

# Принципы построения информационного обеспечения интеллектуальных энергосберегающих систем управления

Д. Ю. Муромцев<sup>1</sup>, А. Н. Грибков<sup>2</sup>, И. В. Тюрин<sup>3</sup>, В. Н. Шамкин<sup>4</sup>

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

<sup>1</sup>mdjur@mail.ru, <sup>2</sup>GribkovAlexey@yandex.ru, <sup>3</sup>tyrinilja@yandex.ru, <sup>4</sup>shamkin-v@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены подходы к формированию состава информационного обеспечения интеллектуальной системы энергосберегающего управления, функциональное ядро которой образовано экспертной системой. Даны сведения об информации, хранимой в базе данных и моделях доступа к данным. Представлены принципы представления знаний в стратифицированной фреймовой базе знаний иерархической структуры. Приведен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева.

**Ключевые слова:** энергосбережение; многомерные объекты; база данных; база знаний; экспертная система; система управления; множество состояний функционирования

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к экологичности и экономичности промышленного оборудования предполагают широкое внедрение перспективных инновационных методов управления энергоемкими объектами, таких как интеллектуальные и энергосберегающие технологии. В настоящее время в подавляющем большинстве случаев при производстве продукции учитываются лишь затраты на извлечение ископаемых ресурсов, поэтому в конечную цену изготовленного товара не включены экологические последствия воздействия на окружающую среду твердых, жидких и газообразных отходов, являющихся побочным продуктом выработки энергии. Промышленно развитые страны для выработки энергии потребляют огромное количество природного углеводородного сырья, и в обозримом будущем, мировые запасы нефти и газа истощатся, поэтому фактор ограниченности ресурсов также определяет потребность в широком применении энергосберегающих технологий. Особенностью отечественной промышленности является неэффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Многие энергоемкие промышленные установки обладают достаточно низким КПД, что приводит к огромным

энергетическим потерям.

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

К наиболее энергоемкому промышленному оборудованию в первую очередь следует отнести тепловые технологические установки – разнообразные печи, сушилки, вулканизаторы, котельные и холодильные установки. 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.

## II. ОСОБЕННОСТИ МНОГОМЕРНЫХ УСТАНОВОК КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Основными особенностями многомерных технологических установок как объектов управления являются следующие:

- 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.

Эффективность функционирования многомерного технологического объекта определяется его свойствами безотказности, режимами работы, внешними воздействиями и другими дестабилизирующими

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты №17-08-00457-а и №18-08-00555-а

факторами детерминированной, вероятностной или нечеткой природы. Для учета всех этих факторов в совокупности вводится множество состояний работоспособности (МСР), множество состояний функционирования (МСФ) и нечеткое множество (НМ), образующих некое пространство, схематичное представление которого показано на рис. 1. На данном рисунке введены следующие обозначения:  $H$  – пространство состояний функционирования;  $H_{SPS}$  – множество производственных ситуаций;  $H_{SHS}$  – множество состояний работоспособности;  $H_{FS}$  – дискретное множество, получаемое из нечетких множеств с применением процедуры, аналогичной лингвистической аппроксимации.

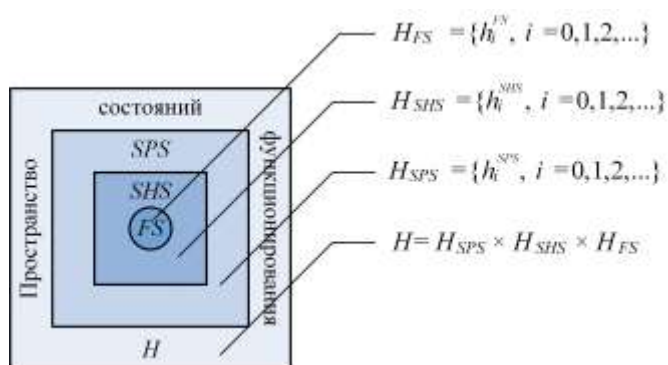


Рис. 1. Компоненты пространства состояний функционирования

МСР 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 [1, 2], основанных на декомпозиции системы, построении моделей состояний работоспособности составных частей и системы в целом, а затем решении систем уравнений или использовании рекуррентных формул.

Однако знание 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 [1], 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. 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, цен на энергоносители,

сырье, а также других факторов, для которых нет достаточного статистического материала, и 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 использования методов искусственного интеллекта. 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 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.

### III. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Основу интеллектуальной энергосберегающей системы управления составляет экспертная система (ЭС), упрощенная структура которой приведена на рис. 2 [3]. В ней реализована методология построения гибридных экспертных систем, предназначенных для решения задач управления многомерными энергоемкими технологическими объектами.

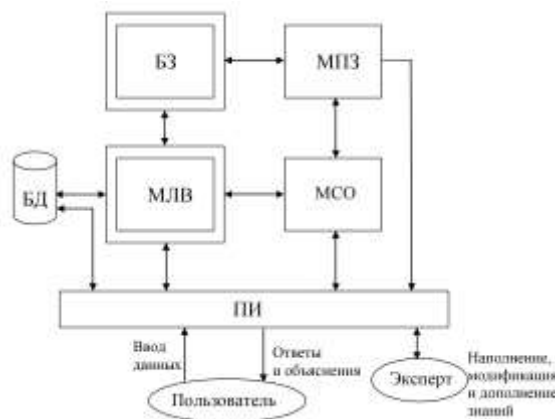


Рис. 2. Обобщенная структурная схема экспертной системы интеллектуальной энергосберегающей системы управления: БЗ – база знаний; БД – база данных; МЛВ – механизм логических выводов; МПЗ – модуль приобретения знаний; МСО – модуль советов и объяснений; ПИ – пользовательский интерфейс

БД содержит сведения о результатах внедрения системы интеллектуального энергосберегающего управления, 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 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 ЭС 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.

БЗ имеет стратифицированную иерархическую структуру в виде множества взаимосвязанных фреймов, образующих единую фреймовую систему, в которой объединяются декларативные и процедурные знания, а также организованы принципы, присущие объектно-ориентированному подходу, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм. Фреймы базы знаний 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 productions, используемые для определения конкретного значения.

В качестве примера на рис. 3 приведен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева.

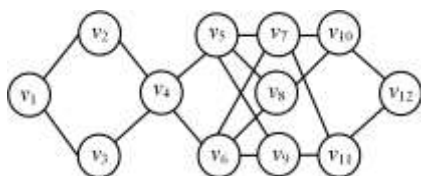


Рис. 3. Интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий

Состав и описание компонентов показанного на рис. 3 графа приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 КОМПОНЕНТЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ГРАФА

Страта	Вершины	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
	$V_7$	программная
стратегий	$V_8$	позиционная
	$V_9$	комбинированная
анализа и синтеза	$V_{10}$	программа управления
	$V_{11}$	синтезирующая функция
имитационного моделирования	$V_{12}$	модели разогрева рабочих зон

Информационная интеллектуальная среда проектировщика энергосберегающих систем управления представляет собой пакет программных модулей.

Модули «Анализ и синтез оптимального управления» по массиву исходных данных задачи оптимального управления  $\langle M, F, S, C \rangle$ , где  $M$  – вид и параметры модели объекта,  $F$  – вид минимизируемого функционала (затраты энергии, расход топлива, время управления и др.),  $S$  – стратегии реализации оптимального управления,  $C$  – условия и ограничения, позволяют оперативно выполнить следующие исследования:

- определить вид функции оптимального управления, реализуемого программной или позиционной стратегиями;
- вычислить параметры оптимального управления;
- рассчитать траектории изменения фазовых координат и управляющего воздействия на временном интервале управления;
- оценить эффект энергосбережения и повышения качества продукции;
- оценить робастность алгоритма оптимального управления при изменении исходных данных;
- разработать программное обеспечение для микропроцессорных устройств;
- решать обратные задачи оптимального управления (определить значения исходных данных для достижения требуемых результатов).

Оригинальный метод анализа и синтеза оптимального управления дает возможность отображать на экране дисплея обобщенный геометрический образ множества возможных решений для конкретных классов математических моделей и исходных данных (рис. 4).

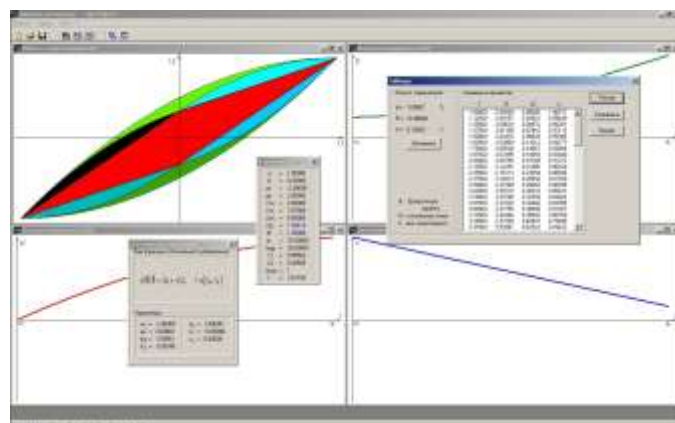


Рис. 4. Интерфейс рабочей среды модуля анализа и синтеза энергосберегающего управления

Комплекс модулей «Идентификация модели объекта управления» позволяет решать следующие задачи:

- проведение эксперимента и предварительную обработку данных;

- определение параметров модели динамики объекта;
- определение закона распределения возмущающих воздействий;
- визуализация процессов идентификации.

На рис. 5 представлен фрагмент интерфейса рабочей среды модуля.

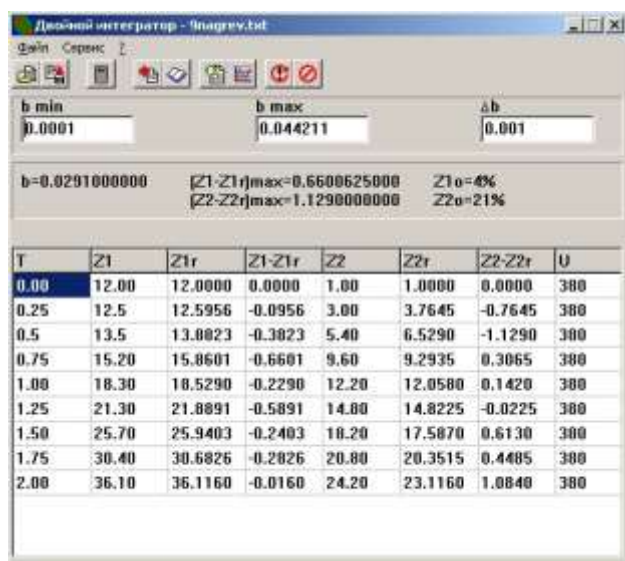


Рис. 5. Фрагмент интерфейса модуля идентификации

Модуль «Принятие обоснованных решений» позволяет использовать широкий набор методов ранжирования альтернативных вариантов, парных сравнений, оптимизации по Парето, Байеса-Лапласа, теории игр и др., а также привлекать экспертов через сеть *Internet*. Следует заметить, что в сети *Internet* размещен действующий модуль ЭСЭУ для анализа и синтеза оптимального управления, ознакомиться с которым можно по адресу <http://crems.jesby.tstu.ru/di>.

С помощью созданной интеллектуальной среды разработано алгоритмическое и программное обеспечение систем энергосберегающего управления для различного оборудования промышленного назначения (установок для термообработки магнитопроводов, смесительных машин по производству полимерных материалов, вулканизаторов, камерных и многозонных электропечей, многосекционных сушилок вальце-ленточного типа, электродвигателей и др.) [4–5].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный ряд теоретических исследований и результаты практической реализации систем энергосберегающего управления показывают, что использование рассмотренной многофункциональной интеллектуальной информационной среды, охватывающей все этапы жизненного цикла проектирования подобных систем позволяют:

- значительно сократить сроки разработки систем ресурсосберегающего управления;
- обеспечить поддержку группового проектирования, в том числе в режиме удаленного доступа;
- использовать опыт предшествующих наработок (за счет применения принципов наследования и постоянного пополнения базы знаний);
- снизить стоимость проектных работ.

При этом предприятию удастся модернизировать системы управления существующих энергоемких промышленных установок, повысить надежность работы оборудования, обеспечить требования энергоэффективности, экологичности и экономичности оборудования, а также снизить себестоимость продукции и повысить уровень её качества.

Область применения полученных результатов по энергосберегающему управлению достаточно обширна и не ограничивается только многозонными и электрокамерными печами. Разработанные системы управления универсальны, легки в эксплуатации, надежны, ремонтпригодны, адаптированы к жестким условиям производств, имеют высокую помехозащищенность, что повышает надежность в целом. Данные системы также масштабируемы под различные инфраструктуры предприятий исходя от конкретных потребностей.

Наиболее широкие возможности появляются при использовании режимов удаленного доступа и управления пространственно распределенными объектами. Удаленный доступ значительно повышает возможности масштабного контроля процессов. Это особенно актуально для компаний, которые имеют множество представительств и могут из центрального офиса головного предприятия следить и управлять за всеми технологическими процессами дочерних филиалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Муромцев, Ю.Л. Определение вероятностей состояний сложной системы методом теории графов. – В кн.: Алгоритмы и структура специализированных вычислительных систем. Тула. ТПИ, 1980. С.125–128.
- [2] Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. Н.А. Ушакова. М.: Наука, 1985. 327 с.
- [3] Муромцев, Ю.Л., Тюрин, И.В. Информационно-инструментальная среда разработки алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления промышленными объектами // Проблемы управления. 2007. № 5. С. 69–75.
- [4] 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. No 5. p. 390-396.
- [5] Парсункин, Б.Н., С.В., Андреев, С.М., Ахметов, Т.У. Энергосберегающий нагрев непрерывнолитых заготовок в нестационарных условиях работы методических печей // Сталь. 2014. № 4. С. 48–52.