

БАЗА ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГОМЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ

Д. Ю. Муромцев^а, доктор техн. наук, профессор

А. Н. Грибков^а, канд. техн. наук, доцент

И. А. Куркин^а, ассистент

^аТамбовский государственный технический университет, Тамбов, РФ

Постановка проблемы: разработка и внедрение информационно-управляющих систем многомерными технологическими объектами являются в настоящее время актуальными задачами, поскольку позволяют повысить качество выпускаемой продукции, снизить затраты энергоресурсов, минимизировать материальные затраты, сократить уровень загрязнения окружающей среды и т. д. К наиболее наукоемким этапам разработки информационно-управляющей системы относится создание ее алгоритмического и программного обеспечения, так как применяемый при этом математический аппарат зачастую является очень сложным. Один из эффективных путей решения данной проблемы — использование интеллектуальных баз знаний, обеспечивающих программную реализацию алгоритмов синтеза энергосберегающих управляющих воздействий. **Методы:** разработка структуры базы знаний с использованием фрейм-модели представления знаний. Реализация в базе знаний метода структурного синтеза алгоритма энергосберегающего управления, основанного на совместном применении принципа максимума Понтрягина и метода синтезирующих переменных. **Результаты:** разработана структура фрейм-модели базы знаний информационно-управляющей системы многомерным объектом. Фреймы базы знаний обеспечивают определение вида функции оптимального управления и получение аналитических зависимостей для расчета ее параметров. Определение вида функции оптимального управления осуществляется с использованием иерархического графа переходов между видами функций оптимального управления с учетом возможных нарушений ограничений на управляющие воздействия. Параметры полученной функции оптимального управления определяются в результате решения системы уравнений, которая составляется в автоматическом режиме из «элементарных» функций, хранящихся в базе знаний. **Практическая значимость:** применение разработанной базы знаний в составе информационно-управляющей системы многомерным объектом обеспечивает решение задачи синтеза энергосберегающих управляющих воздействий с учетом накладываемых на них ограничений.

Ключевые слова — база знаний, информационно-управляющая система, многомерный объект, энергосберегающее управление.

Введение

В настоящее время вопросам разработки информационно-управляющих систем (ИУС) уделяется значительное внимание исследователей, поскольку такие системы находят широкое применение в современной промышленности. Практически все технологические установки, применяемые на производстве, представляют собой сложные многомерные объекты, имеющие многочисленные взаимосвязанные входные и выходные переменные. При решении задач анализа и синтеза оптимального управления (ОУ) многомерными объектами [1] во многих случаях возникают трудности, связанные со сложностью применяемого математического аппарата и значительной трудоемкостью последующей программной реализации разработанного алгоритмического обеспечения. Поэтому при разработке ИУС многомерными технологическими объектами значительное применение находят методы искусственного интеллекта. При этом в состав ИУС, как правило, включается база знаний (БЗ), обеспечивающая реализацию разработанных алгоритмов анализа и синтеза ОУ.

В данной статье рассматриваются вопросы разработки и программной реализации БЗ ин-

теллектуальной ИУС многомерным объектом. Алгоритмическое обеспечение ИУС основано на методе структурного синтеза алгоритма ОУ, который обеспечивает получение аналитических зависимостей для расчета параметров функций ОУ многомерным объектом при наличии ограничений на управляющие воздействия [2].

Алгоритмическое обеспечение ИУС

Математическую постановку задачи оптимального управления (ЗОУ) многомерным объектом можно записать в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{a}\mathbf{z}(t) + \mathbf{b}\mathbf{u}(t); \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(t_0) = \mathbf{z}_0 \rightarrow \mathbf{z}(t_k) = \mathbf{z}_k; \quad (2)$$

$$\forall t \in [t_0; t_k] : \mathbf{u}(t) \in [\mathbf{u}^H; \mathbf{u}^B]; \quad (3)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f(\mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t), t) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

В задаче (1)–(4) применяются следующие обозначения: \mathbf{a} , \mathbf{b} — матрицы параметров модели динамики объекта размерности $n_z \times n_z$ и $n_z \times n_u$ соответственно; $\mathbf{z}(t)$ — вектор фазовых координат размерности n_z ; $\mathbf{u}(t)$ — вектор управляющих воз-

действий размерности n_u ; $\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_k$ — векторы начальных и конечных значений фазовых координат размерности n_z ; $[t_0; t_k]$ — временной интервал управления; $\mathbf{u}^H, \mathbf{u}^B$ — векторы нижних и верхних граничных значений управляющих воздействий размерности n_u ; J — минимизируемый функционал.

Массив исходных данных, необходимый для численного решения задачи (1)–(4), имеет вид

$$R = (\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{u}^H, \mathbf{u}^B, \mathbf{z}_0, \mathbf{z}_k, t_0, t_k). \quad (5)$$

Практическое решение ЗОУ (1)–(4) заключается в том, чтобы для заданного массива исходных данных (5) определить значения компонентов вектора $\mathbf{u}(t)$, при которых для модели объекта (1) с учетом (2) и (3) достигается минимальное значение функционала (4).

Для разработки алгоритмического обеспечения ИУС, осуществляющей решение задачи (1)–(4), используется метод структурного синтеза алгоритма ОУ, основанный на совместном применении принципа максимума Понтрягина и метода синтезирующих переменных [3]. Поясним основные этапы данного метода.

Компоненты вектора управляющих воздействий, согласно принципу максимума Понтрягина, могут принимать три возможных значения: 1) нижнее граничное значение u_i^H ; 2) верхнее граничное значение u_i^B ; 3) значение в виде некоторой функции $u_i^f(t)$. При этом возможны 17 различных видов функций ОУ, которые обобщенно можно представить в виде выражения

$$U^s(t) = \begin{cases} f_1^c(t), & t \in [t_0, t_1^H]; \\ f_2^c(t), & t \in [t_1^H, t_2^H]; \\ f_3^c(t), & t \in [t_2^H, t_3^H]; \\ f_4^c(t), & t \in [t_3^H, t_4^H]; \\ f_5^c(t), & t \in [t_4^H, t_k], \end{cases}$$

где $s = 0, 1, \dots, 16$ — номер вида функции ОУ; $f_i^c(t)$ — компоненты видов функций ОУ, значения которых приведены в таблице; t_1^H, \dots, t_4^H — времена переключения.

Следует также заметить, что из рассмотренных видов функций только $U^0(t)$ является видом функции, не имеющим точек переключения.

Метод структурного синтеза алгоритма ОУ обеспечивает автоматизацию получения уравнений синтезирующих переменных в зависимости от вида функции ОУ [4]. Для этого определяется $n_z \cdot 3^{n_u}$ «элементарных» функций (компонентов синтезирующих переменных), из которых ИУС в процессе работы должна составить n_z уравнений для каждой точки переключения.

■ Значения компонентов видов функций ОУ с одним экстремумом

s	$f_1^c(t)$	$f_2^c(t)$	$f_3^c(t)$	$f_4^c(t)$	$f_5^c(t)$
0	$u_i^f(t)$				
1	$u_i^f(t)$			u_i^B	
2	$u_i^f(t)$			u_i^H	
3	u_i^H			$u_i^f(t)$	
4	u_i^B			$u_i^f(t)$	
5	u_i^H	$u_i^f(t)$		u_i^B	
6	u_i^B	$u_i^f(t)$		u_i^H	
7	$u_i^f(t)$	u_i^B		$u_i^f(t)$	
8	$u_i^f(t)$	u_i^H		$u_i^f(t)$	
9	u_i^H	$u_i^f(t)$		u_i^H	
10	u_i^B	$u_i^f(t)$		u_i^B	
11	u_i^H	$u_i^f(t)$	u_i^B		$u_i^f(t)$
12	u_i^B	$u_i^f(t)$	u_i^H		$u_i^f(t)$
13	$u_i^f(t)$	u_i^B	$u_i^f(t)$		u_i^H
14	$u_i^f(t)$	u_i^H	$u_i^f(t)$		u_i^B
15	u_i^H	$u_i^f(t)$	u_i^B	$u_i^f(t)$	$u_i^f(t)$
16	u_i^B	$u_i^f(t)$	u_i^H	u_i^H	u_i^B

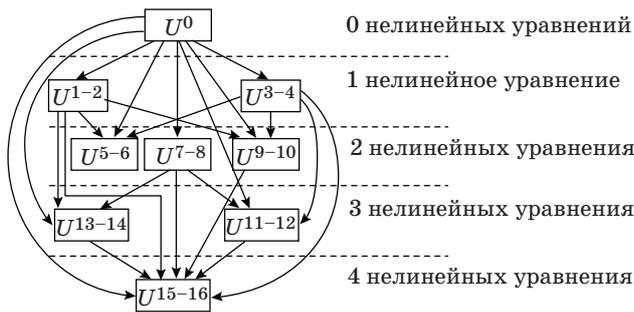
Данный подход не требует рассмотрения частных значений синтезирующих переменных, количество которых достаточно велико. Например, для одноэкстремальных функций ОУ, даже без учета взаимного отношения времен переключения, оно равно $17 \cdot n_z \cdot n_u$. Таким образом, при решении ЗОУ требуется производить последовательную проверку различных видов функций ОУ на предмет существования решения ЗОУ (1)–(4) с применением данных видов функций. При этом проверяется выполнение ограничений на управляющие воздействия (3). Применительно к рассмотренным выше видам функций ОУ возможны следующие шесть типов нарушений ограничений:

$$u_i(t_k) > u_i^B; u_i(t_k) < u_i^H; u_i(t_0) > u_i^B;$$

$$u_i(t_0) < u_i^H; u_i(t) > u_i^B, t \in (t_0, t_k);$$

$$u_i(t) < u_i^H, t \in (t_0, t_k). \quad (6)$$

Учитывая, что основные затраты времени ИУС расходуются на решение нелинейных уравнений, можно выделить последовательность проверки видов функций ОУ с учетом количества нелиней-



■ **Рис. 1.** Иерархический граф переходов между различными видами функций ОУ

ных уравнений. Последовательность проверки можно представить в виде иерархического графа переходов (рис. 1). На каждой итерации выполняется проверка ограничений на управляющие воздействия. При нарушении ограничений, в зависимости от типа нарушений, осуществляется переход от одного вида функции ОУ к другому, более сложному.

Рассмотренный алгоритм синтеза ОУ за счет уменьшения необходимого количества формул позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на разработку алгоритмического и программного обеспечения, и снизить вероятность ошибок при кодировании при незначительном увеличении общего времени расчета.

Разработка базы знаний ИУС

Для удобства последующей программной реализации предлагается в качестве модели представления знаний в разрабатываемой БЗ применить фреймовую модель [5], поскольку одним

из основных преимуществ фреймов является способность отражать представление объектных типов данных (классов) в объектно-ориентированных средах разработки программного обеспечения. Следует заметить, что современные понятия класса и объекта, используемые в языках программирования высокого уровня, поддерживающих парадигму объектно-ориентированного программирования, довольно точно соответствуют таким классическим понятиям, как фрейм-образец и фрейм-экземпляр. В связи с этим структуру разрабатываемой БЗ удобно представить в виде диаграммы классов (рис. 2).

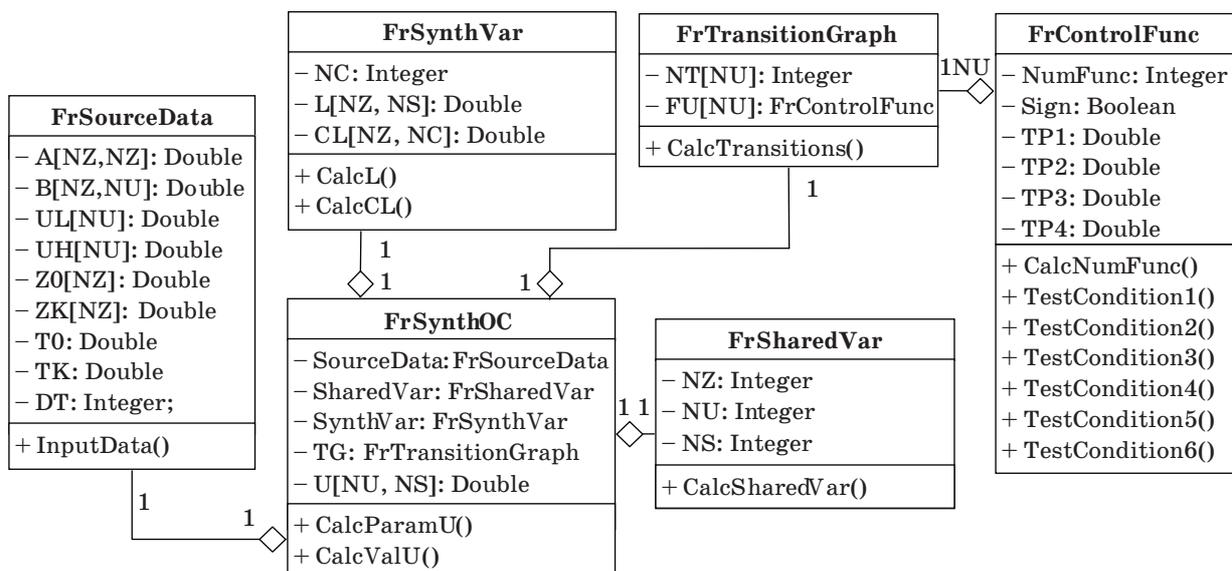
База знаний включает шесть классов (фреймов-образцов):

1) FrSourceData — фрейм-образец для ввода и хранения массива исходных данных [A, B, UL, UH, Z0, ZK, T0, TK — соответствующие компоненты массива реквизитов (5); DT — шаг дискретизации; InputData() — функция ввода исходных данных];

2) FrSynthVar — фрейм-образец для расчета значений синтезирующих переменных (NC — количество компонентов синтезирующих переменных; L, CL — массивы для хранения значений синтезирующих переменных и их компонентов («элементарных» функций); CalcL(), CalcCL() — функции для расчета значений L и CL);

3) FrSynthOC — фрейм-образец синтеза оптимальных управляющих воздействий (U — массив для хранения значений управляющих воздействий; CalcParamU(), CalcValU() — функции для расчета параметров и значений ОУ);

4) FrTransitionGraph — фрейм-образец, реализующий алгоритм выбора функции ОУ на основе иерархического графа переходов (NT — массив, содержащий количество переходов по графу для



■ **Рис. 2.** Структурная схема БЗ ИУС

каждого управляющего воздействия; FU — массив видов функций ОУ; CalcTransitions() — функция расчета переходов по графу);

5) FrSharedVar — фрейм-образец, в котором хранятся значения общих переменных, используемых другими фреймами ($NZ - n_z$; $NU - n_u$; NS — количество шагов на временном интервале управления ($NS = [TK - T0]/DT$));

6) FrControlFunc — фрейм-образец, реализующий определение вида функции ОУ [NumFunc — номер вида функции ОУ; Sign — атрибут, который принимает значение «1» при возрастающей и «0» — при убывающей функции ОУ в начальный момент времени [4]; TP1, TP2, TP3, TP4 — значения времен переключения t_1^H, \dots, t_4^H ; CalcNumFunc() — функция вычисления вида функции ОУ; TestCondition1(), TestCondition2(), TestCondition3(), TestCondition4(), TestCondition5(), TestCondition6() — функции проверки выполнения ограничений (6)].

Алгоритм функционирования ИУС с разработанной БЗ состоит из нескольких этапов. На первом этапе осуществляется ввод исходных данных и расчет значений общих переменных (используются объекты (фреймы-экземпляры) классов FrSourceData и FrSharedVar). На втором этапе производится расчет значений синтезирующих переменных и их компонентов («элементарных» функций) с применением объекта класса FrSynthVar. На третьем этапе определяется вид

функции ОУ с использованием объектов классов FrSynthOC, FrTransitionGraph и FrControlFunc. При начальной инициализации объектов за вид функции ОУ принимается $U^0(t)$. Далее выполняется проверка возможных нарушений ограничений (6). При наличии нарушений осуществляются переходы между видами функций ОУ в соответствии с графом переходов (см. рис. 1). На последнем этапе проводится расчет параметров функции ОУ (определение значений времен переключения).

База знаний ИУС программно реализована с использованием среды визуального программирования Delphi 2007 системы CodeGear RAD Studio.

Заключение

В статье рассмотрены особенности построения БЗ ИУС многомерным объектом на базе метода структурного синтеза алгоритма, обеспечивающего получение вида и соотношений для расчета параметров функций ОУ многомерным объектом. Практическая реализация метода в БЗ ИУС обеспечивает более оперативное получение алгоритма синтеза ОУ применительно к многомерным объектам.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-08-00489-а.

Литература

1. Муромцев Ю. Л., Погонин В. А., Гребенников Р. В. Анализ энергосберегающего управления многомерными объектами // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2007. Т. 13. № 4. С. 838–846.
2. Грибков А. Н., Куркин И. А. Аналитический метод получения видов функций и расчета параметров оптимального управления многомерным объектом с учетом ограничений на управляющие воздействия // Информатика и системы управления. 2014. № 3(41). С. 71–83.

3. Муромцев Ю. Л., Ляпин Л. Н., Сатина Е. В. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 1993. № 11-12. С. 19–25.
4. Грибков А. Н., Куркин И. А. Метод структурного синтеза алгоритма расчета параметров функций оптимального управления многомерным объектом // Информатика и системы управления. 2015. № 3(45). С. 72–83.
5. Minsky M. A Framework for Representing Knowledge. — MIT AI Laboratory Memo 306, June, 1974.

UDC 004.896

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.60

Knowledge Base of an Intelligent Information Control System for a Multidimensional Object

D. Yu. Muromtsev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, crems@crems.jesby.tstu.ru

A. N. Gribkov^a, PhD, Tech., Associate Professor, gribkovalexey@yandex.ru

I. A. Kurkin^a, Assistant Professor, allodsli@mail.ru

^aTambov State Technical University, 106, Sovetskaia St., 392000, Tambov, Russian Federation

Purpose: Design and introduction of information control systems for multidimensional technological objects are actual problems because they help to increase the production quality, reduce the energy consumption, minimize the cost, reduce the environmental

pollution, etc. One of the most knowledge-intensive stages in information control system development is creating algorithms and software, as it often involves hard mathematics. A promising way is using intelligent knowledge bases which provide software implementation for the algorithms of synthesizing energy-saving control. **Methods:** The knowledge base structure was developed using the frame model of knowledge representation. To implement the structural synthesis of energy-saving control algorithm in the knowledge base, the Pontryagin maximum principle and the method of synthesizing variables were jointly used. **Results:** A structure has been developed for the frame-based knowledge base of an information control system used in a multidimensional object. The knowledge base frames serve to determine the optimal control function type and to obtain analytical equations for calculating the parameters of this function. The type of the optimal control function is determined using a hierarchical graph of transitions between possible types, taking into account that the constraints on the control actions can be impaired. The parameters of the obtained optimal control function are determined by solving an equation system which is automatically synthesized from "elementary" functions stored in the knowledge base. **Practical relevance:** Using the developed knowledge base as a part of an information control system for a multidimensional object makes it possible to synthesize energy-saving control, taking into account the constraints on the control actions.

Keywords — Knowledge Base, Information Control System, Multidimensional Object, Energy-Saving Control.

References

1. Muromtsev Yu. L., Pogonin V. A., Grebennikov R. V. Analysis of Energy-Saving Control over Multidimensional Objects. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 13, no. 4, pp. 838–846 (In Russian).
2. Gribkov A. N., Kurkin I. A. Analytical Method for Derivation of Different Functions and Calculation of Optimal Control Parameters for Multidimensional Objects with Limited Control Actions. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2014, no. 3(41), pp. 71–83 (In Russian).
3. Muromtsev Iu. L., Liapin L. N., Satina E. V. Method of Synthesizing Variables in the Optimal Control Linear Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1993, no. 11-12, pp. 19–25 (In Russian).
4. Gribkov A. N., Kurkin I. A. Method of Structural Synthesis of Algorithm for Calculating Parameters of Optimal Control Functions for Multidimensional Objects. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2015, no. 3(45), pp. 72–83 (In Russian).
5. Minsky M. *A Framework for Representing Knowledge*. MIT AI Laboratory Memo 306, June, 1974.

К статье Н. Н. Васильева и В. С. Дужина «Построение неприводимых представлений симметрической группы $S(n)$ с большими и максимальными размерностями» («Информационно-управляющие системы». 2015. № 3. С. 17–22.).

На странице 21, правый столбец, последний абзац следует читать так: «Работа первого автора выполнена при поддержке грантом РФФ 14-11-00581.»
