in [u_n, u_b], \quad (6)$$

где t_0, t_k – начало и конец временного интервала управления; u_n, u_b – нижняя и верхняя границы изменения управляющего воздействия, соответственно. В качестве целевой функции используем квадратичный критерий

$$J_E = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \quad (7)$$

Линеаризованную математическую модель динамики нагрева, применительно к отдельно взятому тепловому электронагревательному элементу экструдера, запишем в виде

$$\dot{z}_1 = \dot{z}_2(t), \quad \dot{z}_2 = a_2 z_2(t) + bu(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad (8)$$

где \dot{z}_1, \dot{z}_2 – переменные состояния отдельной зоны экструдера; параметр a характеризует инерционность электрического нагревателя; параметр b – коэффициент усиления управляющего воздействия $u(t)$.

Синтез энергосберегающего управления на МСФ позволяет записать решение сформулированной выше задачи ОУ и модели экструдера (9) в терминах синтезирующих переменных L_1, L_2 :

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{1}{b} \left(z_2^k - z_2^0 \right) - \frac{a_2}{ba} \left(z_1^k - z_1^0 \right) - 2 \frac{b_0}{b}; \\ L_2 &= \frac{1}{b} \left(z_2^k e^{-2a_2} - z_2^0 \right) + \frac{b_0}{ba_2} \left(e^{-2a_2} - 1 \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a &= 0,5(t_k - t_0), \quad a_2 = 0,5 a_2(t_k - t_0), \\ b &= 0,25(t_k - t_0)(u_b - u_n), \quad b_0 = 0,25 b(t_k - t_0)(u_b + u_n). \end{aligned}$$

Значения переменных L_1, L_2 однозначно определяют вид функций энергосберегающего управления, а для численной реализации задачи оптимального управления требуется задать массив исходных данных

$$R = \left(a, a_2, b, b_0, z_1^0, z_2^0, z_1^k, z_2^k \right). \quad (10)$$

На рисунке 2 представлен когнитивный образ G (области $g_i \in G$) энергосберегающего управления в пространстве синтезирующих переменных L_1, L_2 . Каждой области g_i образа соответствует вполне определенная функция оптимального управления $u^*(t)$, которая используется для выбора управляющего воздействия $u^*(t)$, соответствующего тому или иному состоянию функционирования $h_j \in H$, $j = 1, 2, \dots, n$ или режиму работы экструдера.

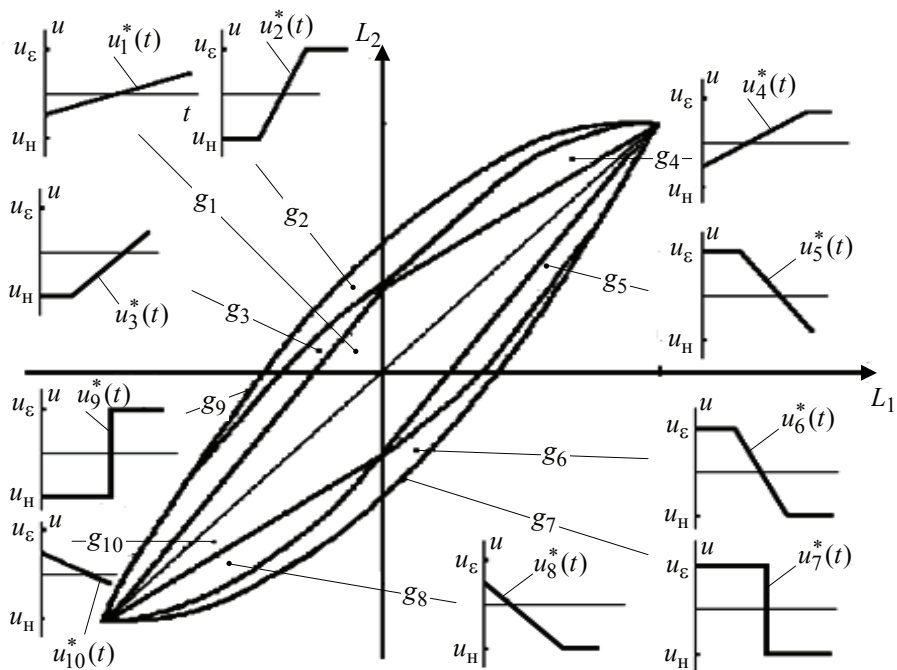


Рис. 2. Когнитивный графический образ в пространстве синтезирующих переменных L_1, L_2 и виды функций оптимального управления

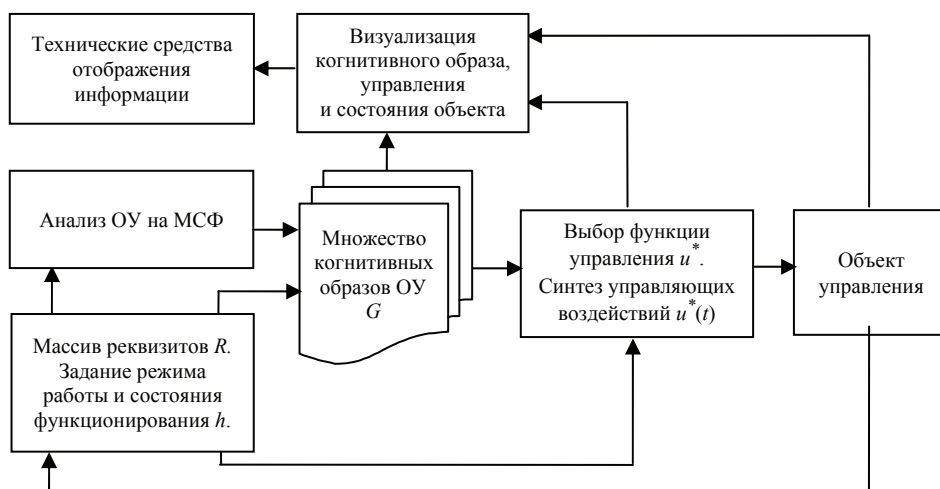


Рис. 3. Обобщенная структурная схема формирования и применения когнитивных графических образов в работе СОУ

На последующих этапах разработки СОЭУ когнитивный образ G (области g_i) формируется в адресном пространстве постоянного запоминающего устройства системы управления.

Представление результатов анализа и синтеза ОУ в виде множества когнитивных графических образов G , соответствующих различным режимам работы и состояниям функционирования объекта, сформированных в адресном пространстве постоянного запоминающего устройства на стадии разработки системы управления, позволяет существенно упростить архитектуру системы управления и сократить время вычисления управляющих воздействий.

На рисунке 3 показана структурная схема, обобщающая методику использования когнитивных графических образов в СОЭУ. Визуализация информации о состоянии функционирования объекта позволяет оперативно отслеживать его состояние и при необходимости автоматически вносить изменения в его работу.

Заключение

Значительное сокращение числа математических операций предоставляет разработчику широкий выбор возможностей технической реализации СОЭУ. Разнообразие возможностей представления множества когнитивных образов в адресном пространстве системы управления позволяет синтезировать адаптивные алгоритмы энергосберегающего управления для гибридных и многопараметрических объектов с минимальными затратами на программно-аппаратное обеспечение и интеллектуальную поддержку СОЭУ [8].

Возможности СОЭУ могут быть реализованы во вновь разрабатываемых системах управления энергоёмкими объектами, а при помощи несложных дополнительных согласующих устройств возможна интеграция с уже находящимися в эксплуатации системами управления, базирующимися на различных программно-аппаратных платформах. Следует отметить, что возможности визуализации состояния объекта и состояния управления повышают эффективность предпроектных исследований, упрощают поиск путей повышения качественных показателей управления.

Список литературы

1. Муромцев, Ю. Л. Проблемы энергосберегающего управления / Ю. Л. Муромцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 358 – 366.
2. Зенкин, А. А. Когнитивная компьютерная графика / А. А. Зенкин ; под ред. Д.А. Поспелова. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 192 с.
3. Hertzberg, J. Cognitive Technical Systems – What Is the Role of Artificial Intelligence? / J. Hertzberg, M. Beetz // KI 2007 : Proceedings of the 30th Annual German Conference on Advances in Artificial Intelligence. – Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 19 – 42.
4. Чернышов, Н. Г. Разработка систем оптимального управления энергоёмкими объектами с применением когнитивной графики и технологии беспроводной связи ZigBee / Н. Г. Чернышов, С. И. Дворецкий // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 87 – 98.
5. Ляпин, Л. Н. Анализ и оперативный синтез оптимального управления в задаче двойного интегратора на множестве состояний функционирования / Л. Н. Ляпин, Ю. Л. Муромцев // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. – 1990. – № 3. – С. 57 – 64.
6. Chernyshov, N. G. Features of creation of power saving control systems on set operation conditions / N. G. Chernyshov, D. Yu. Muromtzev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2008. – Vol. 42, No. 3. – P. 163 – 168.

7. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д. Ю. Муромцев, Ю. Л. Муромцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241 – 251.

8. Пат. 2444040 Российская Федерация, МПК G05B 13/00. Способ и система оптимального управления объектами двойного интегрирования / Чернышов Н. Г., Дворецкий С. И., Муромцев Ю. Л., Глинкин Е. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2010122129/08 ; заявл. 31.05.2010 ; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 19 с.

Synthesis of Energy-Saving Control

N. G. Chernyshov¹, S. I. Dvoretsky²

Departments: “Power Supply, Electrical Engineering and Information Support of Energy Systems” (1); n-c-h@rambler.ru; “Technologies and Equipment for Food and Chemical Production” (2), TSTU

Keywords: cognitive graphics; control system; energy-saving control; plurality of operation states; synthesis.

Abstract: Nowadays, high cost and shortage of power resources has become one of the main restraining factors of economic development. The described situation pushes to search for new approaches not only to design of power-intensive equipment, but also control systems of this equipment. The new approach to the development of the optimal control system of power-intensive objects with the application of cognitive graphics is suggested. Despite of the progress in modern electronics, developers have to deal with a number of problems, which restrict the capacity of such devices. First of all, it is caused by a significant amount of real-time calculations, which do not allow full realization of the total potential of energy-saving control. One of the effective ways of problem-solving is application of cognitive graphics methods. Methods above provide rendering of complex tasks, speeding up its execution both at the stage of development of the system and during its operation. For the given model of object dynamics process, based on full analysis of optimal control, synthesized variables were received, and cognitive graphic image in synthesizing variables space was constructed. According to this image, the form of the optimal control was defined, after this control action for a given mode of the object was synthesized. Decomposition on the subtasks of the general task of developing an optimal energy-saving control system was provided.

References

1. Muromtsev Yu.L. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no.2, pp. 358-366.
2. Zenkin A.A. *Kognitivnaja kompyuternaja grafika* (Cognitive Computer Graphics), Moscow: Nauka, 1991, 192 p.
3. Hertzberg J., Beetz M. *KI 2007: Proceedings of the 30th annual German conference on Advances in Artificial Intelligence*, Berlin, Heidelberg, 2007, pp.19-42.
4. Chernyshov N.G., Dvoretsky S.I., *Radiotekhnika*, 2013, no. 9, pp. 87-98.
5. Ljapin L.N., Muromtsev Yu.L. *Izvestiya AN CCCR. Seriya Tekhnicheskaya kibernetika*, 1990, no. 3, pp. 57-64.
6. Chernyshov N.G., Muromtsev D.Yu. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 163-168.

7. Muromtsev D.Yu., Muromtsev Yu.L. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 241-251.

8. Chernyshov N.G., Dvoretzky S.I., Muromtsev Yu.L., Glinkin E.I., Tambov State Technical University, *Sposob i sistema optimalnogo upravljenija objektami dvojnogo integrirovaniya* (The method and system optimal control objects double integration), Russian Federation, 2012, Pat. № 2444040.

Synthese der energiesparenden Steuerung

Zusammenfassung: Es ist die Aufgabe der Synthese der energiesparenden Steuerung der technologischen Objekte unter Ausnutzung der Methoden der kognitiven Graphik betrachtet. Es ist die Dekomposition der allgemeinen Aufgabe der Synthese des Systems der optimalen energiesparenden Steuerung erfüllt. Es ist gezeigt, dass die Methoden und die Mittel der kognitiven Graphik die Visualisierung und die Wendigkeit der Lösung der Aufgaben der Synthese der energiesparenden Steuerung gewährleisten. Die Darstellung der Ergebnisse der Synthese der optimalen Steuerung in Form von den kognitiven graphischen Gestalten auf einer Menge der Zustände des Funktionierens, die im Adressraum des ständigen Speichers gebildet sind, lässt zu, die Zeit der Berechnung der steuernden Einwirkungen zu verringern, den Wert zu verringern und die Effektivität des Funktionierens der Systeme der energiesparenden Steuerung zu erhöhen, sowie gibt dem Hersteller den breiten Satz der möglichen Varianten der Konstruktion des Steuersystemes.

Synthèse de la commande économe d'énergie

Résumé: Est examiné le problème de la synthèse de la commande économe d'énergie des objets technologiques avec l'emploi des méthodes du graphique cognitif. Est effectuée la décomposition du problème général de la synthèse du système de la commande économe d'énergie. Les méthodes et moyens du graphique cognitif assurent la visualisation et la rapidité de la solution des problèmes de la synthèse de la commande économe d'énergie.

Авторы: *Чернышов Николай Генрихович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем»; *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
