

# Концептуальная модель базы данных системы энергосберегающего управления многомерными технологическими объектами

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

Тамбовский государственный технический университет

<sup>1</sup>GribkovAlexey@yandex.ru, <sup>2</sup>Postmaster@nauka.tstu.ru,

<sup>3</sup>Shamkin-V@mail.ru, <sup>4</sup>TyrinIlya@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрены теоретические и практические аспекты построения концептуальной модели базы данных системы энергосберегающего управления многомерными технологическими объектами на множестве состояний функционирования.

**Ключевые слова:** система энергосберегающего управления; концептуальная модель; база данных; многомерный технологический объект; множество состояний функционирования

## I. ВВЕДЕНИЕ

Системы энергосберегающего управления (СЭУ) сложными технологическими объектами находят широкое применение в различных отраслях промышленности. СЭУ позволяют не только существенно снизить энергозатраты, но и повысить производительность технологических процессов, обеспечивая при этом качественные показатели выпускаемой продукции. В связи с этим вопросы, связанные с разработкой таких систем являются весьма актуальными.

Практически все современные технологические установки, применяемые в современной промышленности, с точки зрения автоматизации, представляют собой сложные многомерные объекты, имеющие множество взаимосвязанных входных и выходных переменных [1]. Примерами таких объектов являются теплотехнологические аппараты (сушильные установки, промышленные печи, котельные установки и др.), которые не только широко распространены, но и относятся к наиболее энергоемким объектам на производстве [2].

В большинстве случаев разработка алгоритмического обеспечения для СЭУ, обеспечивающих решение задач оптимального управления многомерными технологическими объектами, представляет собой «научное» исследование, поскольку в состав алгоритмического обеспечения системы могут включаться достаточно сложные алгоритмы (идентификации моделей; анализа и синтеза оптимального управления на множестве

состояний функционирования; имитационного моделирования; принятия решений в условиях неопределенности и т.д.), большинство из которых должны выполняться в режиме реального времени.

Поэтому, современные СЭУ, по сути, представляют собой мощные вычислительные компьютерные комплексы, одним из основных компонентов которых является сложное программное и информационное обеспечение, включающее базу знаний и базу данных, которые обеспечивают основные функциональные возможности системы.

## II. БАЗА ДАННЫХ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Одним из важнейших этапов разработки программного обеспечения СЭУ является ее структурирование, т.е. выделение подсистем и модулей. В структуре СЭУ многомерными технологическими объектами можно выделить следующие основные компоненты: подсистему управления знаниями и данными, подсистему интерфейса и шесть базовых программных модулей [3].

Подсистема управления знаниями и данными включает: базу знаний; машину вывода; базу данных и систему управления базой данных. Подсистема интерфейса состоит из модуля ввода исходных данных и модуля когнитивной графики [4], а также интегрированной среды разработки.

Программные модули, входящие в состав СЭУ предназначены для выполнения следующих функций: идентификация и динамики объекта управления; полный анализ задач оптимального управления (ЗОУ); синтез оптимальных управляющих воздействий; имитационное моделирование; идентификация текущего состояния функционирования; планирование эксперимента. Рассмотренная структура СЭУ является в достаточной степени универсальной и инвариантна к различным объектам управления.

Программные модули и подсистемы СЭУ обмениваются друг с другом данными при помощи базы данных, в которой сохраняются результаты, полученные

всеми модулями системы, поэтому база данных является одним из ключевых компонентов, к которому обращаются все подсистемы и модули СЭУ.

Конкретная структура и модель базы данных во многом будет определяться особенностями СЭУ и объекта управления. При этом, необходимо также учитывать, что архитектура программного обеспечения СЭУ в значительной степени зависит от того, к какому из четырех классов на множестве состояний функционирования относится рассматриваемая СЭУ [3]. Данное обстоятельство, в свою очередь, отражается и на структуре базы данных системы.

Тем не менее, можно выделить ряд структурных компонентов модели базы данных, которые будут присутствовать практически во всех СЭУ многомерными технологическими объектами. Данные компоненты можно представить в виде обобщенной структуры модели базы данных.

### III. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛИ БАЗЫ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Одним из наиболее популярных стандартов, используемых для представления семантики описываемой предметной области и разработки концептуальной модели базы данных, является стандарт IDEF1X, основанный на моделях и методах, предложенных Ченом и Баркером [5, 6], объединенных с понятиями реляционной теории Кодда [7]. Следует отметить, что реляционные базы данных в настоящее время являются наиболее распространенными средами хранения структурированной информации в автоматизированных информационных системах различного назначения (управления, проектирования и др.) [8].

Нотация IDEF1X представляет собой формализованный язык, который предназначен для описания структур данных, основными компонентами которого являются сущности, отношения между сущностями и атрибуты. Сущность представляет собой некоторое множество экземпляров объектов, обладающих общими характеристиками (атрибутами). Отношения представляют собой связи между двумя и более сущностями. При этом, для обеспечения однозначной идентификации конкретного экземпляра сущности используют некоторый набор атрибутов называемый ключевым.

В качестве основных сущностей в обобщенной структуре модели базы данных СЭУ можно выделить следующие:

- «Исходные данные», содержащая сведения об объекте управления, включая значения основных режимных параметров и массивы реквизитов ЗОУ;
- «Результаты анализа ЗОУ», содержащая результаты полного анализа ЗОУ для конкретного массива исходных данных [9];
- «Алгоритмы управления», включающая значения компонентов переменной состояния

функционирования и соответствующие им алгоритмы синтеза оптимальных управляющих воздействий;

- «Результаты функционирования СЭУ», обеспечивающая хранение статистических данных по результатам функционирования СЭУ.

Основными атрибутами сущности «Исходные данные», определяющими массивы реквизитов ЗОУ, могут быть: размерность и значения параметров модели динамики; границы временного интервала управления; ограничения, накладываемые на управляющие воздействия в каждый момент времени; начальное и конечное значения фазовых координат; характеристики возмущающих воздействий, действующих по каналам управления и измерения; ограничения на допустимый лимит энергии и т.д.

В качестве основных атрибутов сущности «Результаты анализа ЗОУ» можно выделить: расчетные значения синтезирующих переменных и фазовых координат; возможность существования решения ЗОУ для заданных исходных данных; вид и параметры функций оптимального управления.

Основными атрибутами сущности «Результаты функционирования СЭУ» являются значения входных и выходных переменных объекта управления. В качестве входных переменных рассматриваются управляющие воздействия, синтезируемые системой по результатам полного анализа ЗОУ и имитационного моделирования (непосредственный выбор алгоритма синтеза осуществляется по идентифицированному значению переменной состояния функционирования). Выходные переменные, измеряются соответствующими датчиками (температуры, давления, влажности и т.д.) и по каналу измерения поступают в систему. Помимо этого, в данной сущности также могут храниться значения минимизируемого функционала (например, затрат энергии или расхода топлива).

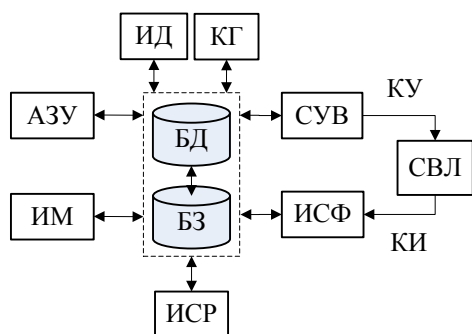
Помимо рассмотренных сущностей в состав модели базы данных могут включаться сущности, содержащие результаты идентификации моделей динамики для различных состояний функционирования системы, имитационного моделирования работы СЭУ и т.д.

### IV. ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ БАЗЫ ДАННЫХ

Рассмотрим практический пример построения концептуальной модели базы данных СЭУ группой сложных теплотехнологических аппаратов. В качестве объектов управления рассматриваются конвективные многосекционные вальце-ленточные сушильные установки, используемые для сушки пастообразных материалов [10].

С точки зрения автоматизации, каждую сушильную установку можно рассматривать как многомерный объект, в котором в качестве управляющих воздействий используются степени открытия клапанов подачи пара в калориферы, а в качестве фазовых координат – значения

СЭУ обеспечивает оптимальное управление множеством однотипных объектов (сушильных установок), которые расположены в нескольких цехах и отличаются друг от друга технологическими и конструктивными параметрами (количеством секций, типами установленных в секциях калориферов и т.д.). Рассматриваемая СЭУ относится к третьему классу систем на множестве состояний функционирования [12], т.е. значение переменной состояния функционирования до начала управления известно и на временном интервале управления оно может меняться, но в каждый момент времени может быть идентифицировано с высокой точностью. Структурная схема СЭУ группой сушильных установок приведена на рис. 1.

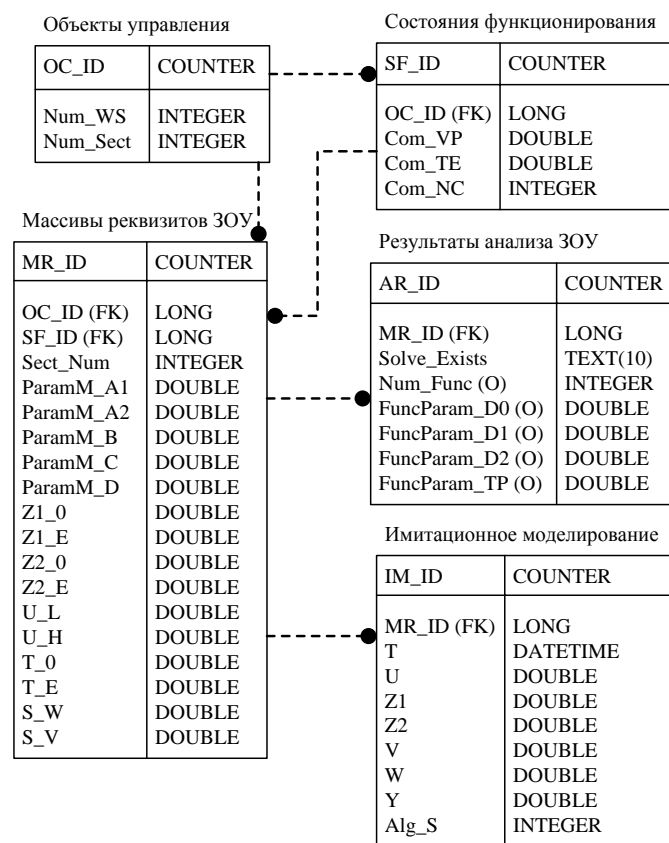


БД – база данных; БЗ – база знаний; АЗУ – модуль анализа ЗОУ; ИМ – модуль имитационного моделирования; СУВ – модуль синтеза оптимальных управляющих воздействий; ИСФ – модуль идентификации текущего состояния функционирования; ИД – модуль ввода исходных данных; КГ – модуль когнитивной графики; ИСР – интегрированная среда разработки; СВЛ – сушильные установки вальце-ленточного типа (объекты управления); КУ – каналы управления; КИ – каналы измерения.

На вход СЭУ поступают исходные данные, которые задаются оператором при помощи модуля ИД или загружаются из БД, из них формируются массивы реквизитов ЗОУ. Затем проводится анализ ЗОУ в модуле АЗУ и имитационное моделирование в модуле ИМ, после чего производится непосредственно управление сушильной установкой и выводятся результаты при помощи модуля КГ. Процесс управления сушильной установкой осуществляется следующим образом: вначале на основе данных полученных от датчиков, идентифицируется текущее состояние функционирования сушильной установки при помощи модуля ИСФ, затем, по результатам анализа ЗОУ и имитационного моделирования, выбирается наиболее оптимальный алгоритм синтеза управляющих воздействий, который реализуется модулем СУВ. При этом осуществляется

Для каждой сушильной установки, в зависимости от ее текущего состояния функционирования, решаются разные ЗОУ и выбираются различные алгоритмы синтеза оптимальных управляющих воздействий [13].

Рассмотрим фрагмент модели базы данных СЭУ, связанный с работой программных модулей ввода исходных данных, анализа ЗОУ, имитационного моделирования и идентификации состояния функционирования (рис. 2). В качестве предметно-значимых сущностей рассматриваются: «Объекты управления», «Состояния функционирования», «Массивы реквизитов ЗОУ», «Результаты анализа ЗОУ», «Имитационное моделирование». Между сущностями «Массивы реквизитов ЗОУ» и «Результаты анализа ЗОУ» используется отношение вида «один-к-одному», между остальными сущностями используются отношения вида «один-ко-многим».



Атрибутами сущности «Объекты управления» являются: OC\_ID – идентификатор объекта (первичный ключ); Num\_WS – номер цеха, в котором находится сушильная установка; Num\_Sect – количество секций сушильной установки.

Сущность «Состояния функционирования» помимо ключевого идентификатора содержит также атрибуты,

связанные с компонентами переменной состояния функционирования: Com\_VP – давление пара; Com\_TE – температура окружающей среды; Com\_NC – наличие возмущений по каналам управления и измерения.

Сущность «Массивы реквизитов ЗОУ» включает атрибуты, содержащие основные компоненты массивов исходных данных, необходимых для решения ЗОУ, в том числе: Sect\_Num – номер секции сушильной установки, для которой решается ЗОУ; ParamM\_A1, ParamM\_A2, ParamM\_B, ParamM\_C, ParamM\_D – параметры модели динамики в виде системы дифференциальных уравнений (в рассматриваемом примере используются модели двойного апериодического звена); Z1\_0, Z1\_E, Z2\_0, Z2\_E – начальные и конечные значения фазовых координат; U\_L, U\_H – граничные значения управляющего воздействия; T\_0, T\_E – начальное и конечное значения временного интервала управления; S\_W, S\_V – интенсивности возмущающих воздействий по каналам управления и измерения.

Атрибутами сущности «Результаты анализа ЗОУ» являются: Solve\_Exists – обозначает наличие или отсутствие решения ЗОУ для заданных исходных данных; Num\_Func – номер вида функции оптимального управления; FuncParam\_D0, FuncParam\_D1, FuncParam\_D2, FuncParam\_TP – расчетные значения параметров функции оптимального управления.

Сущность «Имитационное моделирование» содержит следующие атрибуты: T – текущее значение времени на временном интервале управления; U – величина управляющего воздействия; Z1, Z2 – значения фазовых координат; V, W – значения возмущающих воздействий, которые были сгенерированы в процессе имитационного моделирования; Y – расчетное значение выходной переменной; Alg\_S – номер алгоритма синтеза, который применялся при формировании значений управляющего воздействия U.

Следует отметить, что для практического построения моделей баз данных в настоящее время широко используются CASE-средства [14], которые позволяют не только создать концептуальную модель в нотации IDEF1X, но и осуществить автоматическое преобразование полученной модели в даталогическую модель для конкретной системы управления базами данных. Примером такого программного средства является AllFusion ERwin Data Modeler, позволяющий проектировать реляционные базы данных в стандартах IDEF1x, IE и Dimensional [15].

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы теоретические и практические аспекты построения концептуальной модели базы данных для СЭУ многомерными технологическими объектами. Рассмотрена структура программного обеспечения СЭУ сложными объектами и показана роль базы данных как

ключевого элемента системы, с которым осуществляют взаимодействие все программные компоненты СЭУ. Приведена обобщенная структура модели базы данных СЭУ на основе стандарта IDEF1X и выделены основные предметно-значимые сущности и их атрибуты. Рассмотрен практический пример построения концептуальной модели базы данных СЭУ группой теплотехнологических аппаратов (вальце-ленточных сушильных установок).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. Control system design. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 908 p.
- [2] Артемова С.В. Информационная система оптимального управления теплотехнологическими аппаратами: монография. М.; СПб.; Вена; Гамбург: Изд-во МИНИЦ, 2011. 234 с.
- [3] Грибков А.Н., Муромцев Д.Ю., Шамкин В.Н., Белоусов О.А., Беляев М.П. Архитектура программного обеспечения систем энергосберегающего управления и контроля технологических параметров многомерных объектов на множестве состояний функционирования // Проблемы машиноведения: мат-лы II Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 28-28 фев. 2018 / Омский гос. техн. ун-т, 2018. С. 190-194.
- [4] Чернышов Н.Г., Белоусов О.А. Система управления удаленными динамическими объектами с использованием принципов когнитивной графики // Автоматизация и современные технологии. 2010. №7. С. 28-33.
- [5] Chen P.P.S. The Entity-Relationship model – toward a unified view of data // ACM Transactions on Database Systems. 1976. V.1, No.1. P. 9-36.
- [6] Barker R. CASE method. Entity-Relationship modeling. N.Y.: Addison Wesley Publishing Company, 1991. 350 p.
- [7] Codd E.F. A relational model of data for large shared data banks // Communications of the ACM. 1970. No.13(6). P. 377-387.
- [8] Мокрозуб В.Г. Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 108 с.
- [9] 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.
- [10] Брянкин К.В., Дегтярев А.А., Богачев Д.А., Бельков А.И. Технологические режимы сушки термолабильных азопигментов на вальцеленточной сушилке // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т.21, №4. С. 615-623.
- [11] Грибков А.Н. Информационно-управляющая система динамическими режимами в многосекционных сушильных установках // Информатика и системы управления. 2009. №2(20). С. 123-129.
- [12] Муромцев Ю.Л., Ляпин Л.Н., Попова О.В. Моделирование и оптимизация сложных систем при изменениях состояния функционирования. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. 164 с.
- [13] Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н., Шамкин В.Н. Методика выбора алгоритма синтеза управляющих воздействий многомерным технологическим объектом на множестве состояний функционирования // Информатика и системы управления. 2017. №3(53). С. 109-118.
- [14] Суркова Н.Е., Остроух А.В. Методология структурного проектирования информационных систем: монография. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. 190 с.
- [15] Туманов В.Е., Маклаков С.В. Проектирование реляционных хранилищ данных. М.: Диалог-МИФИ, 2007. 333 с.