

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Д. Ю. Муромцев^а, доктор техн. наук, профессор, mdjur@mail.ru

А. Н. Грибков^а, доктор техн. наук, профессор, gribkovalexey@yandex.ru

И. В. Тюрин^а, канд. техн. наук, доцент, tyrinilja@yandex.ru

В. Н. Шамкин^а, доктор техн. наук, профессор, shamkin-v@mail.ru

^аТамбовский государственный технический университет, Советская ул., 106, Тамбов, 392000, РФ

Введение: проблема проектирования информационно-управляющих систем для многомерных технологических объектов требует комплексного анализа их эксплуатационно-технологических режимов промышленного оборудования. Решение ситуационных задач, связанных с построением моделей и оптимизацией в условиях неопределенности при оперативном принятии решений, приводит к необходимости использовать методы искусственного интеллекта. **Цель:** развитие методологии проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы, инвариантной различным многомерным технологическим объектам управления, позволяющей с учетом особенностей этих объектов оперативно синтезировать в реальном масштабе времени энергосберегающие управляющие воздействия. **Результаты:** разработана статическая модель фреймовой базы знаний информационно-управляющей системы для динамических режимов работы энергоемких технологических установок, позволяющая учитывать множество состояний работоспособности объекта управления, множество состояний его функционирования и дестабилизирующие факторы различной природы. Предложен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева: многозонных печей конвекционного нагрева, многосекционных сушилок, котельных установок и других тепло-технологических аппаратов. **Практическая значимость:** созданная структура базы знаний позволяет оперативно предоставлять информационную поддержку модулям, реализующим алгоритмическое обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы, что в свою очередь дает возможность синтеза энергосберегающего управления многомерным тепловым технологическим объектом в реальном масштабе времени. Кроме того, энергосберегающее управление характеризуется плавным протеканием тепловых процессов, а это ведет к повышению долговечности и безопасности эксплуатации оборудования.

Ключевые слова — энергосбережение, многомерные объекты, база данных, база знаний, экспертная система, информационно-управляющие системы, множество состояний функционирования.

Цитирование: Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Тюрин И. В., Шамкин В. Н. Проектирование базы знаний интеллектуальной информационно-управляющей системы для многомерных технологических объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 24–30. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Citation: Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N., Tyurin I. V., Shamkin V. N. Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 24–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Введение

Современные требования к экологичности и экономичности промышленного оборудования предполагают широкое внедрение перспективных инновационных — интеллектуальных и энергосберегающих — методов управления энергоемкими объектами.

В мировой практике к настоящему времени выработано несколько основных подходов к снижению потребления энергетических ресурсов. Во-первых, оптимизация технологических процессов, использование новой материально-технической базы. Во-вторых, широкое использование альтернативных возобновляемых источников энергии: солнечных, геотермальных, ветровых, приливных и др. В-третьих, развитие энергосберегающих технологий, в частности, за счет опти-

мального управления энергоемкими объектами [1, 2].

К наиболее энергоемким объектам следует отнести тепловые технологические установки: разнообразие печи, сушилки, вулканизаторы, котельные и холодильные установки. Особенность данного оборудования как объектов управления заключается в том, что большинство из этих устройств являются типичными многомерными объектами, в которых каждый входной сигнал влияет на группу выходных сигналов и, соответственно, выход зависит от нескольких входов. Эффективность функционирования многомерного технологического объекта определяется его свойствами безотказности, режимами работы, внешними воздействиями и другими дестабилизирующими факторами детерминированной, вероятностной или нечеткой природы. Поэтому

проектирование информационно-управляющих систем для подобных установок требует тщательного изучения их особенностей как объектов управления [3–10].

Особенности многомерных объектов управления

Основными особенностями многомерных технологических установок как объектов управления являются:

- существенные энергетические затраты;
- жесткие требования к поддержанию параметров технологических процессов;
- важность учета процессов, протекающих в оборудовании и оказывающих взаимное влияние друг на друга;
- наличие внешних и внутренних воздействующих факторов в каналах управления и измерения;
- изменение параметров многомерных объектов в процессе реальной эксплуатации [3, 11].

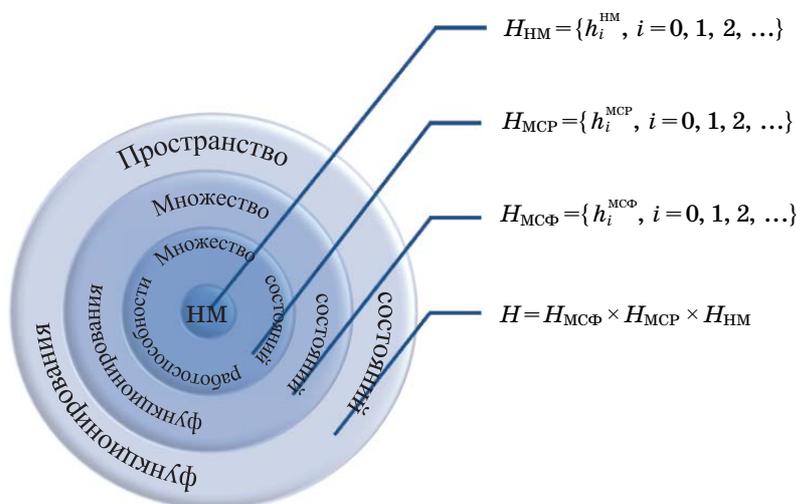
Эффективность функционирования многомерного технологического объекта определяется его свойствами безотказности, режимами работы, внешними воздействиями и другими дестабилизирующими факторами детерминированной, вероятностной или нечеткой природы. Для учета всех этих факторов в совокупности вводятся множество состояний работоспособности (МСР), множество состояний функционирования (МСФ) и нечеткое множество (НМ), образующие некое пространство, схематичное представление которого показано на рис. 1, где H — пространство состояний функционирования; $H_{МСФ}$ — множество производственных ситуаций; $H_{МСР}$ — множество

состояний работоспособности; $H_{НМ}$ — дискретное множество, получаемое из нечетких множеств с применением процедуры, аналогичной лингвистической аппроксимации.

Множество состояний работоспособности позволяет анализировать ситуации, для которых накоплены достаточные статистические данные, например, по отказам оборудования, информационных систем, ошибкам персонала и другим факторам. Расчет вероятностей состояний работоспособности (как стационарных, так и нестационарных) проводится с использованием различных методов [3, 8, 11], основанных на декомпозиции системы, построении моделей состояний работоспособности составных частей и системы в целом, а затем решении систем уравнений или использовании рекуррентных формул.

Однако знания состояний работоспособности системы и вероятностей этих состояний во многих случаях недостаточно для определения рисков и прогнозирования показателей эффективности проектируемых систем в процессе реальной эксплуатации. Более полно возможные состояния функционирования при длительной эксплуатации системы отражает МСФ, в котором наряду с состояниями работоспособности учитываются смены режимов работы, связанные с новыми производственными заданиями; изменения постановок задач управления; интенсивности внешних воздействий и т. д. [12]. Структура МСФ аналогична МСР, и для определения вероятностей состояний функционирования используются практически те же методы.

В то же время ни МСР, ни МСФ не позволяют учитывать быстро меняющуюся обстановку внешнего окружения. Это может быть связано, например, с изменением спроса потребителей,



■ **Рис. 1.** Компоненты пространства состояний функционирования
 ■ **Fig. 1.** Components of the space of functioning states

цен на энергоносители, сырье, а также другими факторами, для которых нет достаточного статистического материала, поэтому они могут быть описаны лишь на качественном уровне. Решение подобного рода ситуационных задач, связанных с построением моделей и оптимизацией в условиях неопределенности при оперативном принятии решений, приводит к необходимости использовать методы искусственного интеллекта [13]. Недостаточная теоретическая подготовка пользователей и недостаточное использование опыта и знаний экспертов в соответствующей предметной области также требует интеллектуализации разрабатываемой системы при реальной ее эксплуатации. Поэтому развитие методологии проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы, инвариантной различным многомерным технологическим объектам управления и позволяющей с учетом особенностей этих объектов оперативно синтезировать в реальном масштабе времени энергосберегающие управляющие воздействия, является востребованной задачей.

Информационное обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы

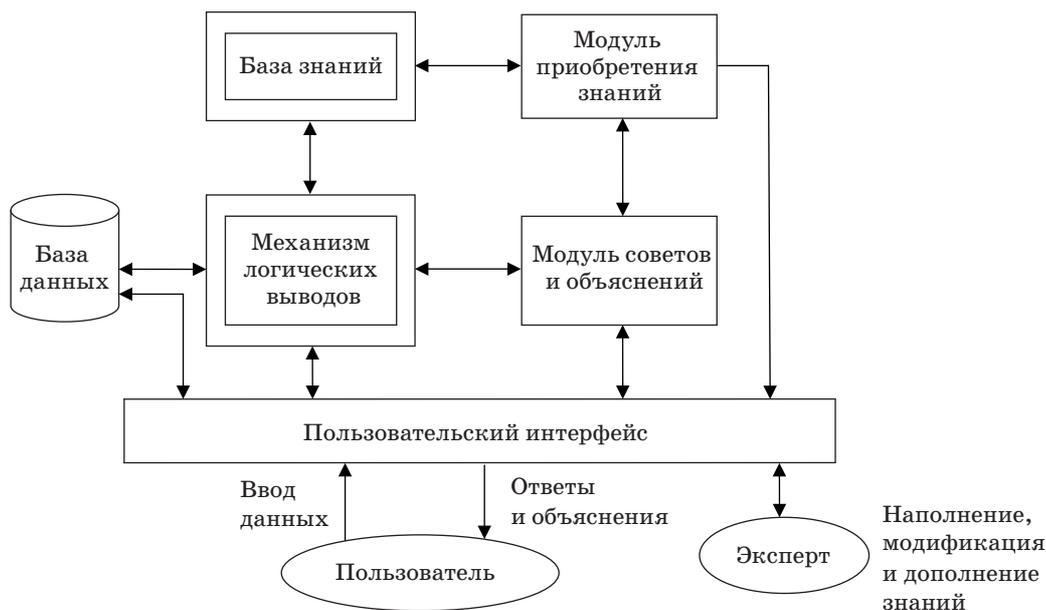
Основу интеллектуальной информационно-управляющей системы энергосберегающего управления (ЭУ) составляет экспертная система (рис. 2) [14]. В ней реализована методология по-

строения гибридных экспертных систем, предназначенных для решения задач управления многомерными энергоемкими технологическими объектами.

База данных содержит сведения о результатах внедрения системы интеллектуального ЭУ, полученный эффект использования синтезированных алгоритмов управления, различные виды моделей процессов, параметры и состав моделей для многомерных объектов, а также используемые стратегии, условия решения задач управления и т. д.

В базе знаний (БЗ) содержатся как общие знания о математических методах анализа и синтеза, так и знания прикладного характера, полученные от экспертов и используемые разработчиками алгоритмического обеспечения. Пользователи и эксперты взаимодействуют с экспертной системой через пользовательский интерфейс. При этом предусматривается пополнение БЗ результатами реальной эксплуатации объектов. Механизм логических выводов применяет знания и сведения из баз знаний и данных при решении практических задач. Модуль приобретения знаний позволяет пополнять и модифицировать знания в процессе эксплуатации системы, а модуль советов и объяснений выдает заключения и необходимые пояснения пользователю [15].

База знаний имеет стратифицированную иерархическую структуру в виде множества взаимосвязанных фреймов, образующих единую фреймовую систему, в которой объединяются декларативные и процедурные знания, а также



■ **Рис. 2.** Обобщенная структурная схема экспертной системы интеллектуальной информационно-управляющей системы
 ■ **Fig. 2.** Generalized block diagram of the expert system of intelligent information-control system

организованы принципы, присущие объектно-ориентированному подходу, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм. Фреймы БЗ имеют слоты, содержащие не только конкретное значение, но также имена процедур, позволяющих вычислять это значение по заданному алгоритму. Некоторые фреймы содержат слоты, заполнителями которых являются правила продукций, используемые для определения конкретного значения.

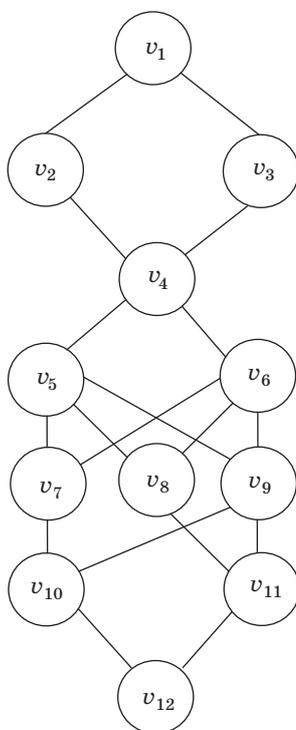
В качестве примера на рис. 3 представлен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева, а в таблице — описание стратифицированной структуры графа.

Из таблицы видно, что высший уровень иерархии интегрированного графа содержит фрейм для определения состояния функционирования многомерного объекта. На следующем уровне представлены фреймы, позволяющие идентифицировать его режим работы. Далее идет уровень, содержащий фреймы для дефиниции цели управления. За ним расположен уровень с фреймами для структурной и параметрической идентификации математических моделей объекта. На последующих уровнях находятся фреймы анализа задачи управления, определения стратегии реализации

управляющих воздействий и синтеза алгоритмического обеспечения. Последний иерархический уровень представлен фреймами имитационных моделей для верификации и тестирования синтезированного алгоритмического обеспечения.

Данная иерархическая структура позволяет организовать процесс приобретения и использования знаний и интеллектуализировать синтез решения задачи ЭУ режимами работы многомерного энергоемкого объекта [16]. Программная реализация фреймовой БЗ интеллектуальной энергосберегающей системы управления представляет собой набор классов, созданных в интегрированной среде программирования CodeGear RAD Studio 2007 Professional на языке Object Pascal. Статические модели фрагментов структуры БЗ для режима разогрева, представленные в спецификации унифицированного языка графического моделирования UML, показаны на рис. 4 в виде диаграммы классов.

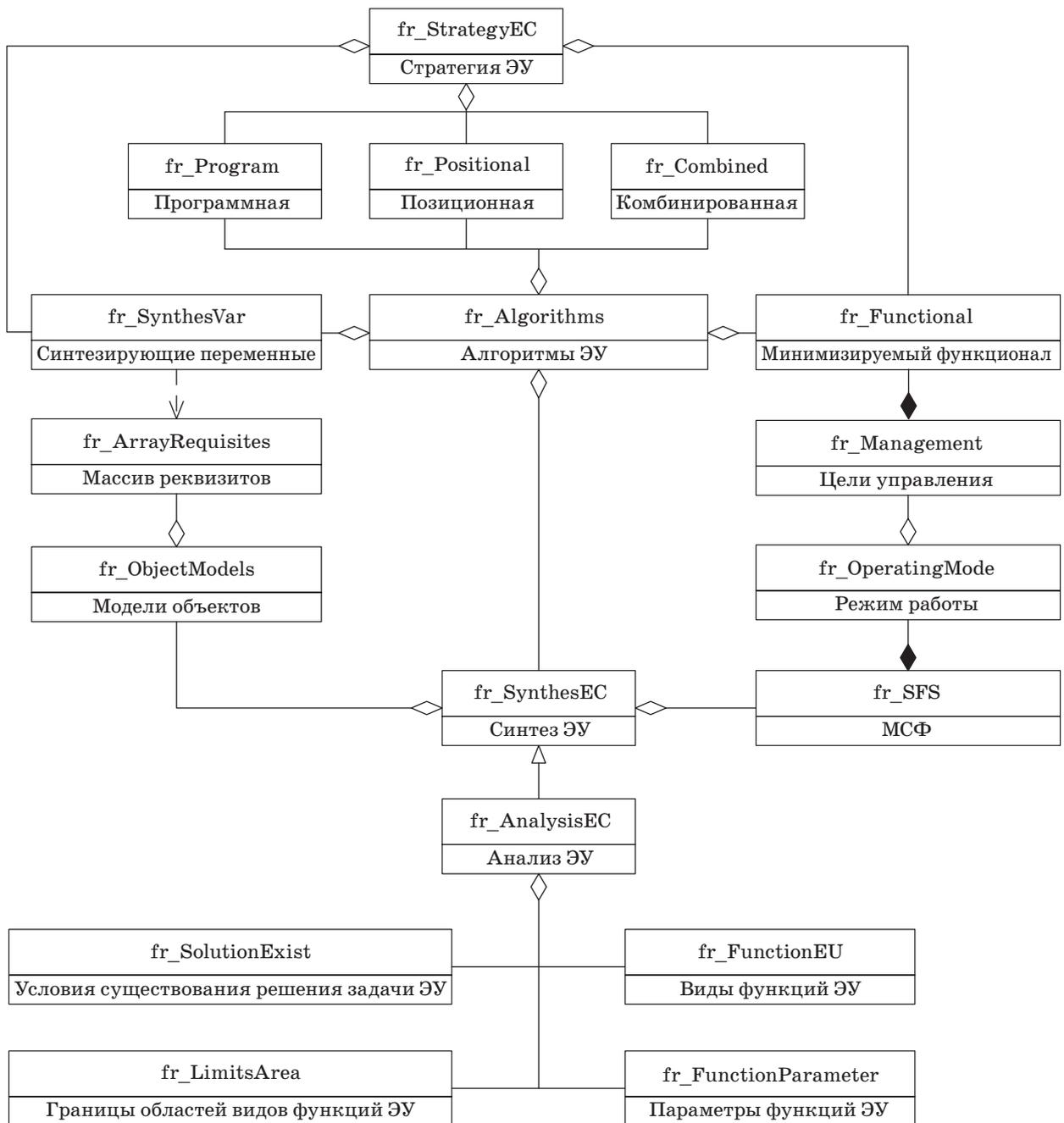
Модуль, осуществляющий идентификацию состояния функционирования, использует фрейм *fr_SFS*, включающий в себя фрейм *fr_OperatingMode*, агрегирует фрейм *fr_Management*. Фрейм *fr_Management* содержит фрейм *fr_Functional* для расчета значения функционалов затрат энергии и топлива. Модуль анализа ЭУ в зависимости от объекта управления использует фрейм анализа ЭУ *fr_AnalysisEC*,



■ **Рис. 3.** Интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза ЭУ
 ■ **Fig. 3.** Integrated graph of generalized intellectualization technology for energy-saving control synthesis

- Описание структуры графа
- Description of the graph structure

Страта	Вершина	Описание
Режимов	v_1	Разогрев
Целей управления	v_2	Энергосбережение
	v_3	Ресурсосбережение
Математических моделей	v_4	Модель нагревательных элементов
Особенностей задач управления	v_5	Экономия электроэнергии
	v_6	Экономия топлива
Стратегий	v_7	Комбинированная
	v_8	Позиционная
	v_9	Программная
Анализа и синтеза	v_{10}	Синтезирующая функция
	v_{11}	Программа управления
Имитационного моделирования	v_{12}	Модели разогрева рабочих зон



■ **Рис. 4.** Статическая модель фреймовой БЗ для режима разогрева
 ■ **Fig. 4.** Static model of frame knowledge base for heating mode

агрегирующий фреймы получения условий существования решения задачи ЭУ *fr_SolutionExist*, определения видов функций ЭУ *fr_FunctionEU*, границ их областей *fr_LimitsArea* и оценки их параметров *fr_FunctionParameter*.

Модуль синтеза для решения задач управления многомерным тепловым технологическим объектом использует фрейм *fr_SynthesEC*, включающий фреймы:

- математических моделей объектов *fr_ObjectModels*;
- алгоритмов управления *fr_Algorithms*;
- множества состояний функционирования *fr_SFS*.

Фрейм массива реквизитов *fr_ArrayRequisites* агрегирует фрейм моделей *fr_ObjectModels* и связан отношением зависимости с фреймом расчета синтезирующих переменных *fr_SynthesVar*.

Заключение

Созданная структура БЗ предусматривает оперативную работу модулей, реализующих алгоритмическое обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы, что дает возможность синтезировать ЭУ многомерным тепловым

технологическим объектом в реальном масштабе времени. Энергосберегающий разогрев позволяет добиться экономии 5–7 % энергоресурсов без снижения качества выпускаемой продукции [3, 9, 11].

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

Литература

1. Пастушенко И. Л. Управление энергосберегающими инновациями в нефтяной и газовой промышленности // Бизнес. Образование. Право. 2017. № 4 (41). С. 240–245.
2. Конькова М. К. Управление энергосберегающими процессами // Аллея науки. 2017. № 9 (4). С. 599–601. <http://alley-science.ru/> (дата обращения: 15.05.2018).
3. Артемова С. В., Артемов А. А. Энергосберегающее управление технологическими процессами нагрева (на примере установки отжига магнитопроводов) // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. № 5. С. 1375–1379.
4. Соболев А. В., Ляшенко А. И., Соболева Ю. В., Вент Д. П. Энергосберегающее управление технологическими процессами // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 3. С. 326–334.
5. Алимбеков А. Р. Энергосберегающее устройство управления технологическим процессом // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2012. № 3 (14). С. 146–148.
6. Парсункин Б. Н., Булычева С. В. Оперативное энергосберегающее оптимальное управление технологическими процессами // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2014. № 4 (4). С. 271–281.
7. Парсункин Б. Н., Самарина И. Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2. С. 55–60.
8. Андреев С. М., Парсункин Б. Н., Ахметов Т. У. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 122–128.
9. Pchelintsev A. N., Pogonin V. A. A Method of Determining the Control Parameters in the Energy-Saving Control Problem // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10. N 2. P. 33–36.
10. Yakushkin I. P. Methodology to Determine Heat Losses as an Element of a Ventilation Automatic Control Energy-Saving System // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7. N 5. P. 390–396.
11. Shamkin V. N., Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N. Using Destabilization Control to Improve the Functioning of Complex Multidimensional Technological Objects on the Time Interval // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. N 24. P. 7198–7217.
12. Шепель В. Н., Трипкош В. А. Алгоритм распознавания производственных ситуаций в информационно-управляющих системах на основе решения составной байесовской задачи // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 12. С. 97–101.
13. Степанов М. Ф., Степанов А. М., Михайлова Л. С., Жеронкина А. А. Система моделирования процессов управления нестационарными нелинейными объектами интеллектуальными системами управления // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. 2015. № 7. С. 179–186.
14. Джамбакиева Н. Р. Методологии и технологии разработки баз знаний // Аллея науки. 2018. Т. 2. № 4 (20). С. 1000–1002. <http://alley-science.ru/> (дата обращения: 18.05.2018).
15. Анисимов Д. Н., Фёдорова Е. В., Грязнов С. М. Оценка свойств нечетких систем управления на этапе формирования базы знаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 5. С. 291–297.
16. Kondratenko Y., Korobko O. V., Kozlov O. V. PLC-based Systems for Data Acquisition and Supervisory Control of Environment-Friendly Energy-Saving Technologies // Studies in Systems, Decision and Control. 2017. Vol. 74. P. 247–267.

UDC 62-503.55

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control

Muromtsev D. Yu.^a, Dr. Sc., Tech. Professor, mdjur@mail.ruGribkov A. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, gribkovalexey@yandex.ruTyurin I. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, tyurinilja@yandex.ruShamkin V. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, shamkin-v@mail.ru^aTambov State Technical University, 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russian Federation

Introduction: The problem of designing information control systems for MIMO systems requires a comprehensive analysis of their operational and technological regimes. Artificial intelligence methods can be used to solve problems related to building models and their optimization in conditions of uncertainty when it is necessary to make prompt decisions. **Purpose:** Developing a methodology for designing an intelligent information control system which would be invariant to various MIMO systems and could promptly synthesize energy-efficient control actions in real time, taking into account the features of these objects. **Results:** A static model has been developed for a frame-based knowledge base of an information-control system for energy-intensive process plants in dynamic operation modes. It allows you to take into account the number of states of the operating capability of the control object, many states of its operation, and destabilizing factors of various types. An integrated graph is proposed for generalizing intellectualization technology of synthesizing energy-saving control actions for MIMO thermal facilities in warm-up mode. **Practical relevance:** The created knowledge base structure allows you to promptly provide information for modules realizing algorithmic support of an intelligent information and control system, which in turn makes it possible to synthesize energy-efficient control of a MIMO thermal facility in real time. In addition, energy-saving control is characterized by a smooth flow of thermal processes, and this leads to increased durability and safety of the equipment operation.

Keywords — Energy Saving, MIMO Systems, Database, Knowledge Base, Expert System, Information and Control Systems, Set of States of Functioning.

Citation: Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N., Tyurin I. V., Shamkin V. N. Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 24–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

References

- Pastushenko I. L. Management of Energy-Saving Innovations in the Oil and Gas Industry. *Biznes. Obrazovanie. Pravo*, 2017, no. 4 (41), pp. 240–245 (In Russian).
- Kon'kova M. K. Managing Energy-Saving Processes. *Alleya nauki*, 2017, no. 9(4), pp. 599–601. Available at: <http://alley-science.ru/> (accessed 15 May 2018) (In Russian).
- Artemova S. V., Artemov A. A. Energy-Saving Control of Technological Processes of Heat (on Example of Installation of Magnetic Circuits Annealing). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences], 2012, no. 17(5), pp. 1375–1379 (In Russian).
- Sobolev A. V., Lyashenko A. I., Soboleva Yu. V., Vent D. P. Energy-Saving Control of Technological Processes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the TSU], 2012, no. 3, pp. 326–334 (In Russian).
- Alimbekov A. R. Energy Saving Device of the Technological Process Control. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (14), pp. 146–148 (In Russian).
- Parsunkin B. N., Bulycheva S. V. Operational Energy Saving Optimal Control of Technological Processes. *Prilozheniya matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh*, 2014, no. 4 (4), pp. 271–281 (In Russian).
- Parsunkin B. N., Samarina I. G. Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gas-dynamic Mode of a Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksty* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2, pp. 55–60 (In Russian).
- Andreev S. M., Parsunkin B. N., Akhmetov T. U. The Development and Investigation of Billet Heating Energy Saving Control System in Sheet Mill Reheating Furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 122–128 (In Russian).
- Pchelintsev A. N., Pogonin V. A. A Method of Determining the Control Parameters in the Energy-Saving Control Problem. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, no. 10(2), pp. 33–36.
- Yakushkin I. P. Methodology to Determine Heat Losses as an Element of a Ventilation Automatic Control Energy-Saving System. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, no. 7(5), pp. 390–396.
- Shamkin V. N., Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N. Using Destabilization Control to Improve the Functioning of Complex Multidimensional Technological Objects on the Time Interval. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, no. 12(24), pp. 7198–7217.
- Shepel' V. N., Tripkosh V. A. The Recognition Algorithm of the Production Situations in Management Information Systems Based on Compound Bayesian Task Decision. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovations. Investments], 2017, no. 12, pp. 97–101 (In Russian).
- Stepanov M. F., Stepanov A. M., Mihajlova L. S., Zheronkina A. A. System for Modeling Control Processes of Non-Stationary Nonlinear Objects by Intelligent Control Systems. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah — MMTT*, 2015, no. 7, pp. 179–186 (In Russian).
- Dzhambakieva N. R. Methodologies and Technologies for the Development of Knowledge Bases. *Alleya nauki*, 2018, vol. 2 no. 4 (20), pp. 1000–1002. Available at: <http://alley-science.ru/> (accessed 18 May 2018). (In Russian).
- Anisimov D. N., Fyodorova E. V., Gryaznov S. M. Evaluation of the Properties of Fuzzy Control Systems in the Stage of Formation of the Knowledge Base. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, no. 19(5), pp. 291–297 (In Russian).
- Kondratenko Y., Korobko O. V., Kozlov O. V. PLC-based Systems for Data Acquisition and Supervisory Control of Environment-Friendly Energy-Saving Technologies. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, no. 74, pp. 247–267.