

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№2(14)/ 2019

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 2 (14)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
Andrianov A.N.
Arshinskiy L.V.
Bachkova I.A.
Berestneva O.G.
Boukhanovsky A.V.
Bychkov I.V.
Chubarov L.B.
Donskoy V.I.

Dunaev M.P.
Eliseev S.V.
Gornov A.Y.
Gribova V.V.
Groumpos P.
Hodashinsky I.A.
Kalimoldaev M.N.
Karpenko A.P.
Kazakov A.L.
Khamisov O.V.
Lis R.
Massel L.V.
Mokhor V.V.
Moskvichev V.V.
Ovtcharova J.
Popov G.T.
Smirnov S.V.
Stylios C.
Voevodin V.V.
Voropai N.I.
Woern H.
Wolfengagen V.E.
Yusupova N.I.
Zorina T.G.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Андрианов А.Н., д.ф.-м.н., Москва, ИПМ РАН
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Грумпус П., Греция, University of Patras
Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Казakov А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКБ «Наука» СО РАН
Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Стилюс Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ
Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
Executive Editor
Makagonova N.N.
Editor Kopaigorodsky A.N.
Editor Massel A.G.
Designer Ivanov R.A.

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор
Макагонова Н.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Копайгородский А.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер Иванов Р.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Working contacts

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Рабочие контакты

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

Массель Л.В., e-mail: massel@isem.irk.ru

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Макагонова Н.Н., e-mail: mak@isem.irk.ru

Сайт журнала и конференции ИМТ - <http://imt.isem.irk.ru>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018 г.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Подписано в печать 24.06.2019 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Информационные и интеллектуальные технологии

Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации	5
Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф. Построение информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций	16
Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Коршунов С.А. Разработка и использование метамodelей для синтеза спецификаций и кодов баз знаний	26
Колосок И.Н., Гурина Л.А. Оценка рисков кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры интеллектуальной энергетической системы	40
Соловьев В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования	52
Аршинский Л.В., Нитежук М.С., Шлаустас Р.Ю. Обнаружение противоречий в продукционной базе знаний средствами V^{tf} -логик	62

Методы математического моделирования

Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности	69
Дзюбина Т.В., Илькевич Н.И., Сурнин Н.В. Оценка структурной надежности газотранспортной системы, формируемой на востоке России	88
Агафонов Г.В. О применении единой динамической модели для прогнозирования развития энергетики и экономики на уровне страны и отдельных регионов	101

Программные системы и комплексы

Антонов А.С. Информационная структура алгоритмов и открытая энциклопедия AlgoWiki	112
Белоус В.В., Гроцев С.В., Карпенко А.П. Web-ориентированная система оценки качества Парето-аппроксимации в задачах многоцелевой оптимизации	122
Дунаев М.П., Дунаев А.М. Автоматизированная система управления процессами сушки древесины	133
Попова О.М. Разработка прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети с учетом требований интеллектуальной ЭЭС	142
Зорина Т.Г., Александрович С.А., Майсюк Е.П., Массель А.Г. Влияние энергетики на геоэкологию регионов (Российская Федерация и Республика Беларусь)	151

Information and intelligent technologies

Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Павлов A.I. Principles of information technology for solving inter-disciplinary problems of technogenic safety provision on the basis of self-organization	5
Doronin S.V., Reizmunt E.M., Filippova Y.F. Creation an informational-computational metamodel of deformation and destruction of structurally complex constructions	16
Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu., Korshunov S.A. Metamodels for specifications and code generation of knowledge bases	26
Kolosok I.N., Gurina L.A. Cybersecurity risk assessment of information and communication infrastructure of intelligent energy system	40
Solovjev V.I. Improvement of the control system of selection and adaptation of staff with it tools	52
Arshinskiy L.V., Nitezhuik M.S., Shlaustas R.Yu. Detection of contradictions in production knowledge base by means of V^{TF} -logic	62

Mathematical modeling methods

Cherkashin A.K. Innovative mathematics: a search of the bases and limits of modeling reality	69
Dzyubina T.V., Ilkevich N.I., Surnin N.V. Structural reliability assessment of gas supply system which forming on Far East of Russia	88
Agafonov G.V. The application of single dynamic model to forecast energy and economic development at the national and regional levels	101

Program systems and complex

Antonov A.S. Information structure of algorithms and open encyclopedia AlgoWiki	112
Belous V.V., Groshev S.V., Karpenko A.P. Web-oriented system for quality estimation of Pareto-approximation in multi-objective tasks	122
Dunaev M.P., Dunaev A.M. Automated control system of wood drying processes	133
Popova O.M. Software prototyping for the problem of development of a backbone electrical network of intelligent electric power system	142
Zorina T.G., Aliaksandrovich S.A., Maysyuk E.P., Massel A.G. The energy sector impact on the geocology of a region (Russian Federation and Belarus Republic)	151

**ПРИНЦИПЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ**

Берман Александр Фишелевич

Д.т.н., г.н.с., e-mail: berman@icc.ru

Николайчук Ольга Анатольевна

Д.т.н., с.н.с., e-mail: nikoly@icc.ru

Юрин Александр Юрьевич

К.т.н., зав. лабораторией «Информационных технологий исследования природной и техногенной безопасности», e-mail: iskander@icc.ru

Павлов Александр Иннокентьевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: asd@icc.ru

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134

Аннотация. Проблема обоснования свойств сложных технических систем, является междисциплинарной, так как требует применения знаний практически всех общетехнических и специальных инженерных дисциплин, некоторых разделов физики, химии и психологии, а также методов и средств математического моделирования и информационных технологий. Одним из перспективных методов создания моделей таких систем является применение принципов самоорганизации, как отражающих действия коллектива исследователей, так и использующих соответствующие переменные и параметры, характеризующие динамику состояния объекта. В работе предлагается описать основные принципы информационной технологии исследования безопасности, где формирование решений (моделирование) осуществляется на основе самоорганизующегося алгоритма, реализующего взаимодействие «решателей» дисциплинарных и междисциплинарных задач различной компетенции и специализации.

Ключевые слова: междисциплинарная задача, онтология, компоненты, модельно-управляемый подход, согласование знаний экспертов, групповое принятие решений, самоорганизация.

Цитирование: Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 5–15. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-01

Введение. Обоснование техногенной безопасности создаваемых и эксплуатируемых опасных промышленных объектов (ОПО) остается актуальной проблемой, решение которой требует обработки огромных объемов данных и знаний различных научных, технических и научно-технических дисциплин [7, 8]. Причем для некоторых совокупностей данных и знаний, принадлежащих различным дисциплинам, не определены типы связей (отношений,

закономерностей), что затрудняет формулировку как дисциплинарных, так и междисциплинарных целей и может являться одной из причин недостаточно корректной постановки междисциплинарных задач. Кроме того, на стадии создания всегда имеет место некоторая неопределенность прочностной, ресурсной и структурной надежности и безопасности вследствие несовершенства и нарушения методов и средств создания объектов, невозможности достаточно адекватных испытаний элементов и компонентов сложных уникальных ОПО, что приводит к внезапным отказам. Вследствие этих ограничений рассматриваемая проблема является междисциплинарной и неопределенной, не имеет общего аналитического решения, характеризуется высокой вычислительной сложностью и для ее решения используются разнообразные эвристические алгоритмы.

Для решения поставленной проблемы актуальной является разработка информационной технологии, обеспечивающей работу коллектива специалистов (экспертов) из различных дисциплин для решения междисциплинарных задач (МДЗ) обеспечения техногенной безопасности, удовлетворяющая следующим требованиям:

- наличие общего информационного, математического, методологического и программного пространства;
- обеспечение взаимодействия специалистов из различных дисциплин;
- наличие различных возможностей согласования мнений групп экспертов;
- возможность обработки гетерогенной информации различного уровня структуризации;
- возможность использования гетерогенного программного обеспечения (открытых программных кодов, сторонних программ, собственных разработок, гибридных систем и др.);
- понижение квалификационных требований для специалистов-предметников в областях программирования и методов представления и обработки знаний до уровня взаимодействия с программной системой в терминах предметной области;
- осуществление максимальной поддержки принятия решений на всех этапах решения задач;
- повышение степени автоматизации и адаптивности управления процессом решения задачи.

Перечисленные требования к технологии обеспечиваются на основе следующих принципов и соответствующим им подходов:

- обеспечение общего пространства – на основе онтологического моделирования,
- организация взаимодействия специалистов – на основе применения методов группового принятия решений,
- использование гетерогенного информационного и программного обеспечения – при поддержке принципа разделения методов представления и обработки информации, реализация которого будет осуществлена на основе компонентного и модельно-ориентированного подходов,
- поддержка принятия решений – путем применения методов обработки знаний (например, экспертных систем),
- автоматизация и адаптивность управления – на основе самоорганизующихся алгоритмов.

Рассмотрим подробнее особенности каждого из подходов в аспекте применения для разрабатываемой технологии.

Онтология. Предлагаемая модель онтологии использует понятия онтологий предметной и проблемной областей [3, 12, 13]. Для описания аспекта междисциплинарности задач предлагается использовать онтологию дисциплин, где отражена информация, относящаяся к рассматриваемой дисциплине, ее понятия, закономерности, задачи. Модели проблемной области охватывают знания о способах решения разнообразных типов задач. При этом для эффективного решения каждой задачи предусмотрено адекватное представление данных и знаний, а также алгоритмов, реализующих решение. Подобная модель онтологии позволяет описать иерархию задач, методы их решения и программное обеспечение («решатели»), реализующее данные методы, разделяя информацию на предметно-зависимую и предметно-независимую, что обеспечивает требуемые свойства адаптивности программной системы, а также возможности взаимодействия специалистов и системы в терминах предметных областей.

Групповое принятие решений. Необходимость объединения усилий экспертов из самых различных предметных областей (дисциплин) при постановке и решении междисциплинарных задач обуславливает актуальность задачи согласования их мнений (знаний). Задача согласования мнений относится к типичной задаче теории принятия решений, когда необходимо коллективом выделить один или несколько лучших объектов (элементов постановки задачи), характеризуемых многими разнородными признаками. Существует сравнительно немного методов группового упорядочения многопризнаковых объектов [10]. Отметим методы вербального анализа решений, которые решают слабоструктурируемые проблемы выбора, где предпочтения нескольких ЛПР могут быть несогласованными и которые позволяют: получать информацию от экспертов на привычном для их профессиональной деятельности языке; использовать нечисловую информацию без каких-либо ее преобразований в числовую; проверять согласованность суждений ЛПР и устранять выявленные противоречия; объяснять полученное решение [10].

Организация процесса обсуждения может быть осуществлена как при личном общении, так и дистанционно, на основе использования различных методов/процедур ведения дискуссии, которые будут предлагаться системой (выбираться координатором/модератором) в зависимости от успеха решения задач, психологического состояния коллектива и т.д. Среди процедур можно выделить: процедуру «парных взаимодействий», «последовательную» процедуру, процедуру «качественной обратной связи» и др. [16].

На данном этапе выделены три вида возможных несогласованностей/неполноты:

- неполнота данных, которая возникает тогда, когда специалист другой дисциплины, не участвующий ранее в формировании задачи, считает, что при формулировке задачи не учтены некоторые дополнительные данные;
- неполнота знаний, которая возникает тогда, когда специалисты других дисциплин считают, что при формулировке задачи не учтены некоторые закономерности аналитического или другого вида;
- неполнота методов, которая возникает тогда, когда специалист другой дисциплины считает, что при решении задачи могут быть использованы другие возможные методы ее решения.

Авторами в рамках рассматриваемой технологии предложен метод разрешения неполноты на основе методов группового выбора [2].

Компонентный подход. Предметно-независимая методологическая часть обеспечения предлагаемой технологии может содержать различные алгоритмы, например, алгоритмы поиска, адаптации, сохранения прецедентов и т.п., а также методы реализации проблемно-ориентированной специфики решаемых задач. Данное представление позволяет выделить типовую функциональность, которая реализуется на основе конечного множества операций. Эти операции могут быть сгруппированы в интерфейсы, которые должны быть реализованы соответствующими программными средствами (компонентами), что обуславливает применение компонентного подхода [9, 15] для реализации технологии.

Модельно-ориентированный подход. Подход Model Drive Development, MDE/MDD/MDA – направление в области программной инженерии, предполагающее разработку программных систем на основе трансформации и интерпретации информационных моделей [14]. В рамках данного подхода процесс разработки программного обеспечения представляет собой последовательное преобразование моделей, с разным уровнем детализации, где на завершающем этапе генерируется исходный код программы [17]. При этом основное внимание разработчиков обращено на формирование метамodelей структуры обрабатываемых данных и алгоритмов их обработки.

В рамках рассматриваемой технологии MDD-подход обеспечивает создание интеллектуальных программных компонентов («решателей»), являющихся программным обеспечением для решения сформулированных задач. Среди этих компонентов в настоящее время нами выделяются продукционные и прецедентные экспертные системы, хотя этот список может быть расширен в дальнейшем.

Использование модельно-управляемого подхода позволяет повысить степень автоматизации, снизить квалификационные требования в области программирования для потенциальных пользователей, уменьшить сроки создания (за счет исключения этапа концептуализации и сокращения этапа тестирования) и возможность повторного использования интеллектуальных компонентов («решателей») за счет унификации представления их элементов в виде моделей. MDD в сочетании с компонентным подходом позволяет разделить информационное (в широком смысле) и алгоритмическое обеспечение и создать условия для их независимой разработки и повторного использования каждого.

Самоорганизация. В настоящее время разработаны некоторые методы и модели искусственной самоорганизации для формирования согласованных решений и управления сложными и взаимодействующими объектами [2, 5, 6]. Искусственная самоорганизация как процесс представляет собой автоматическую смену (адаптацию) программы действия (алгоритм принятия решений) при изменении свойств управляемого объекта, цели управления или параметров окружающей среды. Как следует из работ [6, 11], систему можно считать самоорганизующейся, если она без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру.

Предлагается решение междисциплинарной задачи осуществлять на основе самоорганизующегося алгоритма, реализующего процесс взаимодействия «решателей» дисциплинарных и междисциплинарных задач различной компетенции и специализации [2]. Механизм самоорганизации состоит в том, что из «решателей» каждый раз создается новая вычислительная структура в зависимости от объекта исследования, выбранной

пользователем модели задачи, исходных данных, характеризующих свойства объекта, воздействующие факторы и т.д. Вычислительная структура определяется собственным информационным пространством, включающим онтологию предметной и проблемной областей, баз данных и знаний, а также программное обеспечение, состоящее из вычислительных модулей и экспертных систем («решателей»).

За формирование модели МДЗ и ее решение отвечает «интеллектуальный планировщик» [2], который осуществляет мониторинг состояния задачи и генерирует план решения на основе значений индикаторов (потенциальных функций), характеризующих состояние текущей задачи, и локальных правил, являющихся основой самоорганизующегося поведения. В данном случае, план – это описание организации взаимодействия «решателей» с указанием направления потока данных. Отметим, что «продвижение» по данному плану в процессе решения МДЗ (on-line решение) также может быть откорректировано планировщиком с учетом значений индикаторов.

Концептуальные этапы технологии. Технология состоит из двух стадий: первая – описание предметно- и проблемно-ориентированной информации с помощью предлагаемых инструментальных средств и, как следствие, создание предметно-ориентированного инструментального средства, вторая – собственно применение данного инструментального средства для решения междисциплинарных задач.

Перечислим этапы первой стадии предлагаемой технологии:

1) постановка междисциплинарной задачи; данный этап осуществляется руководителем/координатором задачи с использованием средства онтологического моделирования;

2) определение коллектива экспертов; на данном этапе осуществляются выбор и оценка компетентности экспертов; оценка эксперта выполняется на основе индивидуальных характеристик, параметров текущей деятельности и оценки компетентности [16];

3) создание онтологии междисциплинарной задачи (предметной и проблемной онтологий) [12]; осуществляется описание иерархии задач и их компонентов, согласно предложенной модели онтологии с использованием соответствующих методов извлечения знаний [1]; в таблице 1 представлен пример иерархии задач (рис. 1);

4) описание математических/вычислительных моделей, баз знаний, методов решения (информационное, математическое, интеллектуальное и методологическое обеспечение); осуществляется согласно предложенной модели онтологии, затем следует его создание на основе модельно-управляемого подхода и разработанных авторами методов извлечения знаний из концептуальных моделей [4], а также реализация в виде компонентов;

5) создание «решателей», в том числе на основе стороннего программного обеспечения и модельно-управляемого подхода с использованием предлагаемых авторами инструментальных средств [18];

6) согласование знаний (разрешение неполноты данных, знаний, информации о методах) на основе предложенного метода [2].

Этапы второй стадии:

1) определение исходных данных междисциплинарной задачи;

2) моделирование (решение междисциплинарной задачи) на основе самоорганизующегося алгоритма [2];

3) оценка результатов решения.

Таблица 1. Структура междисциплинарной задачи

Дисциплина	Название задачи	Входные данные	Выходные данные	Модель, метод
Междисциплинарная задача 1. Обеспечить прочностную надежность элементов (деталей) сложных опасных объектов				
Сопротивление материалов	1.1. Расчет напряженно-деформированного состояния	Механические нагрузки, МПа: статические; переменные; динамические.	Компоненты напряженного состояния; комплексная компонента напряженного состояния.	Модели механики сплошных сред. Эмпирическая модель расчетной схемы. Выч. метод решения.
Материаловедение	1.2. Выбор материала	Вид и тип нагрузок; температурные воздействия; воздействующие среды.	Марка материала; свойства материала: предел прочности; предел текучести; предел усталости и др.	Эмпирические модели. Экспертные методы решения.
Междисциплинарная задача	1.3. Расчет прочности и ресурса	Коэффициенты запаса: коэффициент абсолютных размеров сечения, концентрации напряжений, влияния среды; качества плавки и др.	Размеры элемента (детали) и коэффициенты запаса прочности по всем критерия.	Эмпирические методы. Эвристические методы. Экспертные методы.
Технология металлов	1.3.1. Выявить металлургическую наследственность	Возможные дефекты плавки или обработки давлением или термообработки.	Оценить снижение коэф-ов запаса при возможных и пропущенных металлургических дефектах.	Эмпирические методы. Эвристические методы. Экспертные методы.
Технология машиностроения и др.	1.3.2. Выявить технологическую наследственность	Возможные дефекты изготовления или восстановления работоспособности.	Оценить снижение коэффициентов запаса при возможных и пропущенных технологических дефектах.	
Детали машин	1.3.3. Расчет на статическую прочность	Технические требования по коэф. запаса на статическую прочность. Обоснование коэф. запаса.	Размеры детали по данному критерию. Фактический коэф. запаса прочности при статическом нагружении или величина предельной нагрузки.	
	1.3.4. Расчет на циклическую прочность	Технические требования по коэф. запаса на циклическую прочность. Обоснование коэф. запаса.	Размеры детали по данному критерию. Фактический коэф. запаса прочности при циклич. нагружении или максимально-допустимая амплитуда нагрузки.	
	1.3.5. Расчет ресурса	Технические требования по коэффициентам запаса на ресурс при переменных нагрузках. Обоснование коэффициентов запаса.	Размеры детали по данному критерию. Фактический коэф. запаса ресурса при переменных нагрузках или максимально-допустимая амплитуда нагрузки или коэф. асимметрии цикла.	
	1.3.6. Расчет на хрупкое разрушение	Технические требования по критерию «Вязкость разрушения».	Размеры детали или материал по данному критерию. Фактический коэф. запаса.	

Результат решения задачи или ее подзадач может быть неудовлетворительным. В этом случае вновь реализуется самоорганизация процесса решения задачи. В частности, на основе знаний, содержащихся в специальных экспертных системах, отвечающих за поддержку

процесса решения задач, формируется новая последовательность этапов решения: определяется, какие задачи должны быть решены с новыми условиями, какие вопросы необходимо задать экспертам или какие рекомендации сформулировать, чтобы определить новые условия задач.

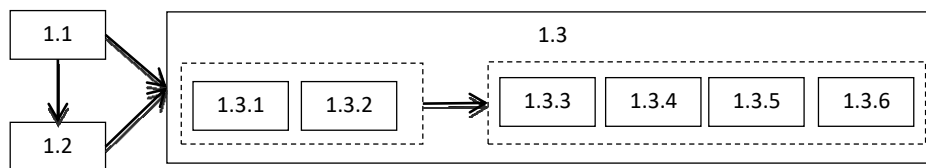


Рис. 1. Последовательность решения задач, перечисленных в таблице 1

Например, база знаний поддержки решения задачи 1 (см. табл.) содержит следующие правила: если получено неудовлетворительное решение на двух и более этапах задачи 1, то необходимо изменить условия подзадачи 1.2 (выбор материала); если получено неудовлетворительное решение на одном этапе задачи 1, то необходимо изменить условия задачи 1.3.1 (выбор технологии); если изменение условий задачи 1.2 не позволяет получить удовлетворительное решение, то изменяются условия задачи 1.1 (изменение расчетной схемы или конструкции); если необходимо изменить условия задачи 1.2 и получено неудовлетворительное решение задачи 1.3.3, то необходимо увеличить предел прочности; если необходимо изменить условия задачи 1.2 и получено неудовлетворительное решение задачи 1.3.4, то необходимо увеличить предел текучести; если необходимо изменить условия задачи 1.2 и получено неудовлетворительное решение задачи 1.3.5, то необходимо увеличить предел усталости; если необходимо изменить условия задачи 1.2 и получено неудовлетворительное решение задачи 1.3.6, то необходимо увеличить коэффициент вязкости разрушения или отношение предела прочности к пределу текучести и др.

Таким образом, после определения способов изменения исходных данных возобновляется первая стадия технологии, могут быть запущены любые из этапов 3-6.

Заключение. В статье рассмотрены основные принципы, подходы и концептуальные этапы информационной технологии решения междисциплинарных задач. Принципы информационной технологии включают совмещение онтологического представления знаний, группового принятия решений, компонентного и модельно-ориентированного подходов, обеспечивающих реализацию самоорганизующегося алгоритма исследования.

В дальнейшем планируются реализация данной технологии и ее применение для решения задач проектирования уникальных механических систем, эксплуатируемых на опасных промышленных объектах.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №№18-07-01164, 18-08-00560, 19-07-00927.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И. Метод приобретения мультидисциплинарных знаний на основе онтологии // Седьмая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии», САИТ – 2017 (13-18 июня 2017 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. М.: ИСА РАН. 2017. Т1. С. 295–302.

2. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И. Самоорганизующийся алгоритм формирования решений для обеспечения требуемого технического состояния сложных опасных объектов // Седьмая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии», САИТ – 2017 (13-18 июня 2017 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. М.: ИСА РАН. 2017. Т1. С. 377–384.
3. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы. Спб.: Из-во «Лань». 2016.
4. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Web-сервис для автоматизированного формирования продукционных баз знаний на основе концептуальных моделей // Программные продукты и системы. 2014. №4. С. 103–107.
5. Каляев И.А., Каляев А.И., Коровин Я.С. Принципы организации и функционирования безлюдного роботизированного производства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Том 17. №11. С. 741–749.
6. Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М. : ИПИ РАН. 2014. 189 с.
7. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 25–36.
8. Махутов Н.А., Берман А.Ф., Николайчук О.А. Некоторые принципы самоорганизации для управления риском техногенных катастроф // Проблемы анализа риска. 2015. Том 12. № 4. С. 34–45.
9. Николайчук О.А., Павлов А.И. Применение компонентного подхода для создания системы автоматизации исследований // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 4 (70). С. 23–32.
10. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М.: Издательский центр «Академия». 2009. 400 с.
11. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. Пер. с англ. Изд. 3. М.: УРСС: ЛЕНАНД. 2014. 320 с.
12. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I. The Ontology Model for Automating the Solution of Multidisciplinary Research Tasks // Proc. the V Intern. Workshop Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI 2018). 2018. Vol. 158. Pp. 1–6.
13. Chandrasekaran B., Josephson J.R., Benjamins V.R. Ontology of Tasks and Methods // IEEE Intelligent Systems. 1998. 14(1). Pp. 20–26.
14. Cretu L.G., Florin D. Model-Driven Engineering of Information Systems: Principles, Techniques, and Practice. Apple Academic Press. 2014.
15. George T. Heineman, William T. Councill (2001). Component-Based Software Engineering: Putting the Pieces Together. Addison-Wesley Professional, Reading, 2001.
16. Gubanov D., Korgin N., Novikov D., Raikov A., E-Expertise: Modern Collective Intelligence. / Series: Studies in Computational Intelligence. vol. 558. Springer International Publishing, 2014. pp. 112.
17. Stahl T., Völter M., Efftinge S. Modellgetriebene Softwareentwicklung. Techniken, Engineering, Management. Heidelberg, Dpunkt-Verlag. 2007

18. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // Expert Systems. 2018. Vol. 35. №5.
-

UDK 004.942:004.4'2:004.891

**PRINCIPLES OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR SOLVING
INTERDISCIPLINARY PROBLEMS OF TECHNOGENIC SAFETY PROVISION
ON THE BASIS OF SELF-ORGANIZATION**

Alexander F. Berman

D.Sc., Professor, e-mail: berman.icc.ru

Olga A. Nikolaychuk

D.Sc., e-mail: nikoly.icc.ru

Alexander Yu. Yurin

PhD., Head. Laboratory of Information technology for investigation of techno-genic safety,
e-mail: iskander@icc.ru

Alexander I. Павлов

PhD., e-mail: Asd@icc.ru

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences (ISDCT SB RAS) 134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The problem of substantiating the properties of complex technical systems has an interdisciplinary character because of it requires the application of knowledge of all general technical and special engineering disciplines, some branches of physics, chemistry and psychology, as well as methods and means for mathematical modeling and information technologies. One of the promising methods for creating relevant models for this problem is the use of the principles of self-organization reflecting both the actions of a team of researchers, and using appropriate variables and parameters characterizing the dynamics of the state of an object. The paper proposes to describe the basic principles of an information technology for creating a self-organizing safety research system, where decision making (modeling) is based on a self-organizing algorithm that implements the interaction of “solvers” of disciplinary and interdisciplinary tasks of different competencies and specializations.

Keywords: interdisciplinary task, ontology, components, model-driven approach, coordination of expert knowledge, group decision making, self-organization

References

1. Berman A.F., Nikolajchuk O.A., Pavlov A.I. Metod priobreteniya mul'tidistsiplinarnykh znaniy na osnove ontologii [Method of acquiring multidisciplinary knowledge based on ontology] // Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija «Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii», SAIT – 2017 (13-18 ijunja 2017 g., g. Svetlogorsk, Rossiya): Trudy konferencii = Proceedings of the

- conference "System Analysis and Information Technologies". Moscow. ISA RAN Publ. 2017. v1. Pp. 295–302. (in Russian)
2. Berman A.F., Nikolajchuk O.A., Pavlov A.I. Samoorganizuyushchiysya algoritm formirovaniya resheniy dlya obespecheniya trebuyemogo tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh opasnykh ob"yektov [Self-organizing solution formation algorithm to ensure the required technical condition of complex hazardous objects] // Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija «Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii», SAIT – 2017 (13-18 ijunya 2017 g., g. Svetlogorsk, Rossiya): Trudy konferencii = Proceedings of the conference "System Analysis and Information Technologies". Moscow. ISA RAN Publ. 2017. v1. Pp. 377–384. (in Russian)
 3. Gavrilova T.A., Kudrjavcev D.V., Muromcev D.I. Inzheneriya znanij. Modeli i metody [Knowledge Engineering. Models and methods]. St. Petersburg. «Lan'» Publ. 2016. (in Russian)
 4. Dorodnyh N.O., Jurin A.Ju. Web-servis dlya avtomatizirovannogo formirovaniya produktsionnykh baz znaniy na osnove kontseptual'nykh modeley [Web service for automated generation of production knowledge bases based on conceptual models] // Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems. 2014. No 4. Pp. 103–107. (in Russian)
 5. Kaljaev I.A., Kaljaev A.I., Korovin Ja.S. Printsipy organizatsii i funkcionirovaniya bezlyudnogo robotizirovannogo proizvodstva [Principles of organization and functioning of deserted robotic production] // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie = Mechatronics, automation, control. 2016. v 17. No 11. Pp. 741–749. (in Russian)
 6. Kolesnikov A.V., Kirikov I.A., Listopad S.V. Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizaciej: koordinacija, soglasovannost', spor [Hybrid Intelligent Systems with Self-Organization: Coordination, Consistency, Dispute]. Moscow. IPI RAN Publ. 2014. 189 p. (in Russian)
 7. Mahutov N.A. Kriterial'naya baza prochnosti, resursa, nadezhnosti, zhivuchesti i bezopasnosti mashin i cheloveko-mashinnykh kompleksov [Criterion base of strength, resource, reliability, survivability and safety of machines and man-machine complexes] // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2013. No 5. Pp. 25–36. (in Russian)
 8. Mahutov N.A., Berman A.F., Nikolajchuk O.A. Nekotoryye printsipy samoorganizatsii dlya upravleniya riskom tekhnogennykh katastrof [Some principles of self-organization to manage the risk of man-made disasters] // Problemy analiza riska = Risk analysis problems. 2015. v 12. No 4. Pp. 34–45. (in Russian)
 9. Nikolajchuk O.A., Pavlov A.I. Primeneniye komponentnogo podkhoda dlya sozdaniya sistemy avtomatizatsii issledovaniy [Using the component approach to create a research automation system] // Vestnik komp'yuternyh i informacionnykh tehnologij = Vestnik of Computer and Information Technologies. 2010. No 4 (70). Pp. 23–32. (in Russian)
 10. Petrovskij A.B. Teorija prinjatija reshenij [Decision making theory]. Moscow. Publishing Center «Akademija». 2009. 400 p. (in Russian)
 11. Haken G. Informacija i samoorganizacija: Makroskopicheskiy podhod k slozhnym sistemam [Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems]. Moscow. URSS: LENAND Publ. 2014. 320 p. (in Russian)

12. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I. The Ontology Model for Automating the Solution of Multidisciplinary Research Tasks // Proc. the V Intern. Workshop Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI 2018). 2018. Vol. 158. Pp. 1–6.
13. Chandrasekaran B., Josephson J.R., Benjamins V.R. Ontology of Tasks and Methods // IEEE Intelligent Systems. 1998. 14(1). Pp. 20–26.
14. Cretu L.G., Florin D. Model-Driven Engineering of Information Systems: Principles, Techniques, and Practice. Apple Academic Press. 2014.
15. George T. Heineman, William T. Councill (2001). Component-Based Software Engineering: Putting the Pieces Together. Addison-Wesley Professional, Reading. 2001.
16. Gubanov D., Korgin N., Novikov D., Raikov A., E-Expertise: Modern Collective Intelligence // Series:Studies in Computational Intelligence. vol. 558. Springer International Publishing. 2014. Pp. 112.
17. Stahl T., Völter M., Efftinge S. Modellgetriebene Softwareentwicklung. Techniken, Engineering, Management. Heidelberg, Dpunkt-Verlag. 2007
18. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // Expert Systems. 2018. Vol. 35. No 5.

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕТАМОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Доронин Сергей Владимирович

К.т.н., доцент, в.н.с., e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru

Рейзмунт Елена Михайловна

К.т.н., н.с., e-mail: e.sigova@gmail.com

Филиппова Юлия Федоровна

М.н.с., e-mail: FilippovaJF@ict.nsc.ru

Лаборатория вычислительной механики и риск-анализа,
Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал,
660049 г. Красноярск, пр. Мира 53

Аннотация. Рассматривается обобщенный подход к анализу деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций, включающий в себя выполнение декомпозиции и разработку структурной модели конструкции, анализ возможных сценариев повреждения и разрушения, декомпозицию задач расчетного анализа и конструирование на этой базе вычислительной модели деформирования и разрушения. Прикладной характер результатов выражается в получении адаптивных (суррогатных) моделей, основанных на результатах вычислительных экспериментов, применяемых при информационной поддержке жизненного цикла конструкций.

Ключевые слова: структурно-сложные конструкции, информационные и вычислительные модели, декомпозиция

Цитирование: Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф. Построение информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 16–25. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-02

Введение. В научно-технической литературе встречается понятие «структурно-неоднородная конструкция», которое, на наш взгляд, не несет существенной семантической нагрузки понятию [2]. Сформулированное определение «структурно-неоднородная конструкция – техническая система, состоящая из неоднородных (неодинаковых) элементов, объединенных неоднородными (неодинаковыми) связями» [2] является предпосылкой построения информационных моделей многоуровневых процессов накопления повреждений в предположении, что известно напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции, как один из важнейших факторов и движущих сил развития повреждений. Вместе с тем, сложность и многовариантность взаимодействий между элементами порождают многообразие напряженных состояний, исследование которых требует обоснования общего методического подхода к анализу деформирования, накопления повреждений и разрушения. В связи с этим целесообразна формулировка более общего определения объекта исследования, подчеркивающего системный характер взаимосвязей

структуры системы и ее возможных состояний: структурно-сложная конструкция – иерархически организованная механическая система, характеризующаяся многообразием элементов, неоднородностью горизонтальных и вертикальных связей и взаимодействий между ними, порождающих большое количество напряженно-деформированных и поврежденных состояний. Структурная сложность включает в себя структурную неоднородность и является более общим и универсальным понятием, фактически предопределяющим необходимость использования методологии и технологий системного анализа при прогнозировании свойств и поведения, в том числе разрушения конструкций сложных технических объектов.

1. Краткий обзор современного состояния подходов к разрушению сложных систем. О разрушении сложных систем говорят не обязательно применительно к механическим конструкциям. Под разрушением систем любой природы понимают изменения ее структуры, вызванные внешними или внутренними возмущениями, и приводящие к нарушению работоспособности системы [3, 5]. Для описания такого изменения, как правило, используются формализованные модели преимущественно в виде графов. Наиболее плодотворными такие модели оказались при анализе и прогнозировании надежности систем [7]. Частично они используются применительно к механическим конструкциям, однако в этом случае обязательным условием является принятие во внимание физико-технических явлений и процессов, приводящих к деградации и нарушению работоспособности [6, 9]. Рассмотрение постановок задач не только анализа надежности, но и прогнозирования комплекса свойств и поведения конструкций технических объектов привело к необходимости системного междисциплинарного изучения взаимосвязи явлений и процессов деградации и разрушения деталей и элементов конструкций [1, 4, 12, 14]. Однако полноценный учет взаимодействия как деталей и элементов конструкций, так и процессов их деградации в рамках подходов механики, оказывается затруднительным. Это приводит к необходимости интеграции разнородных информационных, вычислительных технологий и методов анализа систем [8, 13].

Таким образом, хорошо развитые формализованные, но абстрактные модели и методы, развитые в теории и технологиях системного анализа, сталкиваются с серьезными затруднениями при попытке их применения к структурно-сложным конструкциям. Исследования, направленные на преодоление этих затруднений, приводят как к получению новых знаний о свойствах и поведении конструкций, так и к развитию специфических моделей и методов прикладного системного анализа технических объектов. Возможный вариант подхода к таким исследованиям, заключающийся в развитии информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения, рассматривается в настоящей работе.

2. Метамодель деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций. Как известно, при многомасштабном моделировании рассматриваются несколько уровней деформирования. При рассмотрении машин и конструкций на макроуровне обычно рассматриваются процессы деформирования и разрушения, локализованные в макрообъектах – деталях и элементах конструкций. При анализе структурно-сложных конструкций затруднительно, не выходя за пределы макроуровня, в полной мере учесть процессы системного взаимодействия макрообъектов. Необходим выход на более высокий уровень, который условно можно назвать механикой систем. Он может

быть осуществлен с использованием понятия метамодели, представляющей собой информационную модель более высокого уровня абстракции, описывающей структуру и принципы действия других моделей.

Под метамоделированием деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций будем понимать область знаний и деятельности, связанную с изучением условий возникновения и особенностей постановок задач, обоснованием системы моделей, которая могла бы адекватно описать природу процессов и явлений, протекающих в деформируемых и повреждаемых конструкциях, их эволюцию в пространстве и во времени в течение жизненного цикла.

Определена структура метамодели деформирования и разрушения конструкций на уровне механики систем, минимально необходимая для явного учета взаимодействия деталей и элементов конструкций при их деформировании и разрушении. Метамодель включает в себя структурные модели конструкции, информационные модели сценариев повреждения и разрушения (семантические сети каузального типа [2]), под управлением которых выполняются декомпозиция и содержательная (вербальная) постановка задач расчетного анализа. Вычислительные модели для решения этих задач конструируются с использованием вычислительных моделей деформирования и разрушения сплошных сред с учетом особенностей структуры и сценариев повреждения и разрушения конструкции. В конечном итоге выполняется построение обобщающих суррогатных моделей, обеспечивающих снижение размерности задач и эффективный анализ системных эффектов поведения конструкций в штатных и нештатных условиях функционирования, в том числе при наличии развивающихся дефектов и повреждений (рис. 1).



Рис. 1. Структура информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения структурно-сложной конструкции

Структура информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения является универсальной и применима к любому объекту. Метамодельный подход предполагает обоснование принципов и методов сборки вычислительной модели деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций и в настоящее время слабо формализован. Очевидным представляется, что характер декомпозиции задач расчетного анализа должен порождаться структурой конструкции и сценариями повреждения и

разрушения, а вычислительные модели, конструируемые на основе этой декомпозиции, должны описывать поведение деградирующей конструкции и давать возможности оценивать последствия реализации отдельных ветвей обобщенного сценария.

Рассмотрим далее некоторые примеры, иллюстрирующие отдельные аспекты рассматриваемого подхода, на примере конструкции крупногабаритной прецизионной антенны наземных систем спутниковой связи и отдельных ее подсистем.

3. Декомпозиция задач расчетного анализа деформирования и разрушения конструкции антенны наземных систем спутниковой связи. С учетом структурной сложности объекта и многообразия внешних воздействий обоснована декомпозиция конструкции (на рис. 2 они представлены блоками: узлы сочленения, группы сегментов, отдельные сегменты, каркас, зеркало и сборка) и задач расчетного анализа, решение которых является информационным обеспечением поиска оптимальных технических вариантов и достижения заданных значений прочности и формостабильности.

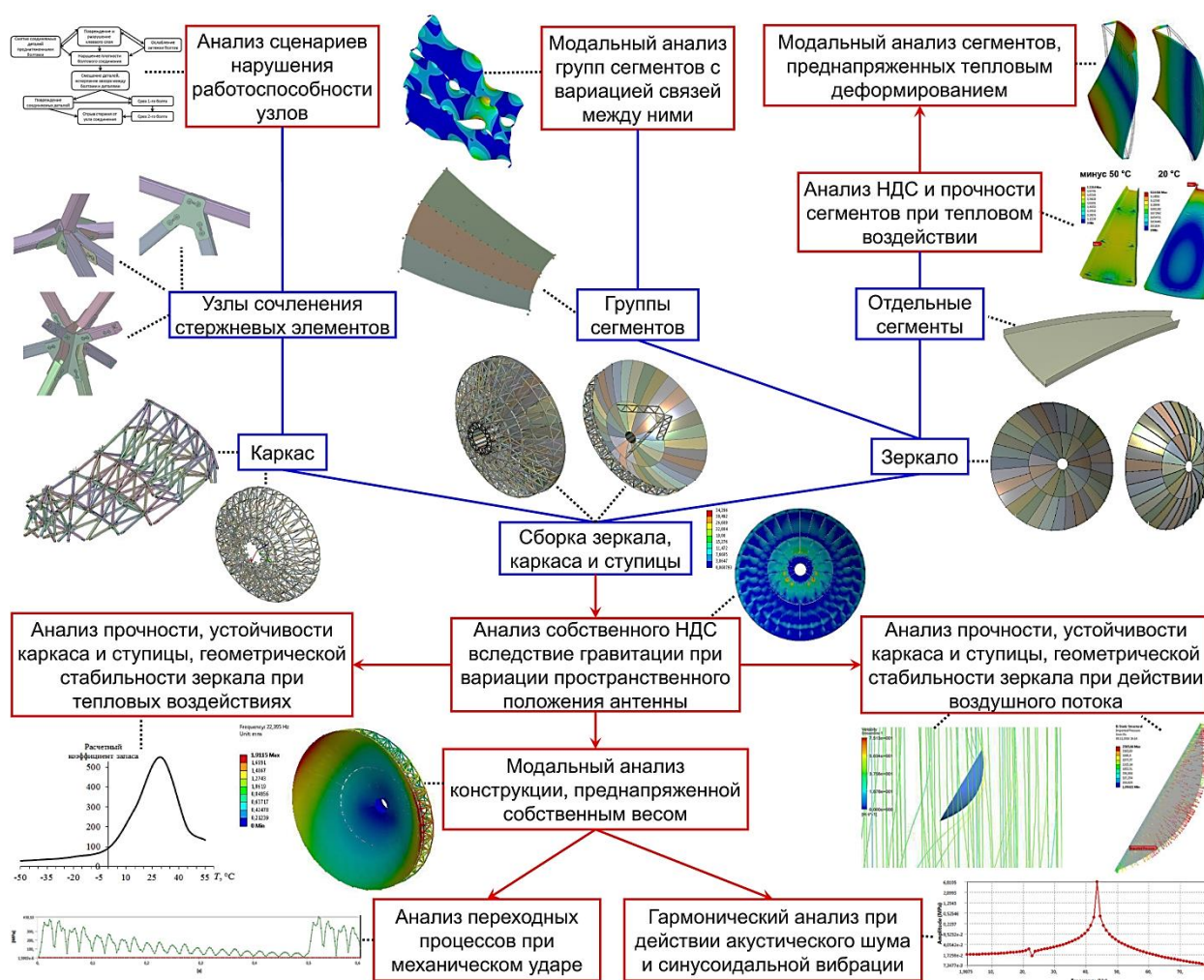


Рис. 2. Схема декомпозиции конструкции и задач расчетного анализа структурно-неоднородной конструкции зеркальной антенны

В результате решения этих задач получены большие массивы количественных данных, обработка которых как обеспечивает информационную поддержку задач практической оптимизации, так и позволяет строить модели для прогнозирования поведения конструкции.

4. Адаптивная (суррогатная) модель деформирования сегментов зеркала. В процессе анализа и обоснования конструктивных вариантов рассматривались пять различных типоразмеров сегментов зеркала антенны, с позиций механики представляющих собой многоопорные (от пяти до восьми опор) трехслойные параболические оболочки. Анализ теплового деформирования выполняется по результатам численного решения сопряженной задачи стационарной теплопроводности в условиях радиационно-конвективного теплообмена и термоупругости [15]. В качестве интегрального показателя деформирования рассматриваются максимальные абсолютные деформации (суммарные поступательные перемещения) поверхности сегмента $u_{\max}$ в зависимости от температуры окружающей среды T (рис. 3).

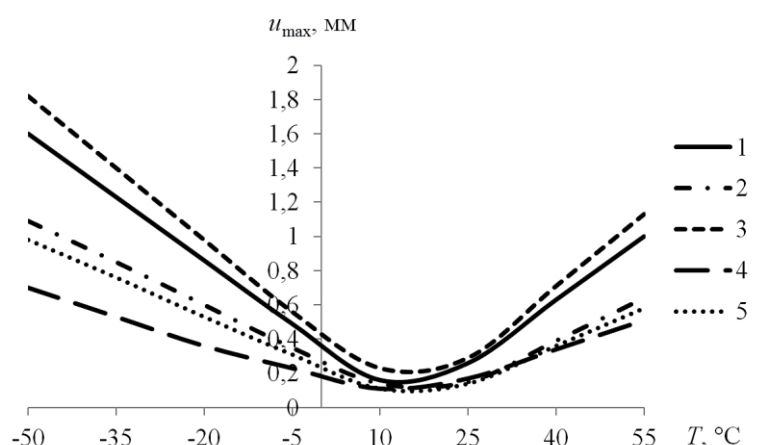


Рис. 3. Зависимости максимальных перемещений оболочек пяти типоразмеров

На основании полученных зависимостей построена обобщающая суррогатная модель, имеющая вид

$$u_{\max}(T) \in [\underline{u}_{\max}(T); \bar{u}_{\max}(T)];$$

$$\underline{u}_{\max}(T) = -8 \cdot 10^{-10} T^5 - 2 \cdot 10^{-8} T^4 + 4 \cdot 10^{-6} T^3 + 0,0002 T^2 - 0,0075 T + 0,1730;$$

$$\bar{u}_{\max}(T) = -2 \cdot 10^{-9} T^5 - 4 \cdot 10^{-8} T^4 + 1 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0005 T^2 - 0,0237 T + 0,4161,$$

где $\underline{u}_{\max}(T)$, $\bar{u}_{\max}(T)$ – соответственно нижняя и верхняя границы интервала зависимостей $u_{\max}$ от температуры окружающей среды.

5. Вычислительная модель деформирования и разрушения узла сочленения силового каркаса. Каркас представляет собой пространственную стержневую конструкцию из труб квадратного поперечного сечения размером 60×60 мм. Соединение труб осуществляется с использованием фитингов посредством болтовых и клеевого соединений.

Процедура построения структурной и информационной моделей конструкции заключается в анализе совместной работы элементов конструкции и их системных взаимосвязей при работе как в штатном, так и в поврежденном состоянии. Для конкретизации рассмотрим элементарный, повторяющийся фрагмент узла сочленения стержней каркаса. Он включает в себя трубу из однонаправленного и фитинг из тканого полимерного композиционного материала, стальные обойму, болты и гайки (рис. 4).

Несмотря на небольшое число конструктивных элементов, объединение их в систему осуществляется с помощью разнородных физико-технических связей: резьбовых и клеевых соединений, фрикционных взаимодействий. Это формирует высокую степень структурной неоднородности конструкции.

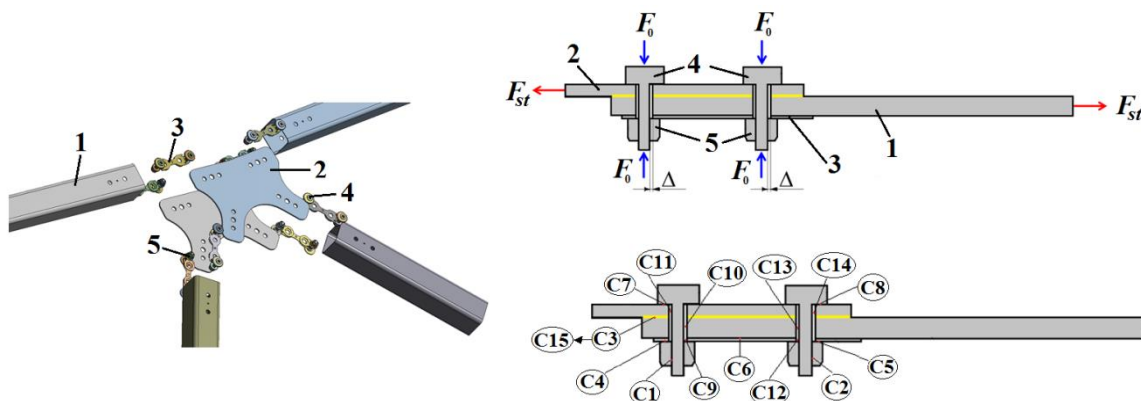


Рис. 4. Структурная схема (модель) узла сочленения трубы с фитингом:

1 – труба; 2 – фитинг; 3 – обойма; 4 – болт; 5 – гайка; C1, C2 – резьбовые соединения; C3 – клеевое соединение; C4-C15 – фрикционные взаимодействия; Δ – зазор

Информационная модель деформирования и разрушения представляет собой семантическую сеть каузального типа, являющуюся сценарием многоуровневого процесса накопления повреждений (рис. 5) [10]. С вершинами графа, описывающими повреждения, ассоциируются конструктивные элементы, в которых эти повреждения локализованы. Крест обозначает разрушение (исчезновение) одних и возникновение других связей между элементами.

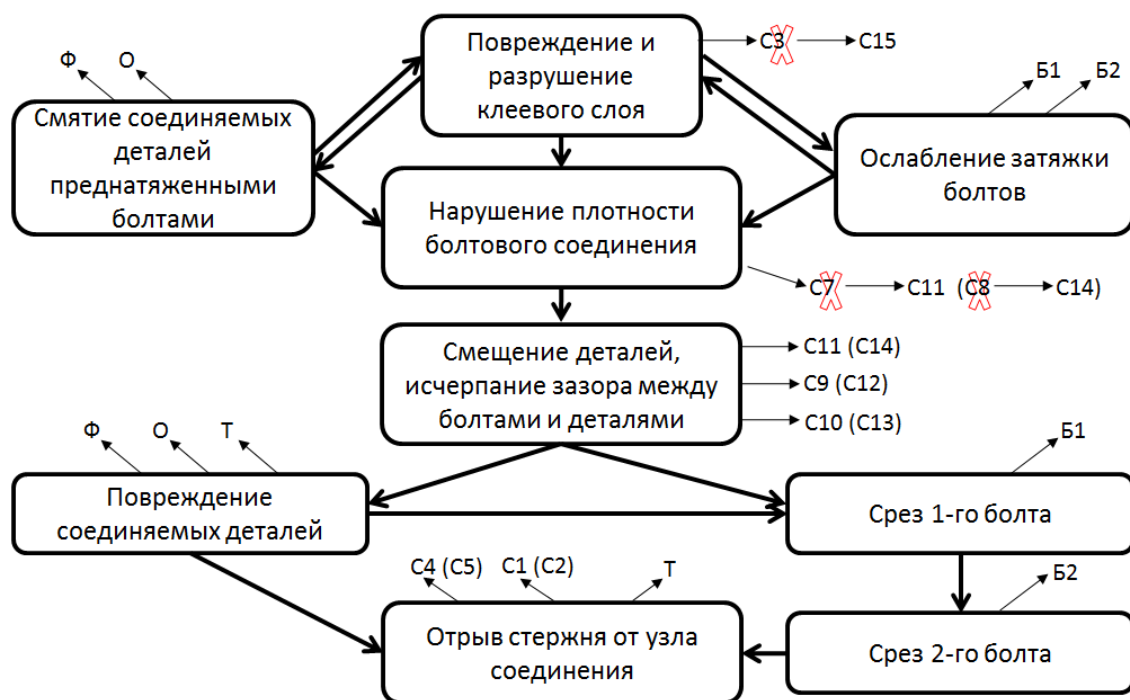


Рис. 5. Многоуровневая модель разрушения узла сочленения:

О – обойма; Ф – фитинг; Т – труба; B1, B2 – болты

Применительно к рассматриваемой конструкции вычислительная модель неповрежденной конструкции включает в себя базовые разрешающие уравнения и алгоритм метода конечных элементов в перемещениях (БВМСУА – базовая вычислительная модель

статического упругого анализа), а также нелинейные процедуры решения трехмерной контактной задачи теории упругости с переменной зоной контакта с трением (ВМКВ - вычислительная модель контактного взаимодействия). Формулировка численной (конечно-элементной) модели узла сочленения включает в себя два шага нагружения. На первом шаге задается предварительное натяжение болтов и определяется начальное (собственное) напряженное состояние механической системы. На втором реализуется итерационный алгоритм решения нелинейной контактной задачи. Для моделирования накопления повреждений и разрушения вычислительная модель включает в себя проверки условий прочности и процедуры изменения статуса контактов, изменения жесткости конструкционных материалов и трансформации (модификации) геометрической модели (рис. 6).

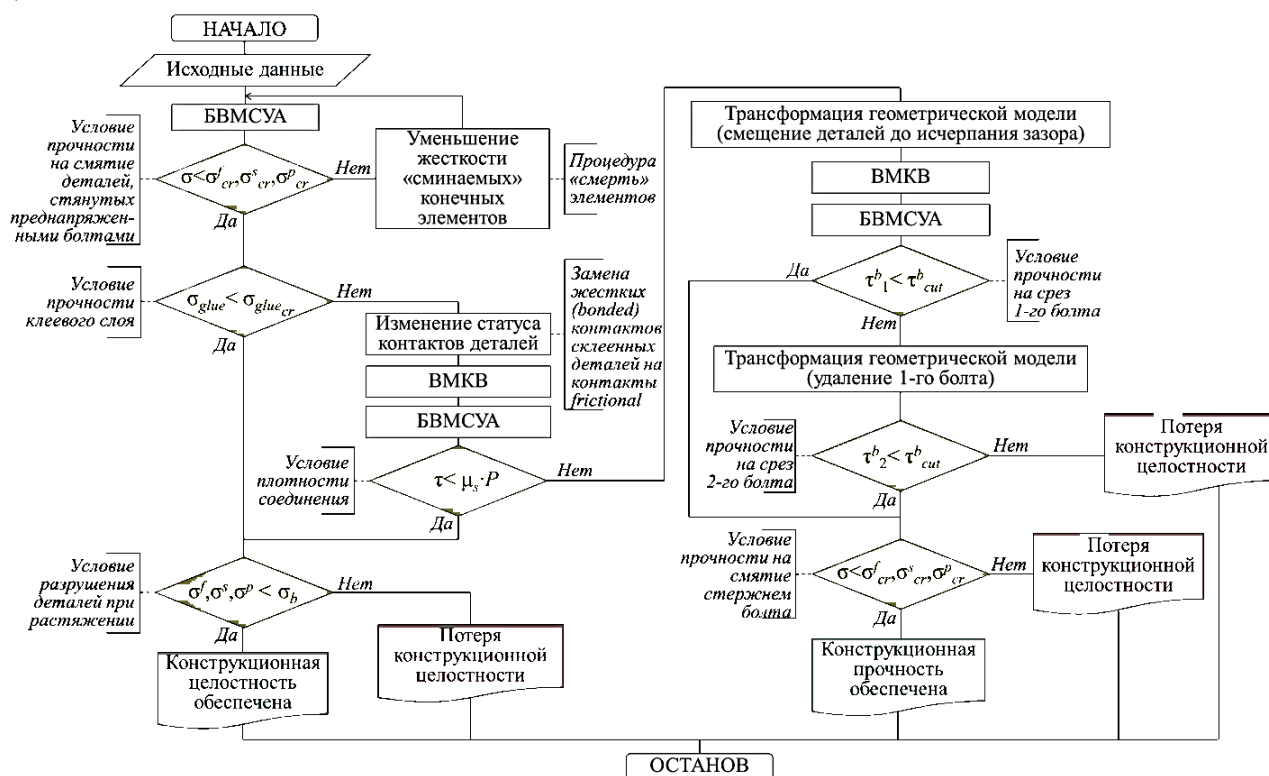


Рис. 6. Логическая схема вычислительной модели накопления повреждений и разрушения узла сочленения каркаса антенны: σ_{cr}^f , σ_{cr}^s , σ_{cr}^p – соответственно прочность на смятие фитинга, обоймы, трубы; σ – максимальное эквивалентное напряжения в зоне контакта; σ_b – временное сопротивление разрушению материала; σ_{glue} – эквивалентные напряжения в клеевом слое; $\sigma_{glue_{cr}}$ – прочность клеевого слоя; μ_s – коэффициент трения покоя; τ – предельное касательное напряжение трения; P – нормальное контактное давление; τ^b – максимальное касательное напряжение в сечении болта; τ_{cut}^b – предел прочности материала болта на срез

Практическая реализация вычислительной модели позволила установить состояния поврежденности, условия и последовательность их возникновения [11].

Заключение. Новизна рассматриваемого подхода заключается в использовании и адаптации приемов и технологий системного анализа к задачам анализа деформирования и разрушения сложных механических систем. Построение информационно-вычислительной метамодели отличается от известных подходов многоуровневым и многовариантным анализом характера взаимодействия элементов структурно-сложных конструкций в

неповрежденном и поврежденном состояниях. Практическая значимость подхода заключается в принципиальной возможности учета и прогнозирования всех возможных системных эффектов и сценариев поведения повреждаемых конструкций при решении задач управления риском и техногенной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берман А.Ф. Дegradaция механических систем. Новосибирск: Наука. 1998. 320 с.
2. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М. Информационное и семантическое моделирование повреждений структурно-неоднородных конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 2. С. 71–79.
3. Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2005.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука. 2008. 528 с.
5. Подходы к разрушению сложных систем / Н.В. Акамсина, О.А. Коновалов, Л.А. Коробова, Ю.С. Сербулов // Лесотехнический журнал. 2016. № 2. С. 189–195.
6. Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 // Онтология проектирования. 2019. № 1. С. 24–35.
7. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника. 2000. 248 с.
8. Семенов А.С., Мельников Б.Е. Многомодельный анализ неупругого деформирования материалов и элементов конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 6. С. 63–67.
9. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. М.: Наука. 1982. 184 с.
10. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. 040017-1–040017-4. <https://doi.org/10.1063/1.5084455>
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the Multi-Level Process of Damage Accumulation in a Reflector Skeleton with An Inhomogeneous Structure [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss. 6. Pp. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
12. Emergence, analysis and evolution of structures: concepts and strategies across disciplines / Ed. by Klaus Lucas and Peter Roosen. Springer – Verlag Dordrecht London New York.
13. Forrester A.I.J., Sobester A., Keane A.J. Engineering design via surrogate modeling: a practical guide. John Wiley & Sons, Ltd. 2008.
14. McEvily A.J. Metal failures: mechanisms, analysis, prevention / John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.
15. Reyzmunt E.M., Doronin S.V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012069.

UDK 004.942

CREATION AN INFORMATIONAL-COMPUTATIONAL METAMODEL OF DEFORMATION AND DESTRUCTION OF STRUCTURALLY COMPLEX CONSTRUCTIONS

Sergey V. Doronin

PhD., Assistant Professor, Leading Researcher, e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru

Elena M. Reizmunt

PhD., Researcher, e-mail: e.sigova@gmail.com

Yulia F. Filippova

Junior Researcher, e-mail: FilippovaJF@ict.nsc.ru

Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis,
Institute of Computational Technologies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoyarsk Branch Office, 53, Mira avenue, 660049, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. We consider a generalized approach to the analysis of deformation and destruction of structurally complex constructions, which includes decomposition and the development of a structural model of a construction, analysis of possible damage and destruction scenarios, decomposition of computational analysis tasks and design of a computational model of deformation and destruction on this base. The applied nature of the results is expressed in obtaining adaptive (surrogate) models based on the results of computational experiments used with information support of the constructions life cycle.

Keywords: structurally complex constructions, informational and computational models, decomposition.

References

1. Berman A.F. Degradacija mehanicheskikh system [Degradation of mechanical systems]. Novosibirsk. "Nauka" Publ. 1998. 320 p. (in Russian)
2. Doronin S.V., Reizmunt E.M. Informacionnoe i semanticheskoe modelirovanie povrezhdenij strukturno-neodnorodnykh konstrukcij [Information and semantic modeling of damage to structurally inhomogeneous structures] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. No 2. Pp. 71–79 (in Russian)
3. Kochkarov A.A., Malineckij G.G. Obespechenie stojkosti slozhnykh sistem. Strukturnye aspekty [Ensuring the durability of complex systems. Structural aspects] // Preprint Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences). Moscow. 2005. (in Russian)
4. Makhutov N.A. Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety: basic and applied research]. Novosibirsk. "Nauka" Publ. 2008. 528 p. (in Russian)
5. Podkhody k razrusheniyu slozhnykh system [Approaches to the destruction of complex systems] Akamsina N.V., Kononov O.A., Korobova L.A., Serbulov Yu.S. // Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry journal. 2016. No 2. Pp. 189-195. (in Russian)

6. Pokhabov Yu.P. Proektirovanie slozhnykh izdeliy s maloy veroyatnost'yu otkazov v usloviyakh Industrii 4.0 [Designing complex products with a low probability of failure in Industry 4.0.] // Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology. 2019. No 1. Pp. 24–35. (in Russian)
7. Ryabinin I.A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem [Reliability and safety of structurally complex systems] Saint Petersburg: “Politekhnik” Publ., 2000. 248 p. (in Russian)
8. Semenov A.S., Mel'nikov B.E. Mnogomodel'nyy analiz neuprugogo deformirovaniya materialov i elementov konstruktsiy [Multi-model analysis of inelastic deformation of materials and structural elements] // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy = Construction mechanics and construction calculations. 2007. No 6. Pp. 63–67. (in Russian)
9. Timashev S.A. Nadezhnost' bol'shikh mekhanicheskikh sistem [Reliability of large mechanical systems]. Moscow. “Nauka” Publ. 1982. 184 p. (in Russian)
10. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. 040017-1–040017-4. <https://doi.org/10.1063/1.5084455>
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the Multi-Level Process of Damage Accumulation in a Reflector Skeleton with An Inhomogeneous Structure [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss. 6. Pp. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
12. Emergence, analysis and evolution of structures: concepts and strategies across disciplines / Ed. by Klaus Lucas and Peter Roosen. Springer – Verlag Dordrecht London New York.
13. Forrester A.I.J., Sóbester A., Keane A.J. Engineering design via surrogate modeling: a practical guide. John Wiley & Sons, Ltd. 2008.
14. McEvily A.J. Metal failures: mechanisms, analysis, prevention / John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.
15. Reyzmunt E.M., Doronin S.V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012069.

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАМОДЕЛЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА СПЕЦИФИКАЦИЙ И КОДОВ БАЗ ЗНАНИЙ

Дородных Никита Олегович

К.т.н., м.н.с., Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО
РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, e-mail: tualatin32@mail.ru

Николайчук Ольга Анатольевна

Д.т.н., с.н.с., Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО
РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, e-mail: nikoly@icc.ru

Юрин Александр Юрьевич

К.т.н., зав. лабораторией «Информационных технологий исследования природной и
техногенной безопасности», Институт динамики систем и теории управления имени В.М.
Матросова СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, e-mail: iskander@icc.ru

Коршунов Сергей Андреевич

Программист «ООО ЦентраСиб», 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 11,
e-mail: info@centrasib.ru

Аннотация. Работа посвящена проблематике повышения эффективности создания баз знаний и интеллектуальных систем. Эффективность данного процесса может быть повышена путем автоматической генерации спецификаций и кодов баз знаний на целевом языке представления знаний путем анализа и трансформации информации из различных источников, в частности, концептуальных моделей, описывающих некоторую предметную область и представленных в разных форматах (например, UML-модели, концепт-карты, древовидные семантические структуры, диаграммы Исикавы и т.д.). Синтез спецификаций и программных кодов методологически основан на применении концепции трансформации моделей – модельно-ориентированного подхода (Model-Driven Engineering) и использовании метамodelей для описания исходных и целевых (CLIPS и OWL) формализмов. В работе приведено описание метода автоматизированного формирования метамodelей анализируемых форматов концептуальных моделей и мета-метамodelи для унифицированного представления и хранения метамodelей.

Ключевые слова: интеллектуальная система, база знаний, модельно-управляемый подход, метамodelирование, трансформация моделей, метамodelь, концептуальная модель, генерация кода.

Цитирование: Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Коршунов С.А. Разработка и использование метамodelей для синтеза спецификаций и кодов баз знаний // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 26–39. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-03

Введение. На сегодняшний день знания продолжают оставаться стратегическим ресурсом. Актуальность разработки новых методов и средств, повышающих эффективность процессов обработки знаний, в том числе при решении практических слабоформализованных

задач в различных предметных областях, остается высокой. При этом «оцифровка» и представление знаний в виде информационных (концептуальных) моделей, спецификаций и кодов баз знаний (БЗ) обеспечивают их эффективное использование.

Существует множество направлений повышения эффективности создания БЗ и интеллектуальных систем. Однако в последнее время наиболее востребованным является использование гибридных [11] и унифицированных подходов, которые обеспечивают охват всех этапов жизненного цикла систем, основанных на знаниях. В частности, существует ряд крупных методологий, направленных на формализованное описание повторяющихся схем решений задач на абстрактном уровне без привязки к какой-либо конкретной предметной области. Самой популярной методологией инженерии знаний является CommonKADS [22], которая де-факто считается стандартом проектирования и разработки систем, основанных на знаниях. Также можно отметить такие методологические проекты, как: MIKE [24], MOKA [23] и АТ-ТЕХНОЛОГИЯ [12]. Активно развиваются подходы к созданию интеллектуальных систем на основе семантических технологий, в частности онтологий [2, 10, 13]. При наличии в этой области существующих решений, необходимо отметить общую тенденцию к использованию концептуальных моделей при разработке БЗ и ориентацию на непрограммирующих пользователей [10, 14, 21]. В данном контексте перспективными являются подходы, основанные на порождающем программировании, в частности, на модельно-управляемом (-ориентируемом) подходе – Model Driven Engineering (MDE) или Model Driven Development (MDD) [16] и его разновидностях, например, Model Driven Architecture (MDA) [19] – концепции реализации MDE/MDD от консорциума Object Management Group (OMG). MDE/MDD/MDA – это стиль разработки программного обеспечения, когда абстрактные описания программной системы в виде информационных (концептуальных) моделей становятся основными артефактами при разработке, а сам процесс разработки программной системы представляет собой последовательное преобразование (трансформацию) данных моделей. В свою очередь, в основе трансформаций лежит метаописание моделей или их метамодели.

Целью данной работы является создание метода автоматизированного формирования метамodelей для решения задач трансформации и синтеза программных кодов и спецификаций проблемно-ориентированных интеллектуальных систем и их БЗ (предметная область: диагностика технического оборудования в нефтехимии) для CLIPS (C Language Integrated Production System) [15] и OWL (Web Ontology Language) [20] и программная реализация метода в виде веб-ориентированного программного модуля (редактора) визуальной разработки метамodelей в рамках системы поддержки разработки БЗ – Knowledge Base Development System (KBDS) [9].

1. Модельно-ориентированный подход и трансформации. Трансформация моделей является одной из основных составляющих модельно-ориентированного подхода к разработке программного обеспечения (MDE/MDD/MDA) [16, 19]. Под трансформацией модели понимается автоматическая генерация целевой модели из исходной модели в соответствии с некоторым набором правил трансформации.

Базовыми понятиями трансформации моделей являются [16]:

- модель – абстрактное описание на некотором формальном языке характеристик системы (процесса), важных с точки зрения цели моделирования, которое скрывает

информацию о некоторых аспектах с целью представления упрощенного описания остальных;

- метамодель – модель языка, используемого для создания моделей;
- мета-метамодель – язык, на котором описываются метамодели. Для построения метамodelей используются специальные языки метамоделирования. Наиболее распространенными языками метамоделирования являются: MOF (Meta-Object Facility), Ecore, KM3 (Kernel Meta Meta Model) и др.

Для описания базовых понятий и их отношений в MDE/MDD используется 4-х уровневая архитектура моделирования (иерархия моделей). На уровне «M1» (уровень моделей) находится некоторая исходная модель, которую необходимо преобразовать (перевести) в некоторую целевую модель. При этом уровень «M0» соответствует слою данных, т.е. он отражает объекты и процессы реального мира (данный уровень обычно не указывают на подобного рода схемах). Все модели уровня «M1» соответствуют некоторым метамоделям на уровне «M2» (уровень метамodelей), т.е. существуют некоторые формальные языки моделирования для их описания. Модель трансформации представляет собой набор правил преобразования, которые используют соответствующие элементы (конструкции) метамodelей исходной и целевой модели и описываются с использованием различных языков трансформации моделей (например, QVT, ATL, Epsilon, VIATRA2, GReAT, XSLT и др.), т.е. модель трансформации также соответствует некоторой метамодели языка трансформации. Таким образом, трансформация моделей осуществляется на уровне метамodelей («M2»). В свою очередь, все метамodelи на уровне «M2» соответствуют некоторой одной мета-метамодели (мета-объектное средство) на уровне «M3» (уровень мета-метамodelей), т.е. они описываются с использованием некоторого языка метамоделирования. В подходе MDA в качестве языка метамоделирования используется стандарт MOF, который призван служить мостом между разными метамоделями, поскольку представляет собой основу для их описания.

Таким образом, процесс трансформации моделей базируется на использовании метамodelей и метамоделирования, как одним из основных подходов к определению абстрактного синтаксиса (abstract syntax) языков.

Далее подробнее опишем процесс трансформации моделей в рамках инженерии БЗ, с точки зрения описания возможных метамodelей, участвующих в данном процессе, а также метод создания метамodelей.

2. Метамodelи. Применение принципов MDE/MDD/MDA к созданию БЗ позволяет представить этот процесс в виде цепочки преобразований некоторой исходной информационной (концептуальной) модели предметной области, представленной в формате XML, в целевую модель БЗ (модель продукций или онтологии), на основе которой может быть автоматически синтезирован код на языке представления знаний (ЯПЗ) CLIPS или OWL. Данное преобразование описывается моделью трансформации M_T :

$$M_T = \langle MM_{IN}, MM_{OUT}, T \rangle, \quad (1)$$

где MM_{IN} – метамодель исходной (входной) концептуальной модели; MM_{OUT} – метамодель целевой (выходной) модели представления знаний (модели БЗ); T – оператор преобразования моделей. Более детальное описание данного оператора приводится в [1].

Используя (1), подробнее рассмотрим элементы исходной и целевой метамodelи в модели трансформации:

$$\begin{aligned} MM_{IN} &\in \{MM_{CM}, MM_{PR}, MM_{ONT}\}, \\ MM_{OUT} &\in \{MM_{PR}MM_{ONT}, MM_{CLIPS}, MM_{OWL}\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где MM_{CM} – метамodelь концептуальной модели, представленной в формате XML; MM_{PR} – метамodelь модели продукций; MM_{ONT} – метамodelь онтологии; MM_{CLIPS} – метамodelь языка CLIPS; MM_{OWL} – метамodelь языка OWL.

Исходя из (2), следует, что помимо метамodelей MM_{CM} , MM_{CLIPS} и MM_{OWL} , которые необходимы для описания преобразования исходных концептуальных моделей в целевые БЗ в формате CLIPS или OWL, в модель трансформации также могут входить метамodelи MM_{PR} и MM_{ONT} , описывающие некоторые обобщенные модели продукций и онтологии. Данные модели позволяют абстрагироваться от особенностей описания знаний на различных конкретных языках, которые используются при реализации (программировании) БЗ. Таким образом, они представляют собой высокоуровневые абстракции (спецификации), предназначенные для унифицированного представления и хранения знаний, извлеченных из концептуальных моделей, и, в свою очередь, могут выступать как в качестве исходной концептуальной модели для синтеза кода БЗ, так и целевой модели БЗ.

При этом следует отметить, что, в рамках предлагаемого подхода, метамodelи MM_{PR} , MM_{ONT} , MM_{CLIPS} , MM_{OWL} предоставляются пользователю по умолчанию для создания модели трансформации.

Исходя из (2), опишем элементы MM_{CM} :

$$MM_{CM} = \langle E_{CM}, R_{CM} \rangle, \quad (3)$$

где E_{CM} – множество элементов метамodelи исходной концептуальной модели; R_{CM} – множество отношений между элементами метамodelи исходной концептуальной модели.

При этом:

$$E_{CM} = \{e_1^{cm}, \dots, e_n^{cm}\}, e_i^{cm} = \langle name_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,k} \rangle, i \in \overline{1, n}, \text{ где } name_{i,1} - \text{наименование } i\text{-}$$

элемента; $p_{i,2}, \dots, p_{i,k}$ – остальные свойства i -элемента.

$$R_{CM} = \langle R_{AS}^{cm}, R_{ID}^{cm}, R_{part-of}^{cm} \rangle, \text{ где } R_{AS}^{cm} - \text{ассоциация} - \text{бинарное отношение между двумя}$$

элементами метамodelи; R_{ID}^{cm} – связь по идентификатору – бинарное отношение между двумя элементами метамodelи по одному идентификатору (числовому или текстовому значению); $R_{part-of}^{cm}$ – связь «часть-целое» (композиция) – n -арное отношение между n элементами метамodelи.

При этом:

$R_{AS}^{cm} = \{r_1^{as}, ..., r_m^{as}\}, r_j^{as} = \langle e_{j,1}^{cm}, e_{j,2}^{cm} \rangle, j \in \overline{1, m}$, где $e_{j,1}^{cm}$ – левая часть отношения типа ассоциация (левый элемент метамодели), $e_{j,2}^{cm}$ – правая часть отношения типа ассоциация (правый элемент метамодели).

$R_{ID}^{cm} = \{r_1^{id}, ..., r_h^{id}\}, r_l^{id} = \langle r_{lhs_l}^{id}, r_{rhs_l}^{id} \rangle, l \in \overline{1, h}$, где $r_{lhs_l}^{id}$ – левая часть связи; $r_{rhs_l}^{id}$ – правая часть связи. В свою очередь $r_{lhs_l}^{id} = e_i^{cm}(p_i), i \in \overline{1, n}$ и $r_{rhs_l}^{id} = e_j^{cm}(p_j), j \in \overline{1, n}$, где $e_i^{cm}(p_i)$ и $e_j^{cm}(p_j)$ – элементы метамодели, участвующие в отношении по идентификатору, т.е. значение свойства P_j равно значению свойства P_i .

Отношение «часть-целое» предполагает, что i -элемент метамодели e_i^{cm} состоит из составных частей, которые, в свою очередь, связываются (соединяются) между собой отношением R_{AS}^{cm} или R_{ID}^{cm} .

Для представления и хранения данных метамodelей разработана мета-метамодель (модель уровня «М3») (рис. 1), определяющая концептуальное пространство моделирования (Conceptual Modeling Space) [17].

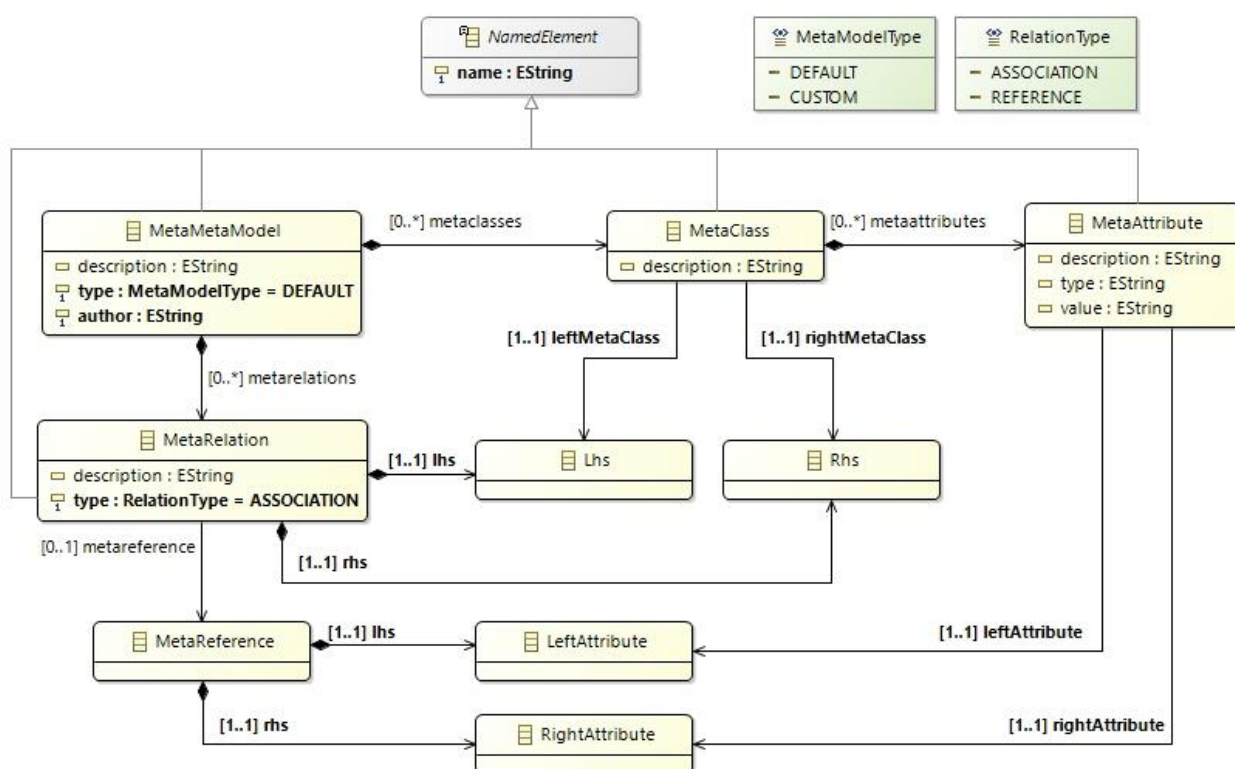


Рис. 1. Унифицированная мета-метамодель (на основе спецификации Ecore [18])

При этом MM_{PR} , определяющая основные концепты, из которых состоит модель продукций, представлена в [5]. MM_{ONT} , определяющая основные концепты, из которых состоит модель онтологии, подробнее описана в [3].

В качестве целевых ЯПЗ предлагается использовать CLIPS [15] и OWL2 [20], как наиболее распространенные на данный момент языки для описания продукций и онтологий.

3. Метод создания метамodelей. Определенные в (2) метамodelи и унифицированная метамodelь (Рис. 1) определяют особенности метода создания метамodelей для синтеза спецификаций и программных кодов БЗ. При этом метод представляет собой систематизированную совокупность действий (Рис. 2), которые нацелены на решение задачи автоматизированной разработки метамodelей.

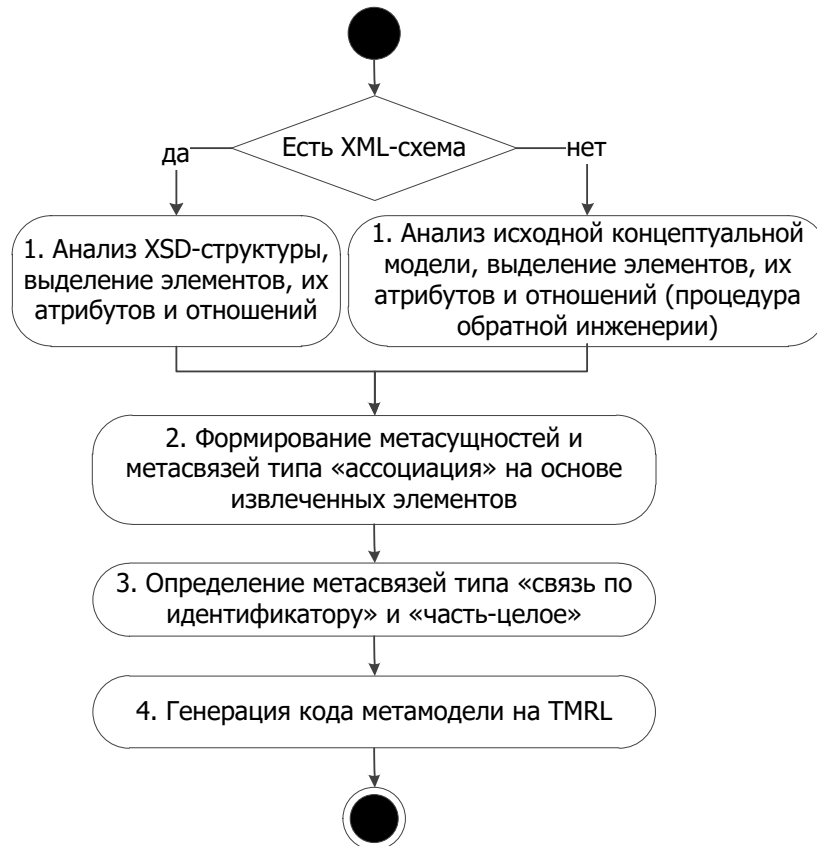


Рис. 2. Этапы создания метамodelей

Трансформация моделей осуществляется на достаточно абстрактном уровне (уровне метамodelей), поэтому определим основные особенности и ограничения предлагаемого метода:

- MM_{CM} может быть сформирована на основе XML-схемы концептуальной модели в формате XML Schema Definition (XSD).
- MM_{CM} может быть получена путем анализа исходных концептуальных моделей и извлечением из них элементов и отношений.
- Полученная MM_{CM} может быть семантически некорректной (например, если в исходной концептуальной модели наименования сущностей отражают семантику предметной области – уровня модели «M1», а не метамodelи – уровня «M2»).
- Не все связи элементов в MM_{CM} могут быть получены с использованием XML-схем или процедуры обратной инженерии, а именно: связь «по идентификаторам» R_{ID}^{cm} , установленная путем внутренней индексации элементов; связь «часть-целое» $R_{part-of}^{cm}$, установленная путем переноса части семантики элемента в дочерние элементы.

- Не все элементы XML-схемы могут быть однозначно отображены в элементы $ММ_{СМ}$.
- Не все элементы $ММ_{СМ}$ могут быть однозначно отображены в элементы целевой метамодели (проблема избыточности и дефицита выразительной способности).

Введение вышеперечисленных ограничений позволяет понизить сложность разработки моделей трансформаций при сохранении их выразительной способности.

4. Проверка корректности создаваемых метамodelей и правил трансформаций. В настоящее время разработка любого набора правил трансформации моделей включает их тестирование (верификацию) с целью выявления различного рода ошибок. При этом ошибки могут быть допущены как при создании моделей трансформаций и их метамodelей, так и при их интерпретации.

При создании модели трансформации могут произойти следующие основные ошибки:

- Создание синтаксически неправильных метамodelей: ошибки или опечатки при создании (кодировании) элементов метамodelи.
- Создание семантически неправильных метамodelей: ошибки, связанные с неверным заданием структуры метамodelи (например, неверные связи между элементами, отсутствие каких-либо связей у элементов и т.д.).
- Неполное покрытие метамodelей: правило трансформации построено без полного охвата элементов исходной и целевой метамodelи, что приводит к проблеме того, что некоторые исходные концептуальные модели не могут быть преобразованы (например, правило трансформации работает только для определенных типов элементов и т.д.).
- Создание семантически неверных отображений между элементами исходной и целевой метамodelи.
- Ошибки или опечатки из-за неправильного кодирования (уточнения) правил трансформации.

При выполнении (интерпретации) модели трансформации ($М_T$) могут произойти следующие основные ошибки:

- Генерация синтаксически неправильных моделей БЗ: правила трансформации или их часть реализованы неверно, что приводит к несоответствию целевой модели ее метамodelи или нарушению ограничений модели.
- Генерация семантически неправильных моделей БЗ: правила трансформации семантически некорректны, что приводит к получению неадекватной синтаксически корректной целевой модели.

Для устранения подобных ошибок используется два подхода: первый основан на предупреждении большинства рассмотренных ошибок, второй – на проверке корректности (тестирования, верификации) полученных БЗ и моделей, как результатов трансформаций.

Первый подход реализован путем автоматизированного контроля спецификаций создаваемых моделей в разработанных редакторах и определения ряда особенностей и ограничений, в частности:

- 1) При построении метамodelей и правил преобразования используется интерактивное визуальное программирование.

- 2) Код метамodelей и правила преобразования на языке модельных трансформаций генерируются автоматически.
- 3) При построении метамodelей автоматически проверяются следующие требования:
 - метамodelь не должна содержать несвязанные элементы;
 - метамodelь не должна содержать элементы без атрибутов (свойств);
 - пары элементов метамodelи не могут связываться одной и той же связью несколько раз;
 - пары элементов не могут связываться кольцевой связью одного типа;
 - элемент метамodelи не может связываться сам с собой (не должно быть рекурсивных связей).
- 4) При построении правил преобразования автоматически проверяются следующие требования:
 - модель трансформации должна содержать хотя бы одно правило преобразования;
 - правила преобразования могут содержать только соответствия между элементами исходной и целевой метамodelи;
 - соответствия между атрибутами (свойствами) элементов исходной и целевой метамodelей устанавливаются только после связывания этих элементов;
 - соответствия между атрибутами элементов и самих элементов не допускаются;
 - модель трансформации допускает содержание не связанных соответствием элементов метамodelей, если они принадлежат к крайним случаям соответствий – избыточность и дефицит выразительной способности;
 - у каждого правила преобразования должен быть приоритет, задающий порядковый номер выполнения данного правила в интерпретаторе;
 - приоритеты правил преобразования задаются только натуральными числами;
 - правила преобразования не должны иметь одинаковые приоритеты;
 - приоритеты должны задавать правильную последовательность выполнения правил преобразования исходя из структурных особенностей исходной и целевой метамodelи.

Второй подход основан на проверке корректности (тестирования, верификации) полученных БЗ, которая предполагает обнаружение логических ошибок в представлении знаний и структурах вывода. В ряде случаев, рассматривая верификацию интеллектуальных систем по аналогии с верификацией традиционных программ, ее трактуют как доказательство правильности БЗ. В настоящее время кроме нахождения обычных ошибок и опечаток в коде БЗ, можно отметить обнаружение различного рода аномалий, например, нарушения согласованности (consistency) БЗ (например, противоречивость, наличие циклов, избыточность, наличие пересечений и т.д.) или целостности (completeness) БЗ (например, неполнота, отсутствие ссылок, некорректность и т.д.). Данный подход реализован путем использования внешних программных средств, содержащий интерпретаторы и валидаторы полученных целевых моделей и кодов БЗ, в частности:

- Все разработанные в рамках данной работы метамодели (MM_{PR} , MM_{ONT} , MM_{CLIPS} , MM_{OWL}) создавались и проверялись с использованием специального графического редактора [8] и соответствуют мета-метамодели представленной на Рисунке 1.
- Проверка корректности сгенерированных продукционных БЗ в формате CLIPS производилась в системе программирования БЗ – Personal Knowledge Base Designer (PKBD) [4] с использованием подключаемых динамических библиотек машин вывода, в частности, реализующих алгоритм RETE. Проверка отдельных правил БЗ на наличие нарушений целостности и непротиворечивости может быть произведена, например, в системе CHECK или ДИФКЛАСС. Проверка корректности сгенерированных онтологических БЗ в формате OWL может быть произведена в системе онтологического моделирования Protégé с использованием машин вывода (reasoners) - Pellet, FaCT++ или HermiT.

Заключение. В статье в рамках модельно-ориентированного подхода описан метод создания и использования метамodelей при выполнении трансформации исходной модели предметной области в целевую базу знаний. Определены возможные метамодели, участвующие в данном процессе; предложена унифицированная мета-метамодель их описания; описаны основные этапы метода.

Метод основан на анализе структурных элементов XML-схем, а также процедуре обратной инженерии, с целью получения высокоуровневых спецификаций из низкоуровневых текстовых представлений. Такой метод позволяет, с одной стороны, сократить время, затрачиваемое на разработку метамodelей и избежать ошибок, связанных с программированием, за счет автоматического синтеза основных конструкций метамodelей, с другой – приблизить специалистов-предметников к непосредственной разработке интеллектуальных компонентов различных проблемно-ориентированных программных систем, позволяя им создавать спецификации и программный код, оперируя понятными предметно-ориентированными моделями.

Разработанный метод реализован в виде программного модуля (редактора) [8], включенного в состав веб-средства KBDS [9], и использовался для прототипирования продукционных БЗ в задаче прогнозирования развития деградационных процессов аппаратов в нефтехимии. В частности, при помощи разработанного метода и редактора [26] были разработаны метамодели, описывающие форматы (языки) представления исходных концептуальных моделей в виде:

- диаграмм классов UML. Следует отметить, что правильность полученной метамодели была проверена путем её сопоставления с уже существующим описанием спецификации языка UML, что также подтверждает корректность разработанного методологического и программного обеспечения [26];
- причинно-следственных диаграмм Исикавы, представленных в расширенной нотации для отображения деградационных процессов или процессов нарушения техногенной безопасности [25];
- концепт-карт в формате XML Topic Maps (XTM) средства SmartTools [7];
- деревьев событий [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00927).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков И.В., Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Подход к разработке программных компонентов для формирования баз знаний на основе концептуальных моделей // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 4. С. 16–36.
2. Голенков В.В., Гулякина Н.А. Принципы построения массовой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем // Материалы международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем OSTIS-2011». 2011. С. 21–58.
3. Грищенко М.А., Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Применение модельно-управляемого подхода для создания продукционных экспертных систем и баз знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 2. С. 16–29.
4. Дородных Н.О., Грищенко М.А., Юрин А.Ю. Система программирования продукционных баз знаний: Personal Knowledge Base Designer. Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2016. № 6. С. 209–212.
5. Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Средства поддержки моделирования логических правил в нотации RVML // Программные продукты и системы. 2018. № 4. С. 667–672.
6. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизированное создание продукционных баз знаний на основе деревьев событий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 2(6). С. 30–41.
7. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Использование концепт-карт для автоматизированного создания продукционных баз знаний // Программные продукты и системы. 2017. № 4. С. 658–662.
8. Дородных Н.О. Web-ориентированный редактор метамodelей (Web Metamodel Editor). 2018. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018660815 М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
9. Дородных Н.О. Web-based software for automating development of knowledge bases on the basis of transformation of conceptual models // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2017. № 7. С. 145–150.
10. Загоруйко Ю.А. Семантическая технология разработки интеллектуальных систем, ориентированная на экспертов предметной области // Онтология проектирования. 2015. Т. 15. № 1. С. 30–46.
11. Колесников А.В., Кириков И.В., Листопад С.В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М.: ИПИ РАН. 2014. 189 с.
12. Рыбина Г.В. Инструментальные средства построения динамических интегрированных экспертных систем: развитие комплекса ат-технология // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 1. С. 41–48.
13. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Применение онтологий при реализации концепции модельно-управляемой разработки программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем // Онтология проектирования. 2014. Т. 14. № 4. С. 54–68.
14. Baumeister J., Striffler A. Knowledge-driven systems for episodic decision support // Knowledge-Based Systems. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56.

15. CLIPS: A Tool for Building Expert Systems. 2017. Режим доступа: <http://www.clipsrules.sourceforge.net> (дата обращения: 2019-04-04).
16. da Silva A.R. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // Computer Languages, Systems & Structures. 2015. Vol. 43. Pp. 139–155.
17. Djurić D., Gašević D., Devedžić V. The Tao of Modeling Spaces // Journal of Object Technology. 2006. vol. 5. No 8. Pp. 125–147.
18. Ecore structure description (Metamodelling Language). 2019. Режим доступа: <http://download.eclipse.org/modeling/emf/emf/javadoc/2.9.0/org/eclipse/emf/ecore/package-summary.html> (дата обращения: 04.04.2019).
19. MDA Specifications. 2019. Режим доступа: <http://www.omg.org/mda/specs.htm> (дата обращения: 04.04.2019).
20. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition). 2012. Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview> (дата обращения: 04.04.2019).
21. Ruiz-Mezcua B., Garcia-Crespo A., Lopez-Cuadrado J.L., Gonzalez-Carrasco I. An expert system development tool for non AI experts // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. No 1. Pp. 597–609.
22. Schreiber G., Akkermans H., Anjewierden A., Hoog de R., Shadbolt N.R., Velde W. V., Wielinga B. Knowledge Engineering and Management. The CommonKADS methodology // The MIT Press. Cambridge, MA. 2000.
23. Stokes M. Managing engineering knowledge: MOKA: methodology for knowledge based engineering applications (6th ed.). New York: ASME Press. 2001.
24. Studer R., Benjamins V.R., Fensel D. Knowledge engineering: principles and methods // Data & Knowledge Engineering. 1998. Vol. 25. No 1-2. Pp. 161–197.
25. Yurin A.Yu., Berman A.F., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Pavlov N.Yu. Fishbone diagrams for the development of knowledge bases // Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018. Pp. 1136–1141.
26. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // Expert Systems, 2018. vol. 35. No 5. Pp. 1–23.

METAMODELS FOR SPECIFICATIONS AND CODE GENERATION OF KNOWLEDGE BASES

Nikita O. Dorodnykh

PhD., Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS)

134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: tualatin32@mail.ru

Olga A. Nikolaychuk

D.Sc., Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS)

134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: grey.for@gmail.com

Alexander Yu. Yurin

PhD., Head. Laboratory of Information and telecommunication technologies for investigation of technogenic safety, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS)

134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: iskander@icc.ru

Sergey A. Korshunov

Programmer, CentrSib LLC, 11, Karl Marx Str., 664003, Irkutsk, Russia,
e-mail: info@centrasib.ru

Abstract. The paper discusses the problem of improving the knowledge bases and intelligent systems design. The efficiency of this process can be improved with the aid of automatic generation of specifications and source codes of knowledge bases for a certain knowledge representation language. The generation, in turn, is based on the analysis and transformation of various information sources, such as conceptual models that describe a subject domain and are presented in different formats (e.g., UML models, concept maps, tree-like semantic structures, fishbone diagrams, etc.). Generation of specifications and codes methodologically is based on the model transformation concept from a model-driven engineering (MDE) and uses metamodels to describe the source and target (CLIPS and OWL) formalisms. The paper describes a method for computer-aided metamodel formation for the analyzed formats of conceptual models, and meta-metamodels for the unified representation and storing of metamodels.

Keywords: intelligent system, knowledge base, model-driven engineering, metamodeling, model transformation, metamodel, conceptual model, code generation

References

1. Bychkov I.V., Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Podhod k razrabotke programmnyh komponentov dlja formirovaniya baz znaniy na osnove konceptual'nyh modelej [Approach to the development of software components for generation of knowledge bases based on conceptual models] // Vychislitel'nye tehnologii = Computational Technologies. 2016. vol. 21. No 4. Pp.16–36. (in Russian)

2. Golenkov V.V., Gulyakina N.A. Principy postroeniya massovoj semanticheskoy tekhnologii komponentnogo proektirovaniya intellektualnyh sistem [Principles of building mass semantic technology component design of intelligent systems] // Proceedings of the International scientific-technical conference OSTIS-2011. Minsk: BSUIR. 2011. Pp. 21–58. (in Russian)
3. Grishchenko M.A., Dorodnykh N.O., Nikolaichuk O.A., Yurin A.Yu. Primenenie modelno-upravlyaemogo podhoda dlya sozdaniya produkcionnyh ehkspertnyh system i baz znaniy [Application of the model-driven development approach for designing rule-based expert systems and knowledge-bases] // *Iskusstvennyj-intellekt-i-prinyatie-reshenij* = Artificial Intelligence and decision making. 2016. No 2. Pp. 16–29. (in Russian)
4. Dorodnykh N.O., Grishenko M.A., Yurin A.Yu. Sistema programmirovaniya produkcionnyh baz znaniy: Personal Knowledge Base Designer [Software for rule knowledge bases design: Personal Knowledge Base Designer] // *Otkrytye-semanticheskie-tekhnologii-proektirovaniya-intellektualnyh-sistem* = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. 2016. No 6. Pp. 209–212. (in Russian)
5. Dorodnykh N.O., Korshunov S.A., Yurin A.Yu. Sredstva podderzhki modelirovaniya logicheskikh pravil v notacii RVML [Support tools for modeling logical rules in the RVML notation] // *Programmnaya inzheneriya* = Software engineering. 2018. No 4. Pp. 667–672. (in Russian)
6. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Avtomatizirovannoe sozдание produkcionnyh baz znaniy na osnove derev'ev sobytij [Automated creation of rule-based knowledge bases on the basis of event trees] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2017. No 2(6). Pp. 30–41. (in Russian)
7. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Ispol'zovanie koncept-kart dlya avtomatizirovannogo sozdaniya produkcionnyh baz znaniy [Using concept maps for rule-based knowledge bases engineering] // *Programmnaya inzheneriya* = Software engineering. 2017. No 4. Pp. 658–662. (in Russian)
8. Dorodnykh N.O. Web Metamodel Editor. 2018. Certificate of state registration of computer programs No. 2018660815. (in Russian)
9. Dorodnykh N.O. Web-based software for automating development of knowledge bases on the basis of transformation of conceptual models // *Otkrytye-semanticheskie-tekhnologii-proektirovaniya-intellektualnyh-sistem* = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. 2017. No. 7. Pp. 145–150. (in Russian)
10. Zagorulko Yu.A. Semanticheskaya tekhnologiya razrabotki intellektualnyh sistem orientirovannaya na ehkspertov predmetnoj oblasti [Semantic technology for development of intelligent systems oriented to experts in subject domain] // *Ontologiya proektirovaniya* = Ontology of design. 2015. vol. 15. No 1. Pp. 30–46. (in Russian)
11. Kolesnikov A.V., Kirikov I.V., Listopad S.V. Gibridnye intellektualnye sistemy s samoorganizaciej: koordinaciya, soglasovannost, spor [Hybrid intelligent systems with self-organization: coordination, consistency, dispute]. Moscow: IPI RAS. 2014. 189 p. (in Russian)
12. Rybina G.V. Instrumentalnye sredstva postroeniya dinamicheskikh integrirovannyh ehkspertnyh system razvitie kompleksa at-tekhnologiya [Tools for constructing dynamic integrated expert systems: the development of the complex at-technology] // *Iskusstvennyj-intellekt-i-prinyatie-reshenij* = Artificial Intelligence and Decision Making. 2010. No 1. Pp. 41–48. (in Russian)

13. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. *Primenenie ontologij pri realizacii koncepcii modelno upravlyaemoj razrabotki programmogo obespecheniya dlya proektirovaniya teplosnabzhayushchih sistem* [Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems] // *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of design*. 2014. vol. 14. No 4. Pp. 54–68. (in Russian)
14. Baumeister J., Striffler A. Knowledge-driven systems for episodic decision support // *Knowledge-Based Systems*. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56.
15. CLIPS: A Tool for Building Expert Systems. 2017. Режим доступа: <http://www.clipsrules.sourceforge.net> (дата обращения: 2019-04-04).
16. da Silva A.R. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // *Computer Languages, Systems & Structures*. 2015. Vol. 43. Pp. 139–155.
17. Djurić D., Gašević D., Devedžić V. The Tao of Modeling Spaces // *Journal of Object Technology*. 2006. vol. 5. No 8. Pp. 125–147.
18. Ecore structure description (Metamodelling Language). 2019. Режим доступа: <http://download.eclipse.org/modeling/emf/emf/javadoc/2.9.0/org/eclipse/emf/ecore/package-summary.html> (дата обращения: 04.04.2019).
19. MDA Specifications. 2019. Режим доступа: <http://www.omg.org/mda/specs.htm> (дата обращения: 04.04.2019).
20. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition). 2012. Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview> (дата обращения: 04.04.2019).
21. Ruiz-Mezcua B., Garcia-Crespo A., Lopez-Cuadrado J.L., Gonzalez-Carrasco I. An expert system development tool for non AI experts // *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38. No 1. Pp. 597–609.
22. Schreiber G., Akkermans H., Anjewierden A., Hoog de R., Shadbolt N.R., Velde W. V., Wielinga B. *Knowledge Engineering and Management. The CommonKADS methodology* // The MIT Press. Cambridge, MA. 2000.
23. Stokes M. *Managing engineering knowledge: MOKA: methodology for knowledge based engineering applications* (6th ed.). New York: ASME Press. 2001.
24. Studer R., Benjamins V.R., Fensel D. Knowledge engineering: principles and methods // *Data & Knowledge Engineering*. 1998. Vol. 25. No 1-2. Pp. 161–197.
25. Yurin A.Yu., Berman A.F., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Pavlov N.Yu. Fishbone diagrams for the development of knowledge bases // *Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2018. Pp. 1136–1141.
26. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // *Expert Systems*, 2018. vol. 35. No 5. Pp. 1–23.

ОЦЕНКА РИСКОВ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ¹

Колосок Ирина Николаевна

Д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Управление функционированием электроэнергетических систем», e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Гурина Людмила Александровна

К.т.н., доцент, научный сотрудник лаборатории «Управление функционированием электроэнергетических систем», e-mail: gurina@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Парадигма цифровой энергетики ориентирована на создание кибер-физических систем и широкомасштабное использование технологий Smart Grid. Наряду с большими возможностями такого перехода отмечается чувствительность интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) к все возрастающим киберугрозам. Необходимость обеспечения и сохранения надежного функционирования ИЭС в условиях внешних и внутренних кибер-атак требует анализа и учета возможных рисков кибербезопасности ИЭС и разработки дальнейших мер ее поддержания. В данной работе рассмотрена информационно-коммуникационная инфраструктура ИЭС и проанализированы свойства кибербезопасности SCADA, WAMS, являющихся частью инфраструктуры. Особое внимание уделено анализу факторов риска кибербезопасности, учитываемых в дальнейшем при разработке алгоритма оценки рисков кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры ЭЭС на основе теории нечетких множеств, что является (результат исследования авторов). Работоспособность алгоритма в условиях неопределенности показывает его эффективность.

Ключевые слова: риск, кибербезопасность, система SCADA, WAMS, электроэнергетическая система.

Цитирование: Колосок И.Н., Гурина Л.А. Оценка рисков кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры интеллектуальной энергетической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 40–51. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-04

Введение. Внедрение новых информационных и коммуникационных технологий в электроэнергетические системы (ЭЭС) обеспечивает развитие системы в рамках концепции Smart Grid (интеллектуальной энергосистемы (ИЭС)) и создание кибер-физической системы, что приносит много преимуществ. В то же время появляются новые риски кибербезопасности. Характер взаимодействия кибер-уровня (информационно-коммуникационной системы) с физическим уровнем (генерация-передача-распределение)

¹ Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310438-1

усиливает зависимость функционирования физической системы от растущих угроз киберфизической системе в целом и успешно использованных злоумышленниками уязвимостей компонентов кибер-системы, в частности [17, 5]. Появилась необходимость оценки кибербезопасности информационно-коммуникационной системы на основе риск-ориентированного подхода.

Управление ЭЭС осуществляется на основе данных, поступающих от системы SCADA и WAMS, входящих в информационно-коммуникационную систему. Проведенный анализ источников угроз, уязвимостей и возможных кибератак на систему управления позволил выделить свойства системы SCADA и WAMS как критически важных объектов в киберпространстве. При этом основное внимание было уделено не способам защиты, а сохранению системой управления выполнения своих основных функций при кибератаках [3, 10, 12–14].

В статье рассмотрен алгоритм оценки рисков кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры ЭЭС на основе теории нечетких множеств. Достоинством данного подхода является возможность адаптивного и гибкого управления в зависимости от уровней риска.

Информационно-коммуникационная инфраструктура ИЭС. Информационно-коммуникационная инфраструктура включает в себя информационные и коммуникационные системы и сервисы, а также информацию, содержащуюся в этих системах и сервисах. Она состоит из аппаратного и программного обеспечения, которое обрабатывает, хранит и передает информацию, требуемую при управлении физической системой [6,9]. Кроме этого, компьютерные системы, системы управления (SCADA, WAMS), сети, такие, как Интернет и кибер-сервисы также являются частью информационно-коммуникационной инфраструктуры, что повышает ее уязвимость к кибератакам.

В традиционных IT-системах требованиями информационной безопасности является сохранение конфиденциальности, целостности, доступности (CIA) систем передачи информации [9, 18].

Поскольку системы SCADA и WAMS являются жесткими системами реального времени [7, 1], а завершение операции после ее крайнего срока считается бесполезным и потенциально может вызвать каскадный эффект в физической системе, то, в дополнение к перечисленным требованиям при оценке риска, необходимо учитывать своевременность и киберустойчивость [8] для поддержания надежного функционирования ЭЭС.

Отсюда, требования к кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры (SCADA, WAMS) следующие:

1. Своевременность (оперативность отправления, передачи, получения данных) явно выражает критичность по времени систем управления, заданную в результате того, что она является системой реального времени, и параллелизм в системах SCADA, WAMS из-за широко рассредоточенных распределенных систем. В более общем смысле, это свойство означает, что любая запрашиваемая, сообщаемая, выдаваемая и распространяемая информация не должна быть устаревшей, а соответствовать реальному времени.
2. Доступность означает, что любой компонент системы SCADA, WAMS должен быть готовым к использованию, когда необходимо.

3. Целостность требует, чтобы данные генерировались, передавались, отображались, хранились в системе SCADA, WAMS, будучи подлинными и неповрежденными из-за несанкционированного вмешательства.
4. Конфиденциальность относится к тому, что постороннее лицо не должно иметь никакого доступа к информации, относящейся к конкретной системе SCADA, WAMS. Конфиденциальность имеет второстепенное значение для целостности данных. Однако конфиденциальность важной информации, такой как пароли, ключи шифрования, подробная конфигурация системы и т.д., должна быть на первом месте, когда речь идет о проблемах безопасности в промышленности.
5. Киберустойчивость – это способность системы сдерживать локальное воздействие кибератак, идентифицировать и задерживать поток искаженных данных в пределах области, подверженной кибератаке, без дальнейшей передачи и использования этих данных при управлении физической подсистемой, чтобы не привести к возникновению аварийных ситуаций вплоть до развития крупных системных аварий.

Все эти требуемые свойства кибербезопасности не являются взаимоисключающими, но тесно связаны. Например, нарушая целостность, злоумышленник может изменить управляющие сигналы, чтобы вызвать неисправность компонентов SCADA и WAMS, что может в конечном итоге повлиять на доступность. В целом, строгое принудительное управление доступом может также обеспечить конфиденциальность, целостность, доступность, своевременность и киберустойчивость системы. Различие требуемых свойств информационной безопасности и кибербезопасности кибер-инфраструктуры связано с тем, что система SCADA и WAMS должны работать в режиме реального времени и постоянно функционировать.

Поэтому оценка рисков кибербезопасности ИЭС должна включать все перечисленные требования кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры ИЭС.

Оценка рисков кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры. Риск кибербезопасности - это вероятность нежелательного исхода в результате инцидента, события или происшествия, определяемая его вероятностью и нанесенным ущербом [2]. Этот риск является одним из компонентов организационного риска, который может включать в себя многие виды риска (напр., инвестиционный риск, риск управления программой, риск безопасности и т.д.).

Оценку риска предлагается проводить на основе теории нечетких множеств [15]. В качестве входных лингвистических переменных факторов риска рассмотрены:

x_1 - возможности противника;

x_2 - намерения противника;

x_3 - цели противника;

x_4 - уязвимости информационно-коммуникационной системы;

x_5 - воздействия на информационно-коммуникационную систему.

Выходными лингвистическими переменными являются:

y_1 - вероятность инициирования угрозы;

y_2 - вероятность события угрозы;

y_3 - полная вероятность реализации угрозы;

R - риск.

Для каждой лингвистической переменной определены терм-множества $\{VL, L, M, H, CH\}$, где VL - очень низкий уровень с диапазоном значений функции принадлежности $[0;0.04]$; L - низкий уровень с диапазоном значений функции принадлежности $[0.05;0.2]$; M - средний уровень с диапазоном значений функции принадлежности $[0.21;0.79]$; H - высокий уровень с диапазоном значений функции принадлежности $[0.8;0.95]$; CH - критически высокий уровень с диапазоном значений функции принадлежности $[0.96;1]$. Семантические описания терм-множеств для каждого фактора риска, как и для самого риска проводилось с учетом [16] и представлены в табл. 1-8.

Такие факторы как возможности, намерения и цели противника использованы для оценки вероятности инициирования угрозы (y_1). Сочетания факторов, таких как возможности противника и уязвимости информационно-коммуникационной инфраструктуры использованы для оценки вероятности события угрозы как результат неблагоприятного воздействия (y_2). Комбинация этих вероятностей была использована для определения полной вероятности реализации угрозы (y_3) согласно с заданными правилами нечеткого вывода. Наконец, сочетания полной вероятности реализации угроз и уровней воздействий на информационно-коммуникационную систему позволяют получить оценку риска кибербезопасности.

Таблица 1. Возможности противника

Уровень	Описание
Очень низкий	У противника очень ограниченные ресурсы, опыт и возможности для проведения успешной атаки.
Низкий	Противник имеет ограниченные ресурсы, опыт и возможности для проведения успешной атаки.
Средний	У противника есть умеренные ресурсы, опыт и возможности для проведения нескольких успешных атак.
Высокий	Противник обладает сложным опытом, обладающим значительными ресурсами и возможностями проведения нескольких успешных скоординированных атак.
Критически высокий	Противник обладает очень сложным уровнем знаний, обладает достаточными ресурсами и может создавать возможности проведения нескольких успешных, непрерывных и скоординированных атак.

Таблица 2. Намерения противника

Уровень	Описание
Очень низкий	Злоумышленник стремится нарушить или уничтожить киберресурсы информационно-коммуникационной системы и делает это, не беспокоясь об обнаружении атаки
Низкий	Злоумышленник активно стремится получить критическую или конфиденциальную информацию или разрушить киберресурсы информационно-коммуникационной системы и делает это, не беспокоясь об обнаружении атаки
Средний	Противник пытается получить или изменить конкретную критическую или конфиденциальную информацию или разрушить киберресурсы организации, установив точку доступа в информационно-коммуникационных системах. Противник стремится минимизировать обнаружение атаки, особенно при проведении атак в течение длительных периодов времени. Противник стремится помешать выполнению функций управления
Высокий	Злоумышленник стремится подорвать/помешать критическим аспектам выполнения основных целей или функций управления, программ или создать условия, способствующие сделать это в будущем, поддерживая доступ в информационно-коммуникационной системе. Противник очень обеспокоен тем, чтобы свести к минимуму обнаружение кибератаки, особенно при подготовке к будущим атакам.
Критически высокий	Противник пытается подорвать, серьезно затруднить или уничтожить выполнение основных функций, программ, используя доступ к информационно-коммуникационной системе. Противник обеспокоен раскрытием методов разведки только в той мере, в какой это будет препятствовать его возможностям завершить запланированные действия.

Таблица 3. Цели противника

Уровень	Описание
Очень низкий	У противника может быть и не быть цели проведения кибератаки на какие-либо конкретные организации или группы организаций.
Низкий	Противник использует общедоступную информацию для определения цели в группе интересующих его организаций или информации и ищет возможности осуществления кибератаки в этой группе.
Средний	Противник анализирует общедоступную информацию для осуществления кибератаки на информационно-коммуникационную систему, программное обеспечение или информацию.
Высокий	Противник анализирует информацию, полученную с помощью разведки, для постоянного доступа к информационно-коммуникационной системе, программному обеспечению или функциям управления, уделяя особое внимание критически важной информации, ресурсам или функциям, конкретным сотрудникам, поддерживающим эти функции.
Критически высокий	Противник анализирует информацию, полученную с помощью разведки для постоянного проведения кибератак в отношении информационно-коммуникационной системы, программного обеспечения, функций управления, ориентируясь на конкретную критически важную информацию, функции, конкретных сотрудников, взаимодействующие организации.

Таблица 4. Уязвимости информационно-коммуникационной системы

Уровень	Описание
Очень низкий	Уязвимость не вызывает беспокойства.
Низкий	Уязвимость вызывает незначительную озабоченность, но эффективность исправления может быть улучшена.
Средний	Уязвимость представляет собой умеренную озабоченность, основанную на подверженности уязвимости и простоте эксплуатации и/или на серьезности воздействий, которые могут возникнуть в результате ее использования.
Высокий	Уязвимость вызывает серьезную озабоченность на основе выявления уязвимости и простоты эксплуатации и/или серьезности воздействий, которые могут возникнуть в результате ее использования.
Критически высокий	Уязвимость не защищена и доступна, и ее эксплуатация может привести к серьезным последствиям.

Таблица 5. Воздействия на информационно-коммуникационную систему

Уровень	Описание
Очень низкий	Ожидается, что событие, связанное с угрозой, окажет незначительное негативное влияние на операции управления кибер-физической системой.
Низкий	Ожидается, что событие угрозы будет иметь ограниченное неблагоприятное воздействие на операции управления кибер-физической-системой.
Средний	Ожидается, что событие угрозы будет иметь серьезные неблагоприятные последствия для операций управления кибер-физической системой.
Высокий	Ожидается, что событие, связанное с угрозой, окажет серьезное или катастрофическое неблагоприятное воздействие на операции управления кибер-физической системой.
Критически высокий	Ожидается, что событие угрозы будет иметь многочисленные серьезные или катастрофические неблагоприятные последствия для кибер-физической системы.

Таблица 6. Вероятность инициирования события угрозы

Уровень	Описание
Очень низкий	Маловероятно, что противник инициирует событие угрозы.
Низкий	Противник вряд ли инициирует событие угрозы.
Средний	Вероятно, противник инициирует событие угрозы.
Высокий	Противник скорее всего инициирует событие угрозы.
Критически высокий	Противник почти наверняка инициирует событие угрозы.

Таблица 7. Вероятность события угрозы

Уровень	Описание
Очень низкий	Если событие угрозы инициируется или происходит, оно, с низкой вероятностью, будет иметь неблагоприятные последствия.
Низкий	Если событие угрозы инициируется или происходит, оно, маловероятно, будет иметь неблагоприятные последствия.

Средний	Если событие угрозы инициируется или происходит, оно, с некоторой степенью вероятности, будет иметь неблагоприятные последствия.
Высокий	Если событие угрозы инициируется или происходит, оно, с высокой вероятностью, будет иметь неблагоприятные последствия.
Критически высокий	Если событие угрозы инициируется или происходит, оно почти наверняка будет иметь неблагоприятные последствия.

Таблица 8. Уровни риска

Уровень	Описание
Очень низкий	Очень низкий риск означает, что можно ожидать, что событие угрозы будет иметь незначительное неблагоприятное воздействие на кибер-физическую систему.
Низкий	Низкий риск означает, что угрожающее событие может иметь ограниченное неблагоприятное воздействие на кибер-физическую систему.
Средний	Умеренный риск означает, что опасное событие может оказать серьезное неблагоприятное воздействие на кибер-физическую систему.
Высокий	Высокий риск означает, что угрожающее событие может иметь серьезное или катастрофическое неблагоприятное воздействие на кибер-физическую систему.
Критически высокий	Очень высокий риск означает, что можно ожидать, что событие угрозы может иметь многочисленные серьезные или катастрофические неблагоприятные последствия для кибер-физической системы.

Для оценки риска кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры построена иерархическая нечеткая система (рис. 1). В основу предлагаемого алгоритма оценки риска заложены системы нечеткого логического вывода Мамдами (F_1 , F_2 , F_3 , F_4) [4], реализуемые в MatLAB.

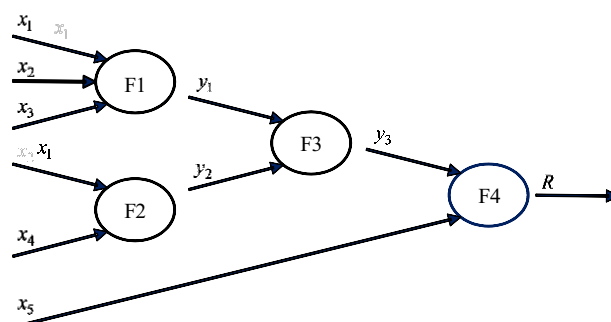


Рис. 1. Иерархическая нечеткая система оценки риска кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры

Трехмерные поверхности зависимости выходных переменных от входных переменных, полученные с помощью GUI-модуля Surface Viewer, представлены на рис. 2-7.

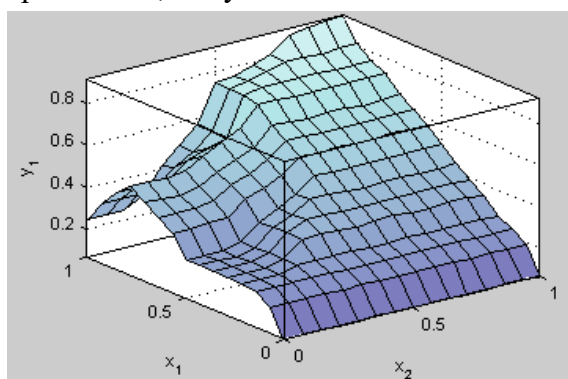


Рис. 2. Вероятность инициирования угрозы $y_1 = f(x_1, x_2)$ в зависимости от уровней возможностей и намерений противника

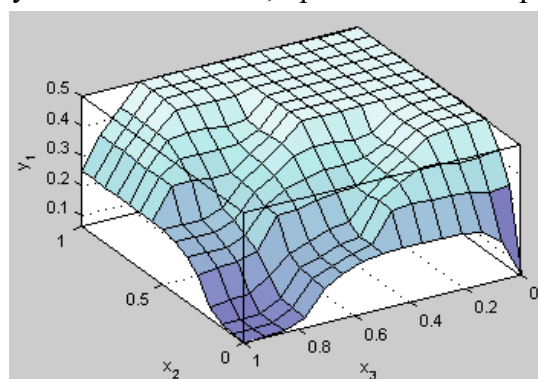


Рис. 3. Вероятность инициирования угрозы $y_1 = f(x_2, x_3)$ в зависимости от уровней намерений и целей противника

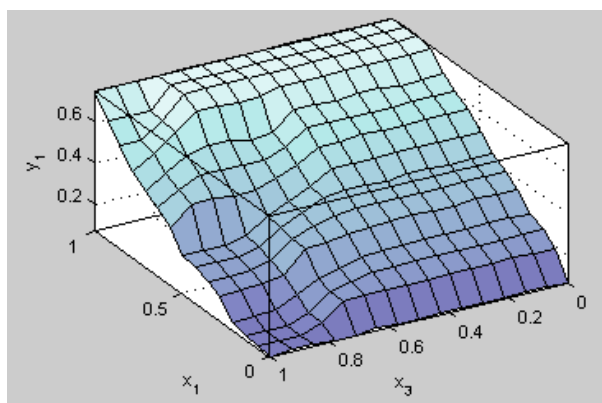


Рис. 4. Вероятность инициирования угрозы $y_1 = f(x_1, x_3)$ в зависимости от уровней возможностей и целей противника

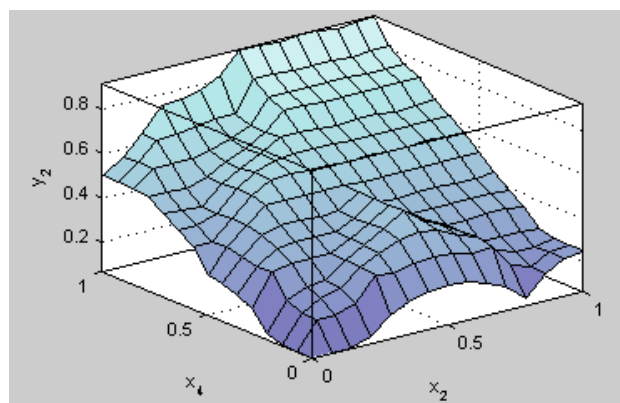


Рис. 5. Вероятность события угрозы $y_2 = f(x_1, x_4)$ в зависимости от уровней уязвимостей информационно-коммуникационной инфраструктуры и возможностей противника

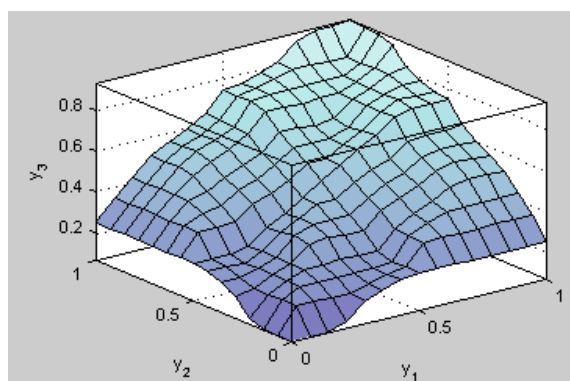


Рис. 6. Полная вероятность реализации угрозы $y_3 = f(y_1, y_2)$ в зависимости от уровней вероятности события угрозы и вероятности инициирования угрозы

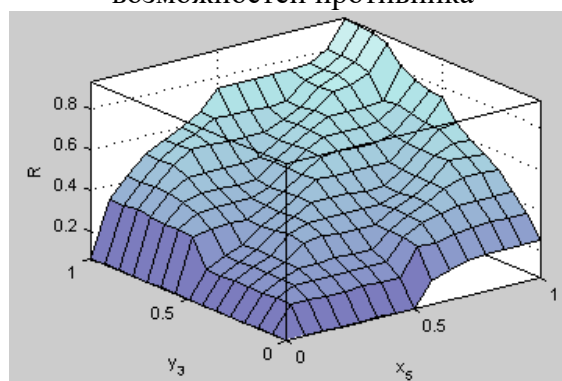


Рис. 7. Оценка риска $R = f(x_5, y_3)$ в зависимости от уровней воздействия и полной вероятности реализации угрозы

Пример. В качестве примера оценен риск кибербезопасности при jamming-атаке на систему WAMS [11]. При реализации такой кибератаки отмечена потеря таких свойств кибербезопасности, как доступность и своевременность передачи данных. Такие атаки могут нарушить работу системы и даже приводить к отказу системы.

Пусть входные переменные (намерения, возможности, цели противника, уязвимости и воздействия) имеют следующие значения: $x_1 = 0.82$ (высокий уровень), $x_2 = 0.75$ (средний уровень), $x_3 = 0.67$ (средний уровень), $x_4 = 0.84$ (высокий уровень), $x_5 = 0.91$ (высокий уровень).

При заданных входных переменных, определим выходные лингвистические переменные согласно правилам нечеткого вывода систем F_1, F_2, F_3, F_4 . Вероятность инициирования угрозы $y_1 = 0.682$, вероятность события угрозы $y_2 = 0.756$, полная вероятность реализации угрозы $y_3 = 0.637$, оценка риска кибербезопасности при jamming-атаках $R = 0.667$.

Полученная оценка риска соответствует среднему уровню, и говорит о том, что опасное событие может оказать серьезное неблагоприятное воздействие на систему WAMS.

Заключение. Показана необходимость учета дополнительных требований кибербезопасности (своевременность, киберустойчивость) информационно-коммуникационной инфраструктуры ИЭС при оценке рисков.

Предложен алгоритм оценки риска кибербезопасности на основе теории нечетких множеств, применение которого особенно актуально в условиях неопределенности.

Анализ риска кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры и его оценка важны для дальнейшего определения организационного риска при управлении ИЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюев Б.И., Ерохин П.М., Куликов Ю.А. Система мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС // Технологии управления режимами энергосистем XXI века: Сб. докл. Всеросс. Научно-практ. конф. / Под ред. А.Г. Фишова. Новосибирск: Изд_во НГТУ. 2006. С. 83–92.
2. Дорофеев А.В., Марков А.С. Менеджмент информационной безопасности: основные концепции // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 1 (2). С. 67–73.
3. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Повышение кибербезопасности интеллектуальных энергетических систем методами оценивания состояния // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 3 (27). С. 63–69. DOI:1021681/2311-3456-2018-3-63-69
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 736 с.
5. Массель Л.В. Использование современных информационных технологий в Smart Grid как угроза кибербезопасности энергетических систем России // Information technology and security. Украина, Киев, Институт социальной связи и защиты информации НТУ Украины «КПИ». №1(3) 2013. С. 56–65.
6. Массель Л.В., Колосок И.Н., Гурина Л.А. Обработка информационных потоков при мониторинге и управлении режимами интеллектуальных электроэнергетических систем // Вестник ИргТУ. 2013. №2(73). С. 30–35.
7. СТО 59012820.35.240.50.004-2011. Системы диспетчерского управления в электроэнергетике. Система сбора данных и оперативного контроля (SCADA) в диспетчерском управлении. Режим доступа: <https://www.so-ups.ru> (дата обращения 03.04.2019)
8. B. Zhu, A. Joseph and S. Sastry. A Taxonomy of Cyber Attacks on SCADA Systems // International Conference on Internet of Things and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Dalian. 2011. Pp. 380–388. doi: 10.1109/iThings/CPSCoM.2011.34.
9. FIPS 199 Standards for Security Categorization of Federal Information and Information Systems, February 2004.
10. Gurina L., Kolosok I. Calculation of cyber security index in the problem of power systems state estimation based on SCADA and WAMS measurements // Lecture Notes in Computer Science. 2016 T. 8985. Pp. 172–177.

11. K. Gai, M. Qiu, Z. Ming, H. Zhao, and L. Qiu. Spoofing-Jamming Attack Strategy Using Optimal Power Distributions in Wireless Smart Grid Networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Pp. 1–1.
12. Kolosok I., Gurina L. Cyber Security-Oriented Smart Grid State Estimation // E3S Web Conf. Vol. 69. 2018. Green Energy and Smart Grids (GESG 2018). Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902004>
13. Kolosok I., Gurina L. State Estimation of Electric Power System under DOS-attacks on SCADA system and WAMS // Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018). Advances in Intelligent Systems Research. vol. 158. 2018. Pp. 94–99. <https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.17>
14. Kolosok I., Korkina E., Gurina L. Vulnerability analysis of the state estimation problem under cyber attacks on WAMS // International Conference on Problems of Critical Infrastructures Joint 6th Conference of International Institute for Critical Infrastructures and 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. 2015. Pp. 73–84.
15. Ming-Chang Lee. Information Security Risk Analysis Methods and Research Trends: AHP and Fuzzy Comprehensive Method // International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT). 2014. Vol.6. No 1. Pp. 29–45. DOI: 10.5121/ijcsit.2014.6103
16. National Institute of Standards and Technology NIST Special Publication 800-30 rev. 1 (Sep. 2012), Guide for Conducting Risk Assessments.
17. Siddharth Sridhar, Adam Hahn, Manimaran Govindarasu. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid // Proceedings of the IEEE. Vol. 100. No 1. January 2012. Pp. 210–224.
18. The Smart Grid Interoperability Panel Cyber Security Working Group, “Introduction to NISTIR7628 Guidelines for Smart Grid Cyber Security”. September 2010. Режим доступа: <http://csrc.nist.gov/publications/nistir/ir7628/introduction-to-nistir-7628.pdf> (дата обращения 03.04.2019)

CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT OF INFORMATION AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE OF INTELLIGENT ENERGY SYSTEM²

Irina N. Kolosok

Dr., Professor, Leading Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control, e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Liudmila A. Gurina

PhD., Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control, e-mail: gurina@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The digital energy paradigm is focused on the establishment of cyber-physical systems and the large-scale use of Smart Grid technologies. Apart from the great potential of such a transition, an intelligent energy system (IES) is noted to be sensitive to ever-increasing cyber threats. The need to ensure and maintain reliable IES operation in the event of external and internal cyber-intrusions requires an analysis and consideration of possible risks of the IES cybersecurity and the development of further measures to maintain it. This paper is focused on the information and communication infrastructure of the IES and cybersecurity properties of SCADA and WAMS, which are part of the infrastructure. Particular attention is paid to the analysis of cybersecurity risk factors that are further taken into account when developing a cybersecurity risk assessment algorithm of the information and communication infrastructure of the electric power system based on the theory of fuzzy sets, which is the result of the presented research. The performance of the algorithm under uncertainty demonstrates its effectiveness.

Key words: risk, cybersecurity, SCADA system, WAMS, electric power system.

References

1. Ayuev B.I., Erohin P.M., Kulikov YU.A. Sistema monitoringa perekhodnyh rezhimov EES/OES [UPS/IPS Wide Area Measurement System] // Tekhnologii upravleniya rezhimami energosistem XXI veka: Sb. dokl. Vseross. Nauchno-prakt. konf. / Pod red. A.G. Fishova = Technologies for managing power systems of the XXI century: Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference / Ed. A.G. Fishov. Novosibirsk. Izd_vo NGTU = NSTU Publishing House. 2006. Pp. 83–92. (in Russian)
2. Dorofeev A.V., Markov A.S. Menedzhment informacionnoj bezopasnosti: osnovnye koncepcii [Cyber security management: basic concept] // Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues. 2014. № 1 (2). Pp. 67–73. (in Russian)

² The research has been carried out within the framework of the scientific project III.17.4.2. of the Program for Fundamental Research of SB RAS. Reg. No. AAAA-A17-117030310438-1

3. Kolosok I.N., Gurina L.A. Povyshenie kiberbezopasnosti intellektual'nyh energeticheskikh sistem metodami ocenivaniya sostoyaniya [Improvement of Cybersecurity of Smart Grid by State Estimation Methods] // Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues. 2018. № 3 (27). Pp. 63–69. DOI:1021681/2311-3456-2018-3-63-69 (in Russian)
4. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg. BHV-Petersburg. 2005. 736 p. (in Russian)
5. Massel L.V. Ispol'zovaniye sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy v Smart Grid kak ugroza kiberbezopasnosti energeticheskikh sistem Rossii [The use of modern information technology in SMART GRID as a threat to cyber security of the energy system of Russia // Information technology and security. Ukraine. Kiev. Institut sotsial'noy svyazi i zashchity informatsii NTU Ukrainy «KPI» = Institute of Special Communication and Information Security of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", №1(3) 2013. Pp. 56–65. (in Russian)
6. Massel' L.V., Kolosok I.N., Gurina L.A. Obrabotka informacionnyh potokov pri monitoringe i upravlenii rezhimami intellektual'nyh elektroenergeticheskikh sistem [Information flow processing when monitor and control Smart Grid regimes] // Vestnik IrGTU = Proceedings of ISTU. 2013. №2(73). Pp. 30-35. (in Russian)
7. STO 59012820.35.240.50.004-2011. Sistemy dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike. Sistema sbora dannyh i operativnogo kontrolya (SCADA) v dispetcherskom upravlenii [Company Standard 59012820.35.240.50.004-2011. Dispatch control systems in electric power. The Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) in dispatch control]. Available at: <https://www.so-ups.ru> (accessed 03.04.2019) (in Russian)
8. B. Zhu, A. Joseph and S. Sastry. A Taxonomy of Cyber Attacks on SCADA Systems // 2011 International Conference on Internet of Things and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Dalian. 2011. Pp. 380–388. doi: 10.1109/iThings/CPSCoM.2011.34.
9. FIPS 199 Standards for Security Categorization of Federal Information and Information Systems, February 2004
10. Gurina L., Kolosok I. Calculation of cyber security index in the problem of power systems state estimation based on SCADA and WAMS measurements // Lecture Notes in Computer Science. 2016 T. 8985. Pp. 172–177.
11. K. Gai, M. Qiu, Z. Ming, H. Zhao, and L. Qiu. Spoofing-Jamming Attack Strategy Using Optimal Power Distributions in Wireless Smart Grid Networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Pp. 1–1.
12. Kolosok I., Gurina L. Cyber Security-Oriented Smart Grid State Estimation // E3S Web Conf. Vol. 69. 2018. Green Energy and Smart Grids (GESG 2018). Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902004>
13. Kolosok I., Gurina L. State Estimation of Electric Power System under DOS-attacks on SCADA system and WAMS // Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018). Advances in Intelligent Systems Research. vol. 158. 2018. Pp. 94–99. <https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.17>

14. Kolosok I., Korkina E., Gurina L. Vulnerability analysis of the state estimation problem under cyber attacks on WAMS // International Conference on Problems of Critical Infrastructures Joint 6th Conference of International Institute for Critical Infrastructures and 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. 2015. Pp. 73–84.
15. Ming-Chang Lee. Information Security Risk Analysis Methods and Research Trends: AHP and Fuzzy Comprehensive Method // International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT). 2014. Vol.6. No 1. Pp. 29–45. DOI: 10.5121/ijcsit.2014.6103
16. National Institute of Standards and Technology NIST Special Publication 800-30 rev. 1 (Sep. 2012), Guide for Conducting Risk Assessments.
17. Siddharth Sridhar, Adam Hahn, Manimaran Govindarasu. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid // Proceedings of the IEEE. Vol. 100. No 1. January 2012. Pp. 210–224.
18. The Smart Grid Interoperability Panel Cyber Security Working Group, “Introduction to NISTIR7628 Guidelines for Smart Grid Cyber Security”. September 2010. Available at: <http://csrc.nist.gov/publications/nistir/ir7628/introduction-to-nistir-7628.pdf> (accessed 03.04.2019)

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Соловьев Василий Иванович

К. т. н., доцент, доцент кафедры бизнес-информатики,

e-mail: solvi2@bk.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет экономики и управления НИИХ», 630099 г. Новосибирск, ул. Каменская 56

Аннотация. В статье представлены анализ и оценка состояния инфраструктуры системы теплоснабжения муниципального образования на примере г. Новосибирска и в целом по России. Дана сравнительная характеристика удельных потерь тепла на ключевых элементах технологического процесса цепочки: «генерация – транспорт – потребление тепловой энергии» и показаны возможности (потенциалы) и зоны экономии тепловой энергии.

Описаны существующие в российской и региональной практике технологии первых шагов фрагментарной цифровизации технологического процесса цепочки: «генерация – транспорт – потребление тепловой энергии». Предложен подход к решению задачи построения единого комплекса автоматизированного управления системой централизованного теплоснабжения, например, на базе единой цифровой платформы, основанный на интеграции цифровых продуктов, продемонстрировавших ранее свою практическую значимость в цифровизации отдельных компонентов систем теплоснабжения.

Ключевые слова: система теплоснабжения, цифровизация, цифровая трансформация, генерация, транспорт, потребление, потенциал теплосбережения, интеграция, муниципальное образование.

Цитирование: Соловьев В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 52–61. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-05

Введение. По данным, представленным в [10], уровень цифровизации российских компаний оставляет желать лучшего: 25% - относятся к цифровым; 46% - находятся на стадии трансформации; 29% - имеют традиционные формы осуществления всех видов деятельности и управления. Здесь по-прежнему основным критерием отнесения компаний к цифровым является уровень ИТ-бюджетирования на цифровую трансформацию всех бизнес-процессов.

Мировая тенденция всеобщей цифровизации, предусматривающая становление «умного» общества и «умных» городов (диффузия идеологии *Smart Home - Smart Grid - Smart City*) предопределяют потребность в широком внедрении ИТ технологий в системах управления и своего рода апгрейда топливно-энергетического комплекса (далее - ТЭК), а также жилищно-коммунального хозяйства муниципальных образований.

Принятые в 2017 году законодательные меры, направленные на стимулирование развития информационного общества и цифровой экономики [8, 5], позволят активизировать работы по интеллектуализации российского ТЭК, компонентом которого является система теплоснабжения.

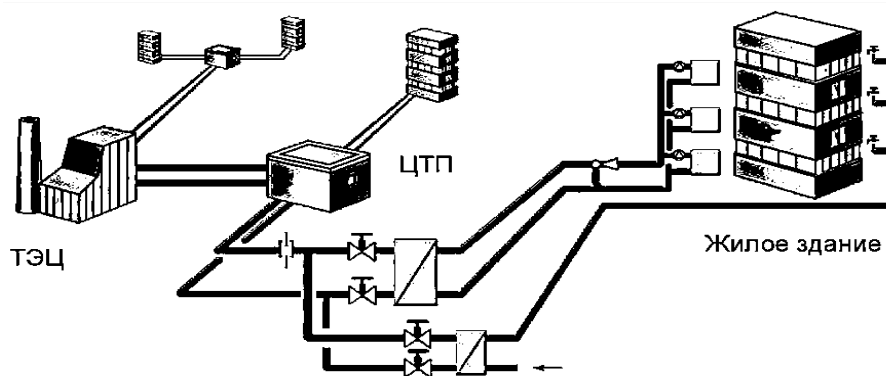
Цифровая трансформация системы теплоснабжения – это реинжиниринг данной системы, предусматривающий ее преобразование в состояние онлайн-отзывчивости на изменения внутренней и внешней среды на принципах развития инфраструктуры теплоснабжения в формате цифровой платформы, а в идеале – и цифровой экосистемы. Здесь ключевым является принцип открытого *API*¹ и гибкой интеграции, что позволяет владельцам бизнес-процессов изыскивать инновационные прорывные решения в развитии своих продуктов и услуг посредством коллабораций² и интеграций с другими сервисами и организациями-партнерами.

Следовательно, необходимы инновационная стратегия, перепроектирование бизнес-моделей и бизнес-процессов, адекватная цифровая и инженерная инфраструктура, современное программное обеспечение и информационно-коммуникационные технологии (далее – ИКТ), развитые сети коммуникационного взаимодействия производителей, поставщиков и потребителей тепловой энергии, оптимизация пакета предоставляемых услуг, адекватное обеспечение требуемыми ресурсами, эффективные механизмы и инструменты внедрения и сопровождения, соответствующие программы наделения персонала хозяйствующих субъектов сферы теплоснабжения и жителей надлежащими компетенциями.

1. Состояние систем теплоснабжения и предпосылки их цифровизации.

Российская проблема надлежащего функционирования системы теплоснабжения заключается не только в ограниченности применения цифровых технологий, но и в архаичности архитектуры самих тепловых сетей и технологических процедур процесса подачи теплоносителя.

Система теплоснабжения в виде типовой инфраструктуры централизованной закрытой системы подачи теплоносителя в многоквартирные дома представлена на рис. 1.



ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ЦТП – центральный тепловой пункт

Рис. 1. Система теплоснабжения

Система теплоснабжения наряду с обеспечением теплового комфорта для людей по месту их проживания и для работников на их рабочих местах, а также подачей

¹API (программный интерфейс приложения, интерфейс [прикладного программирования](#)) ([англ. Application programming interface, API](#)).

² **Коллаборация**, или **сотрудничество** - процесс совместной [деятельности](#) в какой-либо сфере двух и более людей или [организаций](#) для достижения общих [целей](#).

теплоносителя для нужд производственной и обеспечивающей деятельности, должна быть эффективной и энергосберегающей.

Предметом настоящего исследования являются системы централизованного теплоснабжения города Новосибирска, состояние которых принципиально не выделяется среди городов других российских регионов. В то же время, если в среднем по РФ потери в магистральных сетях достигают 10% (в Швеции и Финляндии – 5%), а в распределительных сетях – 20% (в Швеции и Финляндии – 10%), что в целом составляет около 30%, то в теплосетях города Новосибирска, обслуживаемых Сибирской генерирующей компанией (далее – СГК), не превышает 27% [9]. Другой не менее важной является проблема потерь тепловой энергии в распределительных сетях непосредственно у российских потребителей, достигающих 20% (при 5% - в скандинавских странах). Ключевая причина такого «безобразия» заключается в предельно высокой степени физического и морального износа основных фондов, в том числе тепловых магистралей - доля теплотрасс в Новосибирске, срок эксплуатации которых превышает норматив, составляет около 62%.

В 2018 году по данным СГК в Новосибирске удельный показатель повреждений тепловых сетей равнялся 34/100 км, а общее количество составило 1119. Для сравнения: в Красноярске – 103, в Кемерово – 118, в Барнауле – 201. Предпосылками такого положения, в первую очередь, являются срок эксплуатации тепловых сетей, превышающий 25 лет и составляющий 47,32 % от общей протяженности сетей [7].

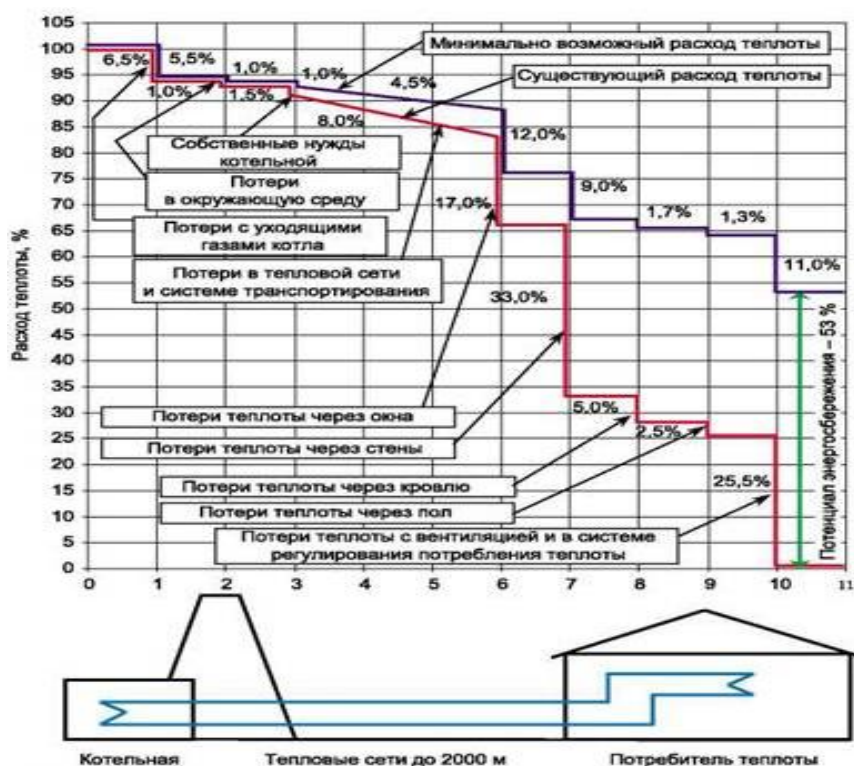


Рис. 2. Потери тепловой энергии и оценка потенциала энергосбережения

Линейка потерь тепла (см. рис. 2) иллюстрирует возможность реализации энергосберегающего потенциала эксплуатируемых систем теплоснабжения отапливаемых зданий, равного 53 % от объема генерируемой тепловой энергии и практически достижимого в деле экономии части тепловой энергии. Другая значимая ее часть (до 48 %) приходится на

Данные потерь теплоты в системе теплоснабжения с не конденсационными котлами при транспортировке от котельной до потребителя и оценка потенциала энергосбережения, приведенные в работе [4] и представленные на рис. 2, можно экстраполировать на другие технологические схемы приготовления тепла. Достоверность подобной экстраполяции должна быть подкреплена обязательным учетом климатических условий и рельефа места размещения тепловой сети.

потребителя. Количество тепловой энергии, доступной для экономии при ее производстве, не превышает 1,5%, а в системе транспортирования - 3,5%.

Подобный подход к анализу потерь тепловой энергии позволяет определить достижимое значение потенциала ее сбережения на каждой стадии, начиная с источника тепловой энергии и до конечного ее потребителя.

За истекшие 10 лет в Новосибирске общее потребление тепловой энергии не увеличивалось, а динамика доли потерь тепловой энергии имела тенденцию к росту, что свидетельствует о снижении эффективности использования тепловой энергии в целом [11].

Исследования в данной предметной области подтверждают, что в рамках энергосберегающих мероприятий по совершенствованию систем теплоснабжения и экономии энергоносителей основные усилия должны быть направлены на эффективное и рациональное использование тепловой энергии. Здесь ключевым потенциалом энергосбережения тепловой энергии является снижение ее потерь на стадии потребления (см. рис. 2), составляющих преобладающую долю потенциала энергосбережения, что особо подчеркивает необходимость считать такой подход приоритетным.

Опираясь на вышеприведенные данные, можно констатировать, что при снижении потерь только на стадиях транспортировки, распределения и потребления до «скандинавского» уровня можно достигнуть потенциала теплосбережения и роста теплоэффективности для новосибирских теплосетей в размере не менее 27%.

2. Цифровизация в теплоснабжении: состояние и перспективы. О состоянии практики цифровизации в теплоснабжении по сравнению с другими отраслями российской экономики свидетельствуют данные Росстата: в 2017 году только около 65% предприятий-поставщиков тепловой энергии применяли базовые информационные технологии [2]. Здесь под базовыми информационными технологиями подразумевают: использование компьютеров, интернета, локальных вычислительных сетей, а также автоматизированных систем учета потребления ресурсов.

Компьютеризация систем теплоснабжения, представленная разработанными программно-техническими комплексами (далее – ПТК) или в иноязычной трактовке – *Distributed Control Systems (DCS)*, еще не получила широкого распространения в российской практике проектирования и эксплуатации систем централизованного теплоснабжения [3, 12].

В применяемых ПТК и общепромышленных автоматизированных устройствах базовым элементом системы автоматизированного управления являются контроллеры ([англ.](#) *controller* – регулятор, управляющее устройство), осуществляющие ввод-вывод, обработку, обмен по локальным и удаленным интерфейсам.

Исследования и практика свидетельствуют, что для поддержания заданных технических характеристик систем централизованного теплоснабжения (далее – СЦТС) в ее составе должна быть включена автоматизированная система диспетчерского управления (далее – АСДУ), являющаяся ее неотъемлемой частью.

АСДУ – это территориально распределенная многоуровневая информационно-измерительная централизованная система реального времени, содержащая устройство сбора и передачи данных (далее – УСПД), самостоятельный блок управления, центральную диспетчерскую (центр обработки данных - ЦОД), взаимодействующих через сеть Интернет. Серверы ЦОД по определенному алгоритму опрашивают УСПД, получают и передают

данные, архивируют полученную информацию, обрабатывают многочисленные запросы клиентских программ, которые работают на компьютерах специалистов: теплотехников, экономистов, управленцев. Мини-ТЭЦ и котельные обычно имеют самостоятельные системы управления, которые по запросу ЦОД могут выдавать информацию о текущем состоянии и данные с приборов учета. Примерная архитектура АСДУ представлена на рисунке 3 [1].

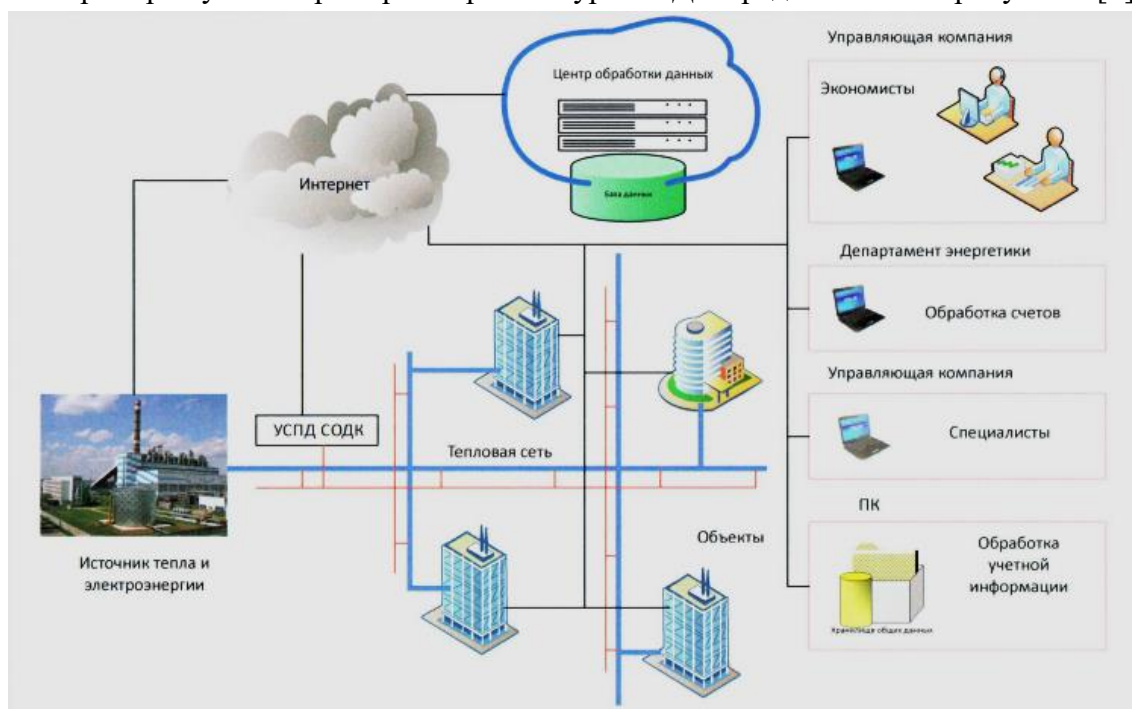


Рис. 3. Примерная архитектура АСДУ

Тепловые сети и центральный тепловой пункт (далее – ЦТП) также имеют собственные системы управления. Приборы контроля утечек выдают в случае аварии сигнал в УСПД, который принимается в ЦОД. Обработкой учетной информации занимается комплекс специальных программных средств.

Потребители тепла с автоматизированным инженерным оборудованием экономят 25 – 40% тепла. АСДУ, позволяя рационально и корректно управлять системами централизованного теплоснабжения, дает возможность фактически реализовать технические характеристики, заложенные в штатном оборудовании [1].

Следующий этап автоматизации сетей теплоснабжения, как очередная ступень на пути к цифровизации, связан с использованием получившего распространение в ИТ практике протокола *Ethernet* построения локальной сети передачи данных, ставшей основой трансформации иного уровня автоматизации управления бизнес-процессами – перехода от традиционной архитектуры с контроллерами к одноранговой мультипроцессорной среде управления (далее - ОМСУ).

В составе такой ОМСУ любой элемент обработки информации, например, процессорное устройство (далее – ПУ) обладает непосредственным доступом к любому устройству сопряжения с объектом (далее – УСО), а значит, к любым данным от технологического объекта управления (далее – ТОУ). Здесь контроллеры виртуальны и представляют собой программы, исполняемые в ПУ и осуществляющие опрос и извлечение данных от УСО в исполнении программ управления. Все это позволяет в рамках каждого ПУ

сформировать управляющие программы – виртуальные контроллеры, обрабатывающие любые необходимые им данные различных УСО. В то же время каждое УСО доступно для опроса одновременно несколькими ПУ.

Программно-технический комплекс, в состав которого входят базовые элементы, в числе которых контроллеры, серверы, рабочие станции, разработанный новосибирской компанией «Модульные Системы Торнадо» на базе любых ПУ и УСО, был испытан в рамках сертифицированной (система «Энсертико») программы в реальных условиях управления энергоблоком для Краснодарской ТЭЦ (ПТК для ПГУ-410) [6].

Что касается ПТК «Торнадо-N», то в составе его структуры высокопроизводительные компьютеры, как устройства обработки, формируют резервированные блоки: один компьютер с функциями основного, второй – дублирующий. При этом тот и другой компьютеры наделен четырьмя автономными интерфейсами *Ethernet*: первый - для связи с УСО, второй – для коммуникации с верхним уровнем ПТК, третий – для резервного опроса блоков УСО и коммуникации с верхним уровнем ПТК, четвертый – для обмена данными между компьютерами процессорной пары (рис. 4).

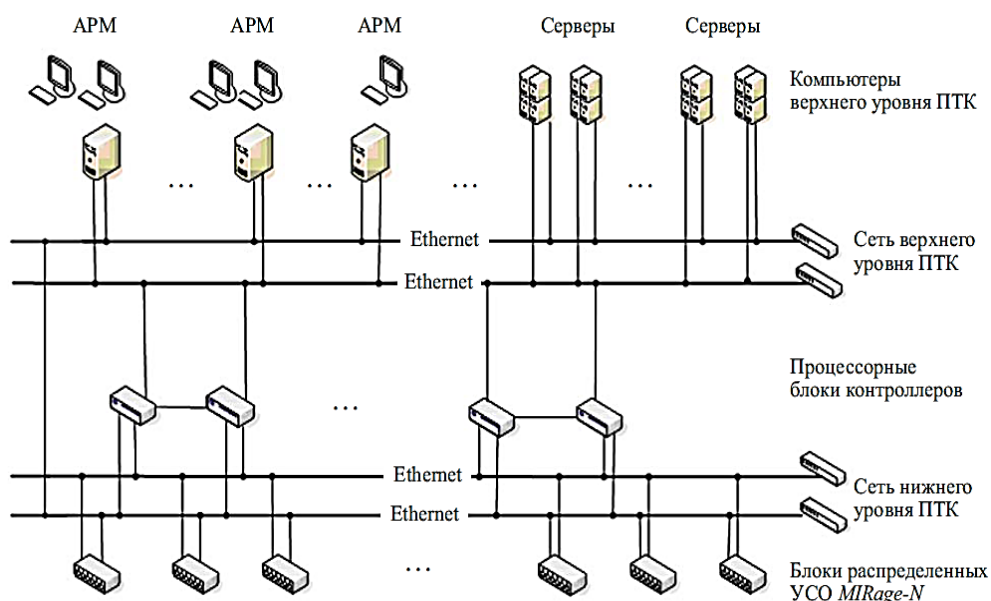


Рис. 4. Архитектура сети ПТК «Торнадо-N» [12]

Анализ инженерно-технического потенциала данного решения и его доступность к высокоуровневой цифровой трансформации позволяют оценить реальную возможность построения на его базе модели системы теплоснабжения в контексте «умной теплосети».

Весьма важным в развитии подобных решений является интеграция в их состав специализированных компьютерных программ, подобных *ZuluThermo* и предназначенных для выполнения инженерных расчетов СЦТС. Программа выполнена в виде цифровой компьютерной модели трубопроводов отопления, горячего водоснабжения (далее – ГВС), функционирующих котельных и ЦТП, размещенных на территории любого субъекта.

Программное обеспечение таких ИТ-продуктов позволяет обеспечивать дистанционный контроль эксплуатации СЦТС, отслеживать давление и температуру теплоносителя в трубопроводах, а также осуществлять инженерные расчеты. Примечательно и то, что ИТ-продукт выполнен в виде платформы формата геоинформационной системы,

тем самым позволяя моделировать любые процессы на тепловых сетях применительно к топографии конкретной местности.

Не менее актуальным в создании интегрированной цифровой платформы решения задачи построения единого комплекса автоматизированного управления СЦТС является включение в такую цифровую платформу программного пакета *SCADA* (аббр. от англ. *Supervisory Control And Data Acquisition* - диспетчерское управление и сбор данных), позволяющего в режиме *online* осуществлять сбор, обработку, отображение и архивирование данных с объектов СЦТС. Это позволит наряду с прямыми задачами автоматизированного управления СЦТС оперативно выявлять и реагировать на нештатные ситуации в системе и в кратчайшие сроки устранять повреждения на объектах СЦТС.

К тому же мониторинг и управление «умными сетями теплоснабжения» в контексте использования цифровых технологий требуют сопряжения данных *SCADA* и данных диагностики внутреннего состояния теплопроводов перемещающимися по ним роботами. Робот, управляемый дистанционно, перемещаясь, выявляет имеющиеся дефекты: трещины, сколы, вмятины, коррозию и др., определяет места повреждений, а также производит замеры толщины стенок по всему периметру трубы. Дополнительно компьютерная программа представляет заключение о критичности обнаруженного дефекта и допустимом сроке продолжения эксплуатации трубы, а при фиксации недопустимости дальнейшей эксплуатации способствует выбору требуемого метода ремонта трубы.

Очевидно, что цифровизация отдельных компонентов функционирующей системы теплоснабжения «генерация – транспорт – потребление тепловой энергии» посредством представленных ИТ-решений, как процесс передачи данных, средств коммутации и управления в цифровой форме позволит обеспечить интеграцию разноформатных цифровых продуктов в целях создания единого комплекса автоматизированного управления системой централизованного теплоснабжения на базе единой цифровой платформы.

Заключение. Переход на «цифру» предусматривает цифровизацию трех основных компонентов системы теплоснабжения любого уровня: источника тепловой энергии, теплосети и потребителя тепловой энергии.

Прежде чем планировать и осуществлять цифровизацию системы теплоснабжения как хозяйствующего субъекта, так и муниципального образования, содержащих указанные компоненты, необходимо изменить существующие подходы в организации и реализации бизнес-процессов в данной сфере, а также выполнить инфраструктурные и организационно-технические преобразования по всей цепочке технологического процесса «генерация - транспорт - потребление тепловой энергии».

Интегративный подход в любой сфере деятельности, в том числе, и при проведении научного исследования, по общему мнению, является одним из наиболее перспективных и продуктивных. Следовательно, использование такого подхода в решении задач всеобъемлющей трансформации в сфере теплоснабжения, а не только фрагментарных, описанных в данной статье, позволит достичь не только прямого результата, но и обеспечит синергетический эффект. Такой подход следует позиционировать как новый в решении проблемы построения своего рода Умной системы централизованного теплоснабжения – Умной СЦТС, что предопределяет потребность в проведении последующих теоретических и практических исследований в этой предметной области автора с использованием адекватных инструментов системного подхода с привлечением широкого круга ученых и практиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированные системы диспетчерского управления. Режим доступа: <https://politer.info/solutions/asdu/> (дата обращения 12.01.2019).
2. ЖКХ на пороге цифровой трансформации. Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/teploenergetika/35/3829884.htm> (дата обращения 09.01.2019).
3. Красильникова К.В., Соловьев В.И. Модели интеграции информационных ресурсов региональной системы жилищно-коммунального хозяйства // Инновации в жизнь. 2016. № 1 (16). С. 69–80.
4. Пасичко С.И., Халецкая Е.А, Колиенко А.Г. Системы теплоснабжения. Выбор оптимальных направлений развития // Новости теплоснабжения. № 24.08. 2002.
5. Распоряжение Правительства РФ №1632-р от 28.07.2017. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: <http://base.garant.ru/71734878/> (дата обращения 05.01.2019).
6. Сердюков О.В. Программно-технический комплекс «Торнадо-N» для объектов теплоэнергетики // Новое в российской электроэнергетике. 2011. № 9 сентябрь. С. 24–30.
7. Состояние сетей и системы теплоснабжения. Режим доступа: <http://nsk.novosibdom.ru/node/2860> (дата обращения 15.01.2019). 5
8. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/> (дата обращения 05.01.2019).
9. Централизованное теплоснабжение как повод для беспокойства. Режим доступа: <http://academcity.org/content/centralizovannoe-teplosnabzhenie-kak-povod-dlya-besпоkoystva> (дата обращения: 10.01.2019).
10. Цифровые организации: тенденции и практики применения в России. Режим доступа: <http://www.riarating.ru/infografika/20160127/630007042.html> (дата обращения 08.01.2019).
11. Чурашев В.Н., Маркова В.М. Оценка потенциала теплосбережения: региональные особенности и возможности ТЭБ // Труды IX Международной научной конференции «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» в 4 томах. Новосибирск. Сибирская государственная геодезическая академия . 2013. Т.1. С. 114–119
12. Якимчук Я.Ю., Мартемьянов В.С., Аверьяскин С.Г., Соловьев В.И. Электронное правительство и государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства региона // Инновации в жизнь. 2014. № 1 (8). С. 56–67.

IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF SELECTION AND ADAPTATION OF STAFF WITH IT TOOLS

Vasily I. Solovjev

PhD., associate Professor, Professor, Department of business Informatics,

e-mail: solvi2@bk.ru

Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Novosibirsk state University of Economics and management NINH", 630099, Novosibirsk, St. Kamenskaya 56

Abstract. The analysis and assessment of a condition of infrastructure of a system of heat supply of the municipal unit on the example of Novosibirsk and in general across Russia is presented in article. Comparative characteristic of specific losses of heat on key elements of technological process of a chain is given: "generation – transport – consumption of thermal energy" possibilities (potentials) and zones of economy of thermal energy are also shown.

The technologies of the first steps of fragmentary digitalization of technological process of a chain existing in the Russian and regional practice are described: "generation – transport – consumption of thermal energy". The approach in the solution of a problem of creation of a uniform complex of automated management of a system of the centralized heat supply, for example, on the basis of the uniform digital platform based on integration of the digital products pro-showing earlier the practical importance in digitalization of separate components of systems of heat supply is offered.

Keywords: system of heat supply, digitalization, digital transformation, generation, transport, consumption, heatsaving potential, integration, municipal unit.

References

1. Avtomatizirovanny'e sistemy' dispetcherskogo upravleniya [Automated dispatch control systems]. Available at: <https://politer.info/solutions/asdu/> (accessed 12.01.2019). (in Russian)
2. ZhKX na poroge cifrovoj transformacii [Housing on the verge of digital transformation]. Available at: <https://www.eprussia.ru/teploenergetika/35/3829884.htm> (accessed 09.01.2019). (in Russian)
3. Krasil'nikova K.V., Solov'ev V.I. Modeli integracii informacionny'x resursov regional'noj sistemy' zhilishhno-kommunal'nogo xozyajstva [Models of integration of information resources of the regional system of housing and communal services] // Innovacii v zhizn' = Innovations in life. 2016. No 1 (16). Pp. 69–80. (in Russian)
4. Pasichko S.I., Xaleczkaya E.A., Kolienko A.G. Sistemy' teplosnabzheniya. Vy'bor optimal'ny'x napravlenij razvitiya [Heating systems. Selection of optimal development directions] // Novosti teplosnabzheniya = Heat News. No 24.08. 2002. (in Russian)

5. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF №1632-r ot 28.07.2017. Ob utverzhdenii programmy` «Cifrovaya e`konomika Rossijskoj Federacii» [Order of the Government of the Russian Federation No. 1632-p dated July 28, 2017. On approval of the program "Digital Economy of the Russian Federation"]. Available at: <http://base.garant.ru/71734878/> (accessed 05.01.2019). (in Russian)
6. Serdyukov O.V. Programmno-texnicheskij kompleks «Tornado-N» dlya ob`ektov teploe`nergetiki [Software and hardware complex "Tornado-N" for heat and power facilities] // Novoe v rossijskoj e`lektroe`nergetike = New in the Russian electric power industry . 2011. No 9 september. Pp. 24–30. (in Russian)
7. Sostoyanie setej i sistemy` teplosnabzheniya [The state of networks and heating systems]. Available at: <http://nsk.novosibdom.ru/node/2860> (accessed 15.01.2019). (in Russian)
8. Ukaz Prezidenta RF ot 09.05.2017 № 203 «O Strategii razvitiya informacionnogo obshhestva v Rossijskoj Federacii na 2017-2030 gody`» [Presidential Decree of 09.05.2017 No. 203 "On the Strategy for the development of the information society in the Russian Federation for 2017-2030"]. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/> (accessed 15.01.2019). (in Russian)
9. Centralizovannoe teplosnabzhenie kak povod dlya bespokojstva [District heating as a cause for concern.]. Available at: <http://academcity.org/content/centralizovannoe-teplosnabzhenie-kak-povod-dlya-bespokojstva> (accessed 15.01.2019). (in Russian)
10. Cifrovye organizacii: tendencii i praktiki primeneniya v Rossii [Digital organizations: trends and application practices in Russia]. Available at: <http://www.riarating.ru/infografika/20160127/630007042.html> (accessed 08.01.2019). (in Russian)
11. Churashev V.N., Markova V.M. Ocenka potenciala teplosberezheniya: regional`ny`e osobennosti i vozmozhnosti TE`B [Evaluation of heat saving potential: regional features and capabilities TEB] // Trudy IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Ekonomicheskoye razvitiye Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodopol'zovaniya, zemleustroystvo, lesoustroystvo, upravleniye nedvizhimost'yu» v 4 tomakh. = Proceedings of the IX International Scientific Conference "The economic development of Siberia and the Far East. Environmental economics, land management, forest management, real estate management "in 4 volumes. Novosibirsk. Sibirskaya gosudarstvennaya geodezicheskaya akademiya= Siberian State Academy of Geodesy. 2013. T. 1. Pp. 114–119. (in Russian)
12. Yakimchuk Ya.Yu., Martem`yanov V.S., Aver`yaskin S.G., Solov`ev V.I. E`lektronnoe pravitel'stvo i gosudarstvennaya informacionnaya sistema zhilishhno-kommunal`nogo xoz'yajstva regiona [E-government and state information system of housing and communal services of the region] // Innovacii v zhizn` = Innovations in life. 2014. No 1 (8). Pp. 56–67.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТИВОРЕЧИЙ В ПРОДУКЦИОННОЙ БАЗЕ ЗНАНИЙ СРЕДСТВАМИ V^{TF} -ЛОГИК

Аршинский Леонид Вадимович

Д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Информационные системы и защита информации»,
e-mail: larsh@mail.ru

Нитежук Марина Сергеевна

Аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации»,
e-mail: marino_@yandex.ru

Шлаустас Ромас Юргевич

К.ф.-м.н., доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»,
e-mail: shlaustas@gmail.com

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074 г. Иркутск, ул. Чернышевского 15,

Аннотация. Работа посвящена обсуждению вопроса выявления противоречий в продукционных базах знаний (БЗ) на основе аппарата логик с векторной семантикой. Дается краткое освещение проблемы верификации знаний. Отмечается, что важной проблемой верификации является обнаружение внутренних противоречий, когда те или иные цепочки вывода порождают противоречивые заключения. Показано, что аппарат логик с векторной семантикой, в силу естественной способности работать с противоречивыми данными и знаниями, может помочь автоматизировать процедуру выявления внутренних противоречий в таких БЗ.

Ключевые слова: продукционная модель знаний, внутренние противоречия, выявление противоречий, логики с векторной семантикой.

Цитирование: Аршинский Л.В., Нитежук М.С., Шлаустас Р.Ю. Обнаружение противоречий в продукционной базе знаний средствами V^{TF} -логик // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 62–68. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-06

Введение. К основным сложностям, с которыми сталкиваются разработчики баз знаний (БЗ), относятся: противоречивость, неполнота, избыточность, наличие нигде не используемых терминов [11]. Это порождает такие проблемы, как невозможность получить достоверные заключения, наличие не определенных понятий и терминов, невозможность вывода в определенных ситуациях, присутствие не используемых фактов, правил, терминов, наличие понятий, совпадающих по смыслу с введенными ранее и т.д. В связи с этим важным этапом разработки БЗ является процесс верификации – доказательства того, что она не содержит перечисленных ошибок. Важнейшей частью верификации является проверка БЗ на непротиворечивость. Этот тип ошибки способен привести к проблемам логического вывода, а значит – к невозможности использования БЗ в качестве модели предметной области

Данный материал посвящен вопросам обнаружения противоречий в продукционных базах знаний. В силу простоты, модульности и гибкости продукционная модель – одна из самых распространенных в системах искусственного интеллекта. Основанные на продукциях

БЗ могут легко модифицироваться: расширяться, сужаться, редактироваться. Логический вывод на таких знаниях также достаточно прост и эффективен. Вместе с тем, простота изменения единиц знаний оборачивается необходимостью контролировать их совместную непротиворечивость, что не всегда легко. Это связано как с размерами реальных БЗ (сотни и тысячи правил), так и с отсутствием в ряде логик (в первую очередь – в классической) механизмов работы с противоречиями.

В статье обсуждаются вопросы автоматизации обнаружения противоречий в продукционных знаниях. В качестве основы алгоритмов обнаружения выступает аппарат логик с векторной семантикой из класса V^{TF} . Данные логики предназначены для работы с предметными областями, отличающимися высокой степенью неопределенности и противоречивости. Их достоинством является способность сохранять работоспособность при работе с такими знаниями. Это позволяет верифицировать БЗ в ходе специальным образом организованного логического вывода.

Проблема обнаружения противоречий. В работе [8] освещены проблемы верификации и обнаружения противоречий в БЗ интеллектуальных систем. В частности отмечается, что формирование БЗ сопряжено с обработкой различных источников, а результаты формализуются на основе моделей знаний (одной либо нескольких), среди которых основные: логическая, продукционная, сетевая и фреймовая [5] (остальные могут быть сведены к основным). В настоящее время дополнительно выделяют также знания, представленные с помощью искусственных нейронных сетей [12]. Однако подобные знания неявны, спрятаны в архитектуре и особенностях функционирования сети, а потому упор по-прежнему делается на первые четыре модели.

С точки зрения моделирования предметных областей, БЗ – это особый тип моделей. По сравнению с классическим математическим моделированием, при котором с нужной степенью точности отражены особенности существования самой предметной области (модели первого типа на рис. 1) [4], БЗ – это, как правило, двойное отражение: отражение того, как предметная область отражается внутренним миром эксперта (модели второго типа на рис. 1) [4]. Более того, на него дополнительно накладываются особенности восприятия этого отражения инженером знаний. То есть, БЗ – это весьма субъективная конструкция и объективность в ней зависит от квалификации эксперта и качества работы инженера знаний.

Справедливости ради заметим, что источником знаний могут выступать также специальным образом обработанные большие данные, хранящие результаты лабораторных испытаний, различных бизнес-процессов и т.п. Это повышает объективность знаниевых моделей, однако проблемы верификации не снимает.

Именно большая субъективность знаниевых моделей, как представляется, порождает такие особенности, как возможная недостоверность, неопределенность, нечеткость, неполнота и недоопределенность знаний. Например, в [7] отмечается, что в ходе общения инженера знаний с экспертами теряется до 76% информации, а в [14] приводятся сведения о том, что при внесении информации в БЗ доля ошибок составляет в среднем 15%. Все это порождает проблему качества БЗ.

В связи с этим важным этапом разработки БЗ является процесс верификации – доказательства того, что она не содержит перечисленных ошибок [16, 10]. Важнейшей частью верификации при этом является проверка БЗ на непротиворечивость. Этот тип

ошибки способен привести к проблемам логического вывода, а значит – к невозможности использования БЗ в качестве модели предметной области.

Противоречия в продукционных БЗ. Вопрос поиска и ликвидации противоречий в продукционных БЗ рассматривался различными авторами. В [8] отмечается, что интерес к этому обусловлен не только относительной простотой и распространенностью продукционной модели, но и тем, что, как показал Э. Пост, данная модель эквивалентна машине Тьюринга [15]. Иначе говоря, продукционная модель есть одна из форм универсальной алгоритмической модели и любая оперирующая символами формальная система может быть реализована с помощью продукций «Если ..., то ...» [6].

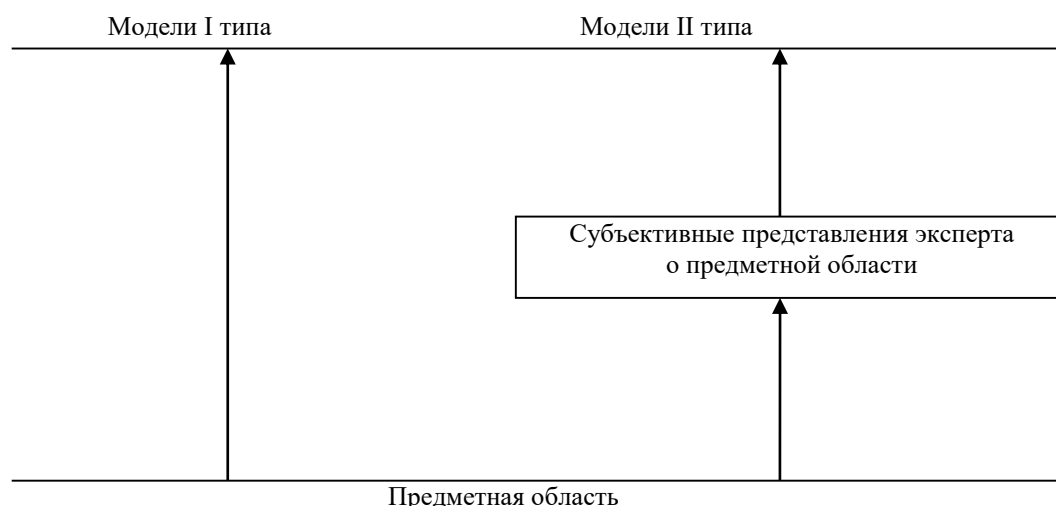


Рис. 1. Классическое математическое моделирование и моделирование на основе знаний

Противоречия в системах продукций могут быть следующими [9]:

- 1) наличие внутренне противоречивых правил, когда элементы продукций взаимно исключают друг друга, например, $a \rightarrow \neg a$;
- 2) наличие противоречий между двумя правилами, что при рассуждениях приводит к взаимоисключающим выводам, например, a и $\neg a$;
- 3) наличие внутренне противоречивых цепочек рассуждений, которые добавляют в систему факты, противоречащие исходным или ранее полученным;
- 4) противоречия в цепочках вывода, когда одни и те же исходные данные порождают взаимоисключающие утверждения.

Дополнительная сложность заключается в том, что суждение a в ситуациях a и $\neg a$ может внешне выглядеть по-разному [1, 10].

Источником противоречий могут выступать содержательные связи между фактами, а в некоторых предметных областях противоречивость может быть обусловлена несовместимостью взглядов на предметную область. Причём несовместимость эта проявляется не сразу, а с введением в систему каких-то новых фактов [6].

В связи с многообразием возможных ситуаций, в которых проявляется противоречивость, и сложностью ее обнаружения, в [6] говорится, что претендующая на доверие ЭС не должна содержать как минимум «внутренних» противоречий. Выявление и устранение внутренних противоречий следует считать первостепенной задачей верификации

знаний. Причем внутренние противоречия определяются текущим состоянием БЗ и могут быть выявлены формальными средствами.

В связи с вышесказанным важное значение приобретает проблема разработки формальных методов обнаружения противоречий в продукционных БЗ с целью их последующей реализации в соответствующих автоматизированных системах.

Обнаружение противоречий средствами V^{TF} -логик. V^{TF} -логики – класс логик с векторной семантикой, в которых вектор истинности произвольного суждения a имеет два компонента: $\langle \text{Истина}; \text{Ложь} \rangle$ [2]. Каждый компонент принимает значения из отрезка $[0, 1]$. При этом значение первого компонента определяются свидетельствами подтверждающими, а второго – опровергающими a . Вывод, использующий такую модель истинности, является присоединенным правдоподобным выводом. Его особенностью служит наличие процедуры объединения свидетельств, что необходимо, когда одно и то же заключение, например b , получено по разным цепочкам рассуждений. К примеру:

$$\begin{aligned} a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\|_1 &= \langle b^+_1; b^-_1 \rangle \\ a', a' \rightarrow b \vdash b: \|b\|_2 &= \langle b^+_2; b^-_2 \rangle. \end{aligned}$$

Здесь через двоеточие указана истинность заключения $\|b\|$. Результирующее значение истинности вычисляется как $\|b\| = \langle U^+(b^+_1; b^+_2); U^-(b^-_1; b^-_2) \rangle$. Функции $U^+(b^+_1; b^+_2)$ и $U^-(b^-_1; b^-_2)$ могут иметь разный вид [3], но наиболее подходящим для наших целей является:

$$\|b\| = \langle b^+_1 \oplus b^+_2; b^-_1 \oplus b^-_2 \rangle. \quad (1)$$

Здесь $\oplus$ – триангулированная (треугольная) ко-норма (в инфиксной записи) с дополнительным свойством:

$$(1 - x) \oplus (1 - y) = 1 - x \bullet y, \text{ где } x, y \in [0, 1].$$

Символ « $\bullet$ » обозначает соответствующую выбранной ко-норме треугольную норму (также в инфиксной записи). Примерами могут выступать известные функции $x \oplus y = \max(x, y)$, а так же $x \oplus y = x - y + xy$. Им соответствуют $x \bullet y = \min(x, y)$ и $x \bullet y = xy$.

Объединение свидетельств по формуле (1) хорошо тем, что противоречивость заключения b сразу отразится в ходе вывода вектором истинности $\|b\| = \langle b^+; b^- \rangle$, у которого $b^+, b^- > 0$. Например, если $\|b\| = \|b\|_1 = \langle 1, 0 \rangle$ и $\|b\| = \|b\|_2 = \langle 0, 1 \rangle$, то объединение согласно (1) даст итоговый вектор $\|b\| = \langle 1, 1 \rangle$ – полное противоречие.

Если суждение b – терминальное (гипотеза), то, возвращаясь по цепочке вывода назад, можно просмотреть все продукции, участвовавшие в выводе, и установить этап, на котором возникло противоречие. Также устанавливаются истинностные значения породивших его фактов.

Следует отметить, что, если противоречие появляется на промежуточном этапе вывода, оно продлится до терминального утверждения-гипотезы согласно первой форме содержательного *modus ponens* для логик с векторной семантикой [13]:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle.$$

Здесь i^+ и i^- – компоненты вектора истинности импликации $\|a \rightarrow b\| = \langle i^+; i^- \rangle$. В результате, контроль противоречивости того или иного заключения, а в целом и соответствующей БЗ, с использованием аппарата логик с векторной семантикой, состоит в выявлении противоречивых заключений-гипотез и восстановлении хода вывода от гипотезы к фактам.

Причем эта задача поддается автоматизации в силу естественной способности V^{TF} -логик обрабатывать противоречивые знания и данные.

Заключение. Поиск внутренних противоречий в БЗ продукционных систем – это в первую очередь обнаружение возможности противоречий в заключениях, полученных из системы продукций. Классические методы рассуждений не приспособлены для работы с противоречиями, что делает нетривиальной задачу их выявления в БЗ. Представляется, что предлагаемый в работе переход к аппарату логик с векторной семантикой поможет автоматизировать решение этой проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аршинский В.Л., Проскуряков Д.П. Применение онтологий и рассуждения по прецедентам для обработки контекста в событийном моделировании в исследованиях энергетики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 94–100.
2. Аршинский Л.В. Методы обработки нестрогих высказываний. Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России. 1998. 40 с.
3. Аршинский Л.В. Особенности работы машины вывода системы моделирования правдоподобных рассуждений «Гераклит» // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №2. С. 18–29.
4. Аршинский Л.В. Теоретические основы искусственного интеллекта: учебное пособие. Иркутск: ИрГУПС. 2016. 142 с.
5. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер. 2000. 384 с.
6. Долинина О.Н. Классификация ошибок в базах знаний экспертных систем // Вестник СГТУ. 2010. № 4 (50). Вып. 2. С. 125–130.
7. Макаренко С.И. Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие. Ставрополь: СФ МГТУ им М.А. Шолохова. 2009. 206 с.
8. Нитежук М.С. Верификация и поиск противоречий в базах знаний интеллектуальных систем // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2018. №2. Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/22-2018> (дата обращения: 27.03.2019)
9. Поспелова Л.Я., Чуканова О.В. Поиск противоречий в продукционных базах знаний. Режим доступа: <http://www.vmest.ru/nuda/poisk-protivorechij-v-produkcionnih-bazah-znanij/main.html> (дата обращения 25.04.2019)
10. Проскуряков Д.П. Управление разрешением конфликтов в продукционных экспертных системах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. С. 47–51.
11. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных информационных систем: учеб. пособ. М.: Финансы и статистика. ИНФРА-М. 2010. 432 с.
12. Советов Б.Я., Цехановский В.В., Чертовский В.Д. Интеллектуальные системы и технологии: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия». 2013. 320 с.
13. Arshinskii L.V. Substantial and formal deductions in logics with vector semantics // Automation and remote control. 2007. Vol. 68. No 1. Pp. 139–148.

14. Marcot B. Testing your knowledge base // AI Expert. August. 1987. Pp. 43–47.
 15. Post E.L. Formal Reductions of the General Combination Decision Problem // American Journal of Mathematics. 1943. V. 65. Pp. 197–215.
 16. Preece A.D., Shinghal R., Batarekh A. Verifying expert systems: a logical framework and a practical tool // Expert systems with applications. 1992. Vol. 5. Pp. 421–436.
-

UDK 004.825

**DETECTION OF CONTRADICTIONS IN PRODUCTION KNOWLEDGE BASE
BY MEANS OF V^{TF} -LOGIC**

Leonid V. Arshinskiy

Dr., Head of Department of Information Systems and Information Security,

e-mail: larsh@mail.ru

Marina S. Nitezhuk

PhD student of Department of Information Systems and Information Security,

e-mail: marino_@yandex.ru

Romas Yu. Shlaustas

PhD., Associate Professor of Department of Information Systems and Information Security,

e-mail: shlaustas@gmail.com

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskiy Str., 664074, Irkutsk, Russia

Abstract. The work is devoted to the discussion of the issue of identifying contradictions in the production knowledge bases (KB) based on the apparatus of logic with vector semantics. A brief coverage of the problem of knowledge verification is made. It is noted that the important issue of verification is the detection of internal contradiction, when some chain of inference give rise to contradictory conclusions. It is shown that the apparatus of logic with vector semantics, due to the natural ability to work with conflicting data and knowledge, can help automate the procedure for identifying internal contradictions in such KB.

Keywords: production model of knowledge, internal contradictions, identification of contradictions, logic with vector semantics.

References

1. Arshinskiy V.L., Proskuryakov D.P. Primeneniye ontologiy i rassuzhdeniya po pretsedentam dlya obrabotki konteksta v sobyitiynom modelirovanii v issledovaniyakh energetiki [Application of ontologies and precedent reasoning for context processing in event modeling in energy research] // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No 4 (52). Pp. 94–100. (in Russian)
2. Arshinskiy L.V. Metody obrabotki nestrogikh vyskazyvaniy [Methods of processing of non-strict proposition]. Irkutsk: East-Siberian Institute of MIA of Russia. 1998. 40 p. (in Russian)
3. Arshinskiy L.V. Osobennosti raboty mashiny vyvoda sistemy modelirovaniya pravdopodobnykh rassuzhdeniy «Geraklit» [Features of the work of logical inference machine of system plausible reasoning «Heraclitus»] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii

- v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2016. No 2. Pp.18–29. (in Russian)
4. Arshinskiy L.V. Teoreticheskiye osnovy iskusstvennogo intellekta: uchebnoye posobiye [Theoretical foundations of artificial intelligence: textbook]. Irkutsk: IrGUPS. 2016. 142 p. (in Russian)
 5. Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. Bazy znaniy intellektualnykh system [Knowledge Bases of the Intelligent Systems]. St. Petersburg. Piter. 2000. 384 p. (in Russian)
 6. Dolinina O.N. Klassifikatsiya oshibok v bazah znaniy ehkspertnykh sistem [Classification of errors in knowledge bases of expert systems] // Vestnik SGTU = Vestnik Saratov State Technical University. 2010. No 4 (50). issue 2. Pp. 125–130. (in Russian)
 7. Makarenko S.I. Intellektualnyye informatsionnyye sistemy: ucheb. posobiye. [Intelligent information systems: textbook]. Stavropol: SF MGTU im M.A. Sholokhova. 2009. 206 p. (in Russian)
 8. Nitezhuk M.S. Verifikatsiya i poisk protivorechij v bazah znaniy intellektual'nykh sistem [Verification and search of contradictions in knowledge bases of the intelligent systems] // Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal = Young science of Siberia: electronic scientific journal. 2018. No 1. (in Russian)
 9. Pospelova L.Ya., Chukanova O.V. Poisk protivorechij v produktsionnykh bazakh zna-niy [The search for contradictions in the rule-based knowledge bases]. Available at: <http://www.vmest.ru/nuda/poisk-protivorechij-v-produkcionnih-bazah-znaniy/main.html>. (accessed 25.05.2019) (in Russian)
 10. Proskuryakov D.P. Upravleniye razresheniyem konfliktov v produktsionnykh ekspertnykh sistemakh [Managing conflict resolution in rule-based expert systems] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015. No 8. Pp. 47–51. (in Russian)
 11. Rybina G.V. Osnovy postroyeniya intellektualnykh informatsionnykh sistem: ucheb. posob. [Fundamentals of building intelligent information systems: textbook] Moscow. Finansy i statistika = Publishing Finance and Statistics. INFRA-M. 2010. 432 p. (in Russian)
 12. Sovetov B.Ya., Tsekhanovskiy V.V., Chertovskiy V.D. Intellektualnyye sistemy i tekhnologii: uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy vysh. prof. obrazovaniya [Intelligent Systems: textbook for students of high professional schools]. Moscow. Izdatelskiy tsentr «Akademiya» = Publishing Center "Academy". 2013. 320 p. (in Russian)
 13. Arshinskii L.V. Substantial and formal deductions in logics with vector semantics // Automation and remote control. 2007. Vol. 68. No 1. Pp. 139–148.
 14. Marcot B. Testing your knowledge base // AI Expert. August. 1987. Pp. 43–47.
 15. Post E.L. Formal Reductions of the General Combination Decision Problem // American Journal of Mathematics. 1943. V. 65. Pp. 197–215.
 16. Preece A.D., Shinghal R., Batarekh A. Verifying expert systems: a logical framework and a practical tool // Expert systems with applications. 1992. Vol. 5. Pp. 421–436.

УДК:51.7:511.48:004.9

ИННОВАЦИОННАЯ МАТЕМАТИКА: ПОИСК ОСНОВАНИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОСТИ

Черкашин Александр Константинович

Д.г.н., профессор, главный научный сотрудник, зав. лабораторией теоретической географии,

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, e-mail: akcherk@irmok.net

Аннотация. Обсуждается проблема использования математических знаний для моделирования реальных процессов и явлений через сравнение особенностей числовых систем с закономерностями строения и развития систем наблюдаемого мира. Определяются основания и ограничения моделирования в процедурах формализации концептуальных построений и содержательной интерпретации математических формул. Познавательная процедура перехода от абстрактного к конкретному знанию описывается как метатеоретическое преобразование знаний, связанное с появлением нового качества числовых систем, новых информационных слоев на старых базах числовых точечных множеств. Показано, что описание новых конкретных ситуаций требует более сложных и абстрактных математических построений.

Ключевые слова: инновационное математическое знание, сравнение реальных явлений с числовыми множествами, монады и эпимонады скрытого знания, развитие систем по схеме строения гипердействительных чисел.

Цитирование: Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 69–87. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-07

Введение. По характеру решаемых задач разработка и использование математических технологий близка к проблематике создания инновационной математики. Инновационное в математике понимается разным способом как результат творческого процесса по получению нового математического знания (формулировки аксиом, доказательства теорем), но в основном в прикладном плане в связи с использованием возможностей математики при моделировании, проектировании, в организации и совершенствовании образования. С этой стороны интересна деятельность European Consortium for Mathematics in Industry, обеспечивающей подготовку кадров, создание исследовательских групп и новых способов продуктивных контактов между представителями промышленности и прикладной математики из академического сообщества [28]. Важнейшей задачей является обработка больших массивов данных с использованием математических, численных и статистических методов анализа и моделирования, современных программных средств. Проводятся тематические конференции и издается *Journal of Mathematics in Industry*, представляющий результаты исследований по индустриальной математике – совокупности методов математического моделирования и вычислительных технологий нового поколения, применяемых в инженерной практике и в экономике.

Исследования, связанные с индустриальной и инновационной математикой, развиваются во всем мире, в том числе в российских академических институтах и ВУЗах, где издаются соответствующие журналы. В Иркутском госуниверситете сформирован образовательный профиль «Инновационная математика и компьютерные науки». Основное внимание уделяется разработке и обучению методам математического моделирования, преобразованию исходной информации и проведению вычислительных экспериментов. Это в основном задачи прикладной математики, предполагающей создание формальных моделей и их разностороннего анализа математическими средствами, т.е. реализация перехода от содержательной проблемы к ее математическому решению. Вместе с тем на этом пути постоянно возникают проблемы теоретического обоснования методов моделирования, правильности выбора формальной модели для решения поставленной задачи, т.е. проблемы перехода от абстрактного математического знания к конкретным моделям и решениям на их основе.

В статье рассматриваются три уровня организации сложных систем (комплексов), однозначно соответствующих множествам целых, действительных (ДЧ) и гипердействительных чисел (ГДЧ). Общими для всех уровней являются индукция и дедукция линейного порядка разной сложности в реальных комплексах. На уровне целых чисел порядок проявляется в дискретной организации пространства и времени, идентификации, типологии и классификации систем и индексации их моделей. Сравнение с действительными числами выделяет в комплексах свойства непрерывных, индуктивных, гомотопических, ограниченных и измеримых систем. Эти особенности сохраняются и в системах, подобных ГДЧ, но на этом третьем уровне просматриваются новые качества, связанные с нестандартной частью ГДЧ – монадами и эпимонадами потенциалов изменчивости (непересекающихся слоев расслоения ГДЧ на базе ДЧ). Элементы содержательной монадологии проявляются разным способом в различных науках: философии, истории, биологии, географии. Это особое направление связано с исследованием реакций на влияние бесконечно малых величин (нестандартный анализ, инфинитезимальные преобразования), проявлением неявленных сущностей (онтологий). Эпимонады находятся в синкретическом состоянии с сочетанием разнородных начал в одной нерасчлененной системе. Членение инфинитезимальей по принципам гомотопического положения в итоге должно порождать различные модели действительности. Нестандартные элементы наделены фундаментальными свойствами: разрывные, неопределенные, случайные, хаотические, эфирные, сингулярные, тривиальные, критические и т.д. Развитие реальных систем идет по схеме перехода от замкнутых нестандартных элементов (монад) формального тождества к тождеству противоположностей открытых дискретных пространств.

1. Основные понятия. Философский метод восхождения от абстрактного к конкретному вначале предполагает поиск главных системных связей изучаемого объекта, а затем выявление того, как эти связи видоизменяются в различных условиях, когда открываются новые отношения, и таким путём отображается сущность изучаемого объекта [7]. Метод предполагает движение от абстрактных теоретических знаний к системе конкретных знаний через обобщающий синтез знаний логическим путём. Создание абстрактной теории избавляет от необходимости изучения каждой индивидуальной ситуации, но требует наличия правил применения ее чистых знаний к особенностям индивидуального случая. Эта проблема близка к задачам историко-географического синтеза,

когда приходится использовать данные и знания из различных источников для объяснения особенностей местоположения и события. Однако этот метод восхождения не тождественен аксиоматическому методу дедукции знаний из базовых понятий и законов по нисходящей линии дедуктивного вывода (рис. 1). Задача метода восхождения напротив состоит в выявлении обобщенных метасистемных связей, в соответствии с которыми в чистом виде выводятся сами исходные понятия и утверждения, и как они преобразуются в определённых условиях при конкретизации знания.

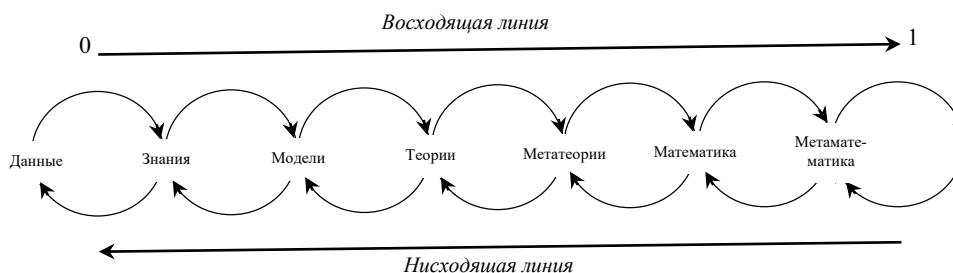


Рис. 1. Схема связи метауровней научной информации по восходящей линии индуктивного синтеза знаний (от конкретного к абстрактному) и нисходящей линии дедуктивного вывода - анализа

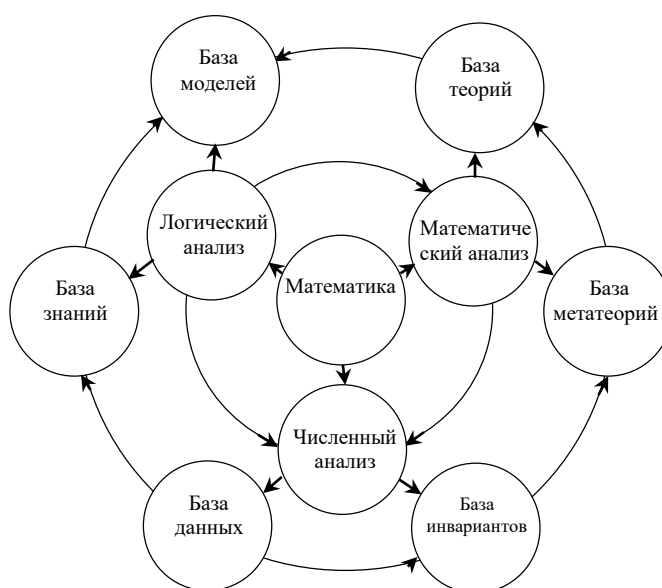


Рис. 2. Концептуальная схема связи метауровней научной информации вокруг математического знания, организованная процедурами математического, статистического и логического анализа

Смысл метода восхождения состоит в метасистемном переходе на новый метатеоретический уровень организации научной информации. Сходным образом происходит индуктивное восхождение от первичных конкретных данных к абстрактному чистому знанию в процессе математического моделирования и построения теорий – формализации знаний. Аксиоматический метод реализует обратный нисходящий переход от теории к практике. В итоге проявляется разноуровневый и разнонаправленный инновационный процесс движения мысли (рис. 1) с иерархической структурой, в котором на различных уровнях повторяются идеи конкретной и абстрактной организации знания. Восхождение от абстрактного теоретического к конкретному метатеоретическому знанию –

переходный процесс второго уровня. Переход третьего уровня приводит к абстракциям математики и далее на следующем уровне конкретизации - к конкретным формальным правилам использования математических результатов. Дедуктивное движение в обратном направлении с выводом новых объяснительных знаний определяется процедурами инновационной математики во всех формах ее проявления, включая учет естественных ограничений.

На рис. 2 показаны инновационные связи математического знания с информационными уровнями научной информации, опосредованные математическими методами и вычислительными алгоритмами анализа [22]. В этой коммутативной диаграмме объединяются знания и умения в формальную онтологию вывода новых утверждений. Оборачивание стрелок в диаграмме моделирует процесс индуктивного восхождения от частного к общему через типологию, идеализацию и формализацию информации.

Основная идея «восхождения» в приложении к математике состоит в том, что описание более конкретных ситуаций требует все более сложных обобщающих глубоко формализованных и абстрактных математических структур. С другой стороны, не всякое выводимое в математике знание истинно в смысле объективного существования и проявления формализованных связей, и для конкретизации знания по нисходящей линии требуется на каждом уровне вводить определенные ограничения.

Соответственно верен философский постулат, что абстрактной истины нет и что истина всегда конкретна. Конкретное – это результат теоретического рассмотрения предмета, а не его исходный эмпирический пункт. Двигаться от абстрактного к конкретному - это значит двигаться от понимания простого к пониманию сложного, т.е. целостности его многочисленных разнокачественных частей [8]. К. Маркс [17, с. 214] оригинально определяет конкретное, конкретность как «единство многообразного» в форме единства разнообразных определений, связанных в систему категорий и отражающих разные стороны исследуемого объекта во всестороннем знании о нем. Такое понимание близко к математическим формам теории расслоения на многообразиях, широко используемой при разработке теоретических положений физической науки [3, 20]. При этом через расслоение происходит удвоение координатного пространства исследования, в котором исходно пересекающиеся слои становятся независимыми и функционально связанными как противоположности.

Сформировавшаяся метасистема и есть единство многообразия слоев. Этот пример показывает, что математическое знание развивается параллельно философскому и специальному знанию. Математика в этой ситуации по-новому объясняет логические причины появления противоположностей, их единства и тождества, дает для них формальное выражение знаний. Но главное здесь не само знание, а методы получения новых знаний. Инновационная математика порождает новые фундаментальные знания путем введения естественных ограничений на действие ее формул. Это позволяет формировать новые модели, методы и алгоритмы для математических и информационных технологий [23].

1.1. Расслоенные множества. При исследовании реальности сложные объекты, процессы и явления постоянно приходится сравнивать с элементами числовых множеств и систем, ограничения абстрактных свойств которых дает конкретные знания о действительности. Числовые множества (системы) - это множества натуральных (N), целых (Z), рациональных (Q), вещественных действительных (R), комплексных (C) и других видов

чисел вместе с определёнными над соответствующими множествами алгебраическими операциями и часто с заданными на множестве отношениями линейного порядка [14,19]. В числовых системах предполагается также наличие определенного способа символической записи чисел и системы счисления, например, двоичного или десятичного кода, десятичных дробей.

Простейшая числовая система - множество натуральных чисел $N = (1,2,3...)$, применяемых в процессе порядкового счета, сложения-вычитания и умножения-деления нацело. На множестве N разрешимы уравнения связи чисел вида $a+x=b$ и $a \cdot x=b$ с неизвестным значением $x \in N$, величина которого определяется по a и b . В общем случае решения этих уравнений находятся соответственно на множествах целых и рациональных чисел. Таким образом, расширение числовых множеств связано с разрешимостью алгебраических уравнений, а ограничения операций с этими уравнениями приводят к сужению множеств и возможностей счета.

Геометрически числовая система представляется в виде числовой прямой или числовых осей. Элементы множеств N, Z, Q, R однозначно ложатся на числовую прямую, образуя линейный порядок $x > y$. Линейное представление позволяет рассматривать более полные множества как результат развертки или удвоения, выраженные через прямое произведение $N \times N \rightarrow Z, Z \times Z \rightarrow Q, R \times R \rightarrow C$. Например, полуось N путем поворота вокруг 0 формирует числовую ось Z , что формально означает: для всех $x, y \in N$ имеем $x - y = z \in Z$. Аналогично для всех $x, y \in Z$ и $y \neq 0$ получаем $x/y = z \in Q$, для всех $x, y \in R$ имеем $x + yi = z \in C$. Числовые множества обладают групповыми свойствами $Z \times Z \rightarrow Z$ перевода этого множества в себя прямыми и обратными операциями сложения и умножения с единицей группы соответственно 0 или 1.

Расслоение в математике - это отображение $\pi: X \rightarrow B$, обратное которому $\pi^{-1}: b \rightarrow X$ развертывает элементы $b \in B$ в X в виде слоев X_b . В расслоении участвуют множество расслоения $X = \{x\}$, множество базы расслоения $B = \{b\}$, проекция расслоения π . Обратная проекция $\pi^{-1}: B \rightarrow X$ превращает X в результат расслоения - расслоенное множество $Y = \{X_b\}$ (фактор-множество X/b), где $X_b \in X$ и $X_b \in Y$ - слой X_b над элементом базы $b \in B$ в X , и $Y = X_0 \times B$ (X_0 - типовой слой). Каждый слой X_b объединяет элементы множества X в класс эквивалентности по признаку b . Иными словами, расслоение множеств - это сортировка их элементов по заданным эталонам, например, типизация живых организмов по биологическим видам.

В частности, расслоением $\pi: Z \rightarrow B$ является разделение множества Z на классы вычетов Z_b - непересекающиеся подмножества целых чисел $a \in Z$, сравнимых с $b \in B, b \in Z_b$ по модулю m : $b \equiv a \pmod{m}$, т.е. $a = b + mt$, где m, t - целые числа, $m > 0$. Например, отображение π типа свертки (суммы цифр) числа 238 равно $\pi(238) = 2 + 3 + 8 = 13 = \pi(13) = 1 + 3 = 4$, т.е. $4 \equiv 238 \pmod{9}$ - число 238 сравнимо по модулю 9 с однозначным числом 4 (остаток деления 238 на 9). Здесь база расслоения $B = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, причем $(0 = 9 \pmod{9})$. Типовой слой $b = 0$ - множество чисел $X_0 = (\dots -9, 0, 9, 18, 27, 36, \dots, 9t, \dots)$. Множество X_0 , очевидно, равномощно множеству Z , как и все остальные слои X_b расслоения $\pi: Z \rightarrow B$. Произведение $Z = X_0 \times B$. Существенно, что в таких построениях элементы базы $b \in B$ одновременно являются элементами соответствующего слоя $b \in X_b \subset X$, т.е. через эти элементы базы, слоя и пространства расслоения соприкасаются. Это свойство постулирует важный теоретико-

множественный принцип – аксиому выбора: для произвольного множества попарно непересекающихся непустых множеств X_b существует по крайней мере одно множество B , которое содержит точно один элемент $b \in B$, общий с каждым из непустых множеств $b \in X_b$.

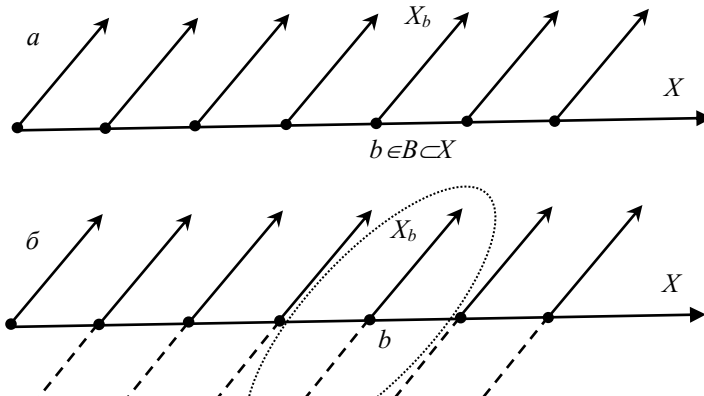


Рис. 3. Расслоенная структура числовых систем: a – односторонняя, b – двусторонняя

Другой важной формой расслоения $\pi: \mathbb{Z} \rightarrow B$ является разделение целых чисел на десятки, т.е. деление на 10 с остатком $x = z \bmod 10$ ($z \in \mathbb{Z}$, $x \in X_b$): $z = 10b + x$, где $b = z \operatorname{div} 10$, $b \in B$ – неполное частное от деления z на 10. В частности, $8 = 238 \bmod 10$, $23 = 238 \operatorname{div} 10$. Здесь база $B \equiv \mathbb{Z}$, а слой X_b состоит из чисел остатков $X_0 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, «приклеенных» к числу $10b$ в точке $x=0$ и продолжающих его до числа $10(b+1)$ исключительно: $10, 11, 12, \dots, 19$ ($b=1$). Таким образом формируется расслоенная односторонняя структура числовой системы X (рис. 3а), которая соответствует разбиению множества целых чисел на классы (десятки). Понятно, что с изменением b слой преобразуется в слой, в частности, в типичный слой: $X_b \rightarrow X_0$ при $b \rightarrow 0$. При этом сохраняется индивидуальное качество каждого слоя, определенное содержанием элемента $b \in B$.

Слой X_b соответствует стрелке, начинающейся с позиции $b = X \operatorname{div} 10$ и заканчивающейся в позиции $X = 10b + 9$ в проекции на числовую ось X . Слои X_b реально в виде стрелок и в проекции, не пересекаются. В двусторонней структуре (рис. 3б) слои продолжаются в противоположном направлении и в проекции занимают область $X_b = 10b \pm 9$, пересекаясь, хотя такие слои X_b рассматриваются всегда как пространственно независимые и могут в этом качестве распространяться неограниченно в обе стороны. Так вводится дополнительная координатная ось на плоскости $Y = X_0 \times B$. Однотипные элементарные числа из X_b заполняют пространство между десятками подобно тому, как мелкие деньги уточняют индивидуальную цену товара, выраженную приближенно крупными купюрами b . Мелочь используется в любом количестве по обе стороны уточнения ценности купюры: и на оплату (+) и на сдачу (-).

Так последовательно формируется десятичная система счисления по целочисленному основанию 10, в которой каждая цифра $b \in X_b$ соответствует определенному разряду 10^n порядка n , например, $238 = 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 8 \cdot 10^0$. В итоге расслоение $\mathbb{Z}$ также осуществляется по индексу позиции n цифры в целом числе. Таким образом, образуется своеобразная иерархическая классификация чисел, в которой каждый уровень соответствует порядку n цифр, и на каждом уровне имеется линейный порядок (слой) элементарных чисел b от 0 до 9, к которым прикрепляется новый слой таких чисел. В десятичном числе это соответствует

приписыванию справа или слева новой цифры. Наглядно это можно выразить с помощью десятичной дроби $r=0,238=238/10^3$, которая получается делением целого числа на его максимальный разряд, в данном случае - число 10^3 всех трехзначных чисел. Добавление новой цифры справа уточняет значение десятичной дроби, изменяющейся в интервале $(-1, 1)$.

Аналогичным образом более сложные числовые множества можно представить, как расслоенные на базах более простых, в частности, $\pi.R \rightarrow Z$, где каждому целому числу $b \in Z$ соответствует открытая окрестность $X_0=[0, 1)$ – типовой слой вещественных чисел R . В данном случае отображение π определяет целую часть $[x]$ числа $x \in R$, а X_0 – его дробную часть $X_0=\{x\} = x - [x]$. Слой X_b продолжает число b вправо по числовой прямой и представлен действительными (рациональными, алгебраическими и трансцендентными) числами из интервала разбиения $X_b=[b, b+1)$. Такие слои X_b в проекции на числовую ось R не пересекаются (рис. 3а). Таким образом, получаем $R=X_0 \times Z$ – числовое множество действительных чисел. Все элементы x слоя X_b связаны с одним элементом базы b – $x \in X_b=[b, b+1)$, т.е. каждое число $x \in R$ свертывается к ближайшему целому числу b (округляется в меньшую сторону). Числа x разных слоев X_b сравнимы по одинаковой величине их дробной части, т.е. по положению в типовом слое $X_0=[0,1)$, связанном с единичным отрезком $I=[0,1]$, к которому естественно трансформируется любой отрезок числовой прямой, имеющий минимальное и максимальное значения: $y=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$. Обратной операцией слой $X_b=b+[0,1]$ неограниченно распространяется в разных направлениях $x \in [x_{\max}, x_{\min}]$, в частности, $x \in [-1, 1]$ (рис. 3б).

При расслоении $B \rightarrow X_0 \times B$ происходит удвоение множества или пространства B , что можно интерпретировать как прогноз или изобретение нового, что, например, произошло, когда к волоку (саням) B присоединили колеса X_0 : получилась телега и далее все ее транспортные производные. Комплексные числа $x=x+yi$ получаются путем удвоения действительных чисел $C=R \times R$, гиперкомплексные кватернионы – удвоением комплексных, октавионы – удвоением кватернионов по процедуре Кэли-Диксона [10]. По аналогии формируются многомерные пространства независимых координат $x=\{x_i\}$ ($i=1,2,3...n$), например, четырехмерное физическое пространство-время.

В комплексных числах и многомерных пространствах $x \in X$ теряется линейный порядок чисел, который восстанавливается при введении гладких функций $F(x) \rightarrow R$, отображающих значения координат $x=\{x_i\}$ векторного пространства $X=R^n=R \times R \times R \times \dots$ (n – раз) в линейно-упорядоченное пространство R . Это происходит подобно тому, как среднее арифметическое значение становится представителем множества близких к нему чисел. В итоге пространство X расслаивается на множестве значений функции $\pi:X \rightarrow F(x) \in R$. Геометрически $F(x)$ соответствует многомерной поверхности (многообразию точек), на которой можно задать путь $s:I \rightarrow F(x)$ с точками начального $s(0)$ и конечного положения $s(1)$. Функции $\Phi(x,s) \in F(x)$ вдоль этого пути являются гомотопически эквивалентными, т.е. непрерывно изменяются в зависимости от положения s : $\Phi(x,s):I \times X \rightarrow R$. В общем случае под $\Phi(x,s)$ можно понимать любые математические структуры, связанные с многообразием $F(x)$, в частности, с касательными слоями $X_b \subset X$ в точках $b \in \Phi(x,s) \subset F(x)$ локального положения s с координатами $x=\{x_i\}$. Поскольку возможны разные виды функций $F(x)$, то в качестве многообразия в математике обычно рассматривается само пространство X с индуцированной касательным расслоением векторной структурой [23].

1.2. Аксиоматические основы реальности. Главная гипотеза теоретико-множественного моделирования состоит в том, что числовые системы соответствуют системам реального мира, в чем были уверены математики прошлого и о чем думают современные представители математической науки, когда рассуждают о создании эффективных средств обработки огромных массивов информации. «Всё есть число» – считал древнегреческий ученый Пифагор. Сегодня в физике квантовые числа однозначно и полностью определяют свойства элементарных частиц и атомов.

“Под прикладной теорией множеств я понимаю то, что обычно называют учением о природе или космогонией...,” – писал Г. Кантор [9, с. 247]. Это послужило поводом считать математику естественной наукой, предназначенной для изучения реального мира [24]. Подразумевается существование связи между множествами чисел и реальностью, но эта связь неоднозначная. “Понятие множества, – писал Ж. Матерон в работе по геостатистике [18, с.19], – слишком широко, чтобы его можно было применять, как оно есть, к физической реальности”. Необходимо вводить объективные ограничения на множествах чисел, чтобы соответствовать действительному положению дел.

Разноуровневые множества связаны булеаном $P(A) = 2^A$ – это множество всех подмножеств (частей) множества A ; мощность (число частей) $P(A)$ больше мощности A . В частности, $\omega_1 = P(\omega_0)$ – мощность континуума ω_1 больше мощности любого счетного множества ω_0 [1]. Г. Кантор установил взаимно-однозначное соответствие между множеством континуума действительных чисел и множеством точек на любом отрезке прямой, включая единичный отрезок $I=[0,1]$.

Для создания содержательной научной теории необходимо существующему множеству (системе) всех реальных элементов сопоставить числовое множество с присущими ему свойствами. Если такая универсальная Мир-система S однозначно сравнивается с ограниченным сверху и снизу счетным множеством целых чисел $Z_0 \leftrightarrow S$, то следует полагать: мир S конечен, квантовано и иерархически устроен, линейно упорядочен. Этим обусловлена возможность типизации (расслоения) и классификации систем. Пример – линейная упорядоченность по заряду ядра атомов химических элементов в системе Д.М. Менделеева. Это позволяет осуществить инновационную процедуру: операции с объектами заменить операциями с числами, что дает возможность делать логические выводы в онтологиях знаний, основанных на естественных классификациях.

Принцип континуума устройства мира противоположен принципу атомизма и квантования в структуре мироздания. В этом случае огромное число элементов S комбинируются разными способами в системы универсального множества $S=P(S)$ – множества всех подмножеств S . Универсальное множество $S \leftrightarrow I$ ставится в соответствие точечному множеству мощностью континуума, представителем которого является множество действительных чисел отрезка $I=[0,1]$. Из аксиомы $S \leftrightarrow I$ следует линейная упорядоченность всех систем из S . Это означает, что системы реальности вытягиваются в непрерывную цепочку частей универсального целого $I(S)$, мало отличающихся друг от друга по положению на I . Аксиома в соответствии со свойствами континуума $I=[0,1]$ влечет за собой линейную упорядоченность всех подсистем S , которые образуют непрерывную, индуктивную, гомотопическую, ограниченную и измеримую систему – комплекс [25].

1.3. Разрывные функции в науке. Закономерен вопрос: существуют ли множества более высокой мощности (научно-информационной емкости), чем мощность континуума поля вещественных чисел? В разнообразии числовых систем найти такие множества непросто. Например, множество всех точек n -мерного непрерывного пространства при любом n имеет мощность континуума. Множество всех непрерывных функций $f(x)$ также обладает мощностью континуума. Множество большей мощности получается только для разрывных функций самого общего вида, когда с каждой точкой x сопоставляется произвольное значение функций $f(x)$, никак не связанное с соседними значениями функции $f(x+dx)$ [11, с. 369].

В частности, на графике функции $y=1/x$ в начале координат $x=0$ имеется два значения $y=\infty$ и $y=-\infty$: при $x \rightarrow 0$ справа ($x=+0$) и при $x \rightarrow 0$ слева ($x=-0$). Получается, что единый ноль определяет два значения $x=\pm 0$, имеющих смысл ненулевых бесконечно малых (инфинитезимальных) ориентированных постоянных величин $\varepsilon=dx$. Элементы ε не обладают свойствами действительных чисел R и их добавление $x+\varepsilon$ расширяет поле $x \in R$ до поля гипердействительных чисел *R , где можно делить на 0. В точках $x=0$ имеется разрыв (второго рода) функции $y=1/x$ со значениями $y(0) = \pm\infty$ и такое значение $y(x)$ численно неопределенно, система имеет сингулярное свойство – отдельного, одиночного, единичного.

В общем случае рассматривается счетное множество независимых координат $x=\{x_k\}$, пересекающихся в начале системы координат $x=0$. Набор значений координат разного измерения для каждого объекта задает точку в многомерном пространстве континуума. При уменьшении расстояния от точки до начала координат значения x_k приближаются к 0, имеющему индивидуальный смысл по каждому направлению $\varepsilon=\{\varepsilon_k\}$ в силу различия единиц измерения: +0 килограммов отличается от +0 метров. В бесконечно малой окрестности точки $x=0$ различия ε_k снимаются, но подразумеваются всякий раз, когда начинают откладывать измеренное значение x_k по соответствующей координате ортонормированной базы. Получается, что сложный объект можно первично разместить в простой линейной системе измерений; в развернутой системе измерений такой объект будет восприниматься в виде сечения, следа или проекции в слое. Точка $x=0$ отличается от всех остальных точек координируемого пространства. Аналогично получается в системе сферических (географических координат), где в точках южного и северного полюсов пересекаются все меридианы, и в этих точках теряет смысл понятие «долгота», который опять восстанавливается уже при малых ε отклонениях от полюса. В качестве начала отсчета можно принять любой идеальный объект, например, характеристики равнинной географической фации зонального типа $x=0$, и размещать вокруг нее остальные фации ландшафта по направлениям ε_k малого видоизменения факторальных характеристик местных геосистем.

Проблема влияния малых показателей ε широко обсуждается в разных областях науки, например, положительное влияние экстремальных факторов и условий на функционирование систем или полезные воздействия малых концентраций вещества на организм. В частности, эффект яровизации проявляется в физиологической реакции растений на низкие температуры и вызывает адаптацию к сезонным изменениям умеренного климата. Сильно разведённые препараты используются в гомеопатии. Они вызывают у здоровых людей симптомы, подобные симптомам болезни пациента. Концепция лечения основана на

принципе исцеления «подобного подобным» при воздействии малыми дозами. Вещество, способное в больших дозах вызывать определенные симптомы в организме, в малых дозах эффективно лечит и снимает похожие симптомы. Гомеопатия методически близка к вакцинации – введению небольшого количества антигенного материала с целью вызвать иммунитет к болезни, который предотвратит заражение или ослабит его отрицательные последствия. При активной вакцинации микроорганизмы либо инактивированы (убиты), либо заметно ослаблены. В биологических популяциях высокие показатели роста и размножения приводят к повышенной конкуренции и смертности, но и почти нулевой рост означает скорую гибель сообщества. В экономике ценность определяется степенью полезного результата - удовлетворения потребностей: первый небольшой глоток воды производит наибольший эффект при утолении сильной жажды.

Критические явления изучаются на примере бифуркаций, что означает всевозможные качественные перестройки (трансформации, метаморфозы) систем при малом изменении параметров ε . Например, функция $y(x)=y_0\exp(\varepsilon x)$ – решения уравнения $dy/dx=\varepsilon y$ – гомотопически зависит от малого параметра ε , положительное значение которого соответствует экспоненциальному, близкому к линейному росту кривой $y(x)$, а отрицательное – постепенному снижению y до нуля (тривиальному решению уравнения). При $\varepsilon=0$ функция $y(x)=y_0$ имеет неизменное значение. Величина $y(0) = y_0$ выделяет точку бифуркации – критическое состояние системы, при котором она становится неустойчивой относительно флуктуаций (малых случайных изменений) параметров ε : станет ли состояние системы хаотическим или она перейдет на новый уровень порядка. Точка бифуркации имеет несколько ветвей развития событий (аттракторов), по одному из которых пойдет развитие системы. Однако невозможно предсказать, какой новый аттрактор займет система. Существование системы в точке бифуркации носит кратковременный характер и разделяется более длительными устойчивыми режимами системы. Множество тривиальных точек $y=0$ формируют сингулярное пространство, в котором невозможно выделить отдельные сингулярные точки в силу отсутствия у них пространственной размерности и измерительной определенности, многозначности и индетерминированности.

В математике есть понятие «тривиальные решения» - обособленные решения, как правило, очевидные, простые. Тривиальные решения уравнений, тривиальные преобразования функций – это все, что похоже на "нуль", не представляет ничего "нетривиального". Основная задача научно-технических исследований – поиск нетривиальных решений, позволяющих хотя бы «на шаг» оторваться от первобытного, коренного состояния, начать развиваться. Тривиальный – значит простой, не обладающий сложностью, первоначально общепонятный, общепринятый, доступный на элементарном уровне знания. Этимология этого слова берет начало в латинском языке, где означает «находящийся на распутье», место "трёх дорог" – участок в древних поселениях, где встречались, собирались люди, откуда они расходились в разные стороны. Известен художественный образ «Витязь на распутье»; он остановился в раздумье перед камнем, на котором указаны разные варианты пути с ожидаемым результатом. В центре внимания «камень-вещун» с отображенными в надписях знаниями и сам момент принятия решения в условиях неопределенности. Тривиальное здесь воспринимается как начало и ожидаемый конец отсчета.

В квантовой теории физики возникла идея пространства состояний ε_k , не связанного с перемещением точечной частицы в обычном пространстве x , что привело к понятию изотопического спина, действующего в особом изоспиновом пространстве, к представлению о цветовом пространстве и т.д. Сходные модели развиваются в физической теории струн, изучающей не классическое взаимодействие точечных частиц, а одномерных протяжённых объектов - квантовых струн. Все элементарные частицы и их связи возникают в результате колебаний и взаимодействий ультрамикроскопических квантовых струн на масштабах планковской длины $\Delta l = 10^{-35}$ м. Один вид колебаний струны, например, соответствует электрону, а другой - кварку. Непротиворечивые и самосогласованные квантовые теории струн возможны лишь в пространствах высокой размерности, часть координат которых являются скрытыми, свернутыми до размеров порядка Δl [6]. В координатном выражении квантовая струна – пространственная кривая общего положения, с каждой точкой которой функционально связан квантовый гармонический осциллятор. Струны могут колебаться по девяти или более направлениям пространства. Квантовая теория струн строится в формализме интегралов по путям.

В физическом смысле особые точки пространства по Р. Декарту – это выделенная система отсчёта, заданная на многообразии точек «несущего эфира», который в современной физике трактуется как космический ландшафт, вакуум – среда, где законы физики и других наук принимают конкретную форму. В первоначальном понимании эфир – это «материальная субстанция, несравненно более тонкая, нежели видимые тела, предполагается существующей в тех частях пространства, которые кажутся пустыми» [16, с. 195]. Получается, что в основе физики лежит пустота, свойства которой до конца не поняты. Особые точки состояния систем разного рода соответствуют своеобразным «дыркам» пространства, касательным точкам расслоения. Физический эфир состоит из «дырок» с уникальными свойствами сингулярности, в число которых входят объекты космического масштаба типа «черной дыры» или сингулярной точки модели большого взрыва, из которой произошла Вселенная – состояния с бесконечно малым размером и огромной плотностью и температурой.

Сингулярное, синкретическое состояние – это своеобразный генофонд становления сложных систем, что наглядно проявляется на примере индивидуального развития высших организмов из одной клетки или появления цветка и формирования плода из бутона. Это же прослеживается в развитии науки из первобытного хаоса данных и знаний в систему многочисленных абстрактных и конкретных теорий науки будущего. В этом смысле сингулярные объекты обладают своеобразной кармической памятью, владеют перспективной информацией.

1.4. Гипердействительный мир. Реальным обобщением множества действительных чисел становятся К-пространства (пространства Канторовича) – порядково полные векторные пространства. Считается, что в определенном смысле К-пространства для математики – открытие столь же гениальное, как таблица Менделеева [13]. Любое расширенное К-пространство есть интерпретация поля действительных чисел в подходящей булевозначной модели, поэтому каждое из К-пространств является новой равноправной моделью вещественной прямой, а, следовательно, играет в математике ту же фундаментальную роль. Монадология – современный нестандартный анализ – реализуется в

упомянутых булевозначном и инфинитезимальном вариантах. Последний известен также как робинсоновский нестандартный анализ [12]. Представление о гипердействительных нестандартных числах ${}^*x \in {}^*R$ позволяет включить в рассмотрение бесконечно большие и бесконечно малые числа ε [2]. Постоянные числа $\varepsilon \geq 0$ меньше любого положительного действительного числа $x \in R$. В ${}^*x \in {}^*R$ выделяется стандартная действительная $x = \text{st}({}^*x)$ и нестандартная $\varepsilon = {}^*x - x$ части. Множество чисел ${}^*x \in {}^*R$, имеющих одинаковое стандартное значение x , называется монадой $\mu(x)$ числа x . Получается, что *R расслаивается на множестве действительных чисел $R \in {}^*R$, причем монады разных x не пересекаются. Совокупность (не множество) бесконечно малых $\varepsilon = {}^*x - x \in \varepsilon(x) \subset \mu(x)$ одной монады $\mu(x)$ назовем эпимонадой $\varepsilon(x)$ – это слой расслоения гипердействительных чисел *R на базе действительных чисел R в точке $x \in R \subset {}^*R$ (см. рис. 3). В каждой эпимонаде бесконечно много инфинитезимальей (бесконечно малых величин), своеобразно прорастающих в координатное пространство. Эпимонада $\varepsilon_0 = \varepsilon(0) = \mu(0)$ представляет типовой слой, формирующийся вокруг точки $x=0$ согласно принципу Робинсона: если внутреннее множество ε_0 состоит только из бесконечно малых чисел, то ε_0 содержится в интервале $[-\varepsilon, \varepsilon]$, где ε – бесконечно малое число [4, с.87]. При графическом изображении нестандартного числа *x на оси R вокруг $x = \text{st}({}^*x)$ рисуется жирная точка или шарик, соответствующие монаде $\mu(x)$ – неделимому, точному отображению x [4, с. 30]. При высоком разрешении в окрестности точки x просматривается расплывшееся облако значений с неясными краями – образ монады $\mu(x)$ и эпимонады – слоя $\varepsilon(x)$. Методы нестандартного анализа хорошо отражают представления о двойственной «дискретно-непрерывной» структуре физического пространства.

Так, примерно – в виде обведённой окружностью точки x – пифагорейцами давалось представление первой метафизической сущности – монады (рис. 4). Монада (др. греч. – единица, простая сущность) у пифагорейцев обозначала «божество», или «первое существо», «единицу» или «единое, как неделимое». Согласно Лейбницу, основаниями существующих явлений (феноменов) служат простые субстанции – монады. В каждой монаде в потенциале свёрнута целая Вселенная. Все монады просты и не содержат частей, их бесконечно много. Тожественных по свойствам монад не существует, что обеспечивает бесконечное разнообразие мира феноменов (принцип всеобщего различия). Вместе с тем монады познавательно неразличимы; различия их содержания просматриваются только в явлениях. Естественные изменения монады исходят из её внутреннего принципа существования и называются стремлением [15].

Подобные суждения относятся как к монаде $\mu(x)=x+\varepsilon(x)$, так и к эпимонаде $\varepsilon(x)$ – ориентированному локальному слою (рис. 3). Такие мысли связываются с представлением об эпистеме. Греческое слово «эпистема» в античной философии означает высший тип несомненного, достоверного, абсолютного знания. Эпистема – скрытая и глубинная структура мышления определённой культуры, ее культурно-познавательное априори, задающее возможности форм культуры и конкретных форм знания определенной исторической эпохи и наличия изоморфизмов культурных феноменов. Сходное содержание имеет понятие «ризомы» – постмодернистский лингвистический конструкт, призванный обозначать феномены социальной реальности и саму реальность. Образно ризома – это множество (корень) беспорядочно переплетенных линий (отростков или побегов), распространяющихся во всех направлениях. Ризома формируется не за счет

дифференциации, членения, разветвления, а благодаря внутренней способности «перепрыгивать» с одной линии развития на другую. Как трава, пробивающаяся между камнями, ризома чем-то всегда окружена, растет «из середины», где есть трещины, разломы, пустоты и другие провалы бытия. Она помогает умножать стороны-границы исследуемой реальности [5, 26].

Монада в программировании – это абстракция линейной цепочки связанных вычислений. Монады позволяют организовывать последовательные вычисления. В информатике существует понятие «онтология» – детальная формализация некоторой области знаний с помощью определённой концептуальной схемы, моделью которой может быть монада (зачатки онтологии). Одной из задач является сравнение онтологий, выявление их соответствия и на этой основе установление их порядка. Сравнение двух онтологий (ontology matching) означает, что для каждого понятия, отношения или экземпляра одной онтологии подыскиваются соответствующие элементы в другой онтологии [27].

Совокупность эпимонад $\varepsilon(x)$ по всем конечным $x \in R$ формирует дополнительную структуру $E = {}^*R\text{-}R$ нестандартного анализа, которая вводится в R наподобие того, как цвета проявляются на фоне черно-белого (стандартного) изображения. Отключив цвет E , сохраняем основную R , но теряем важную часть визуальной информации E , переводим ее в латентное, скрытое состояние. Монады ${}^*x = x + \varepsilon \in \mu(x)$ являются внешними множествами по отношению к $x \in R$, «дырками» в гипердействительном поле *R . Поскольку формальная теория нестандартного анализа – это консервативное расширение классической теории действительных чисел, то аксиома $S \leftrightarrow I$ расширяется до аксиомы ${}^*S \leftrightarrow {}^*I$, где *I – это множество $I = [0, 1]$, дополненное эпимонадами (источниками и стоками информации) для каждой позиции $x \in I$. Универсальная модель *S расширяется за счет нового (инновационного) знания $\Delta S = {}^*S\text{-}S$, отображающего сущностное пространство возможных изменений наблюдаемых явлений S .

2. Обсуждение результатов. Аксиома ${}^*S \leftrightarrow {}^*I$ связывает реальность с неархимедовой алгеброй сложения и умножения, числа которой не выходят за пределы бесконечно малых нестандартных величин ε и алгеброй действительных чисел отрезка $I = [0, 1]$, что соответствует законам существования внутреннего и внешнего пространства реальности. Это означает что все внутренне заряжено и имеет начало и конец как в пространственном, временном и другом – логическом, историческом, семантическом или ином смысле. В соответствие с этой аксиомой развитие $0 \rightarrow 1$ направлено в сторону дифференциации процессов и явлений, формирования пространства, равномоного счетному и дискретному пространству с определенными сущностями: ${}^*S \rightarrow S \rightarrow S$. Это происходит подобно тому, как в концепции ризомы: корень из семени (0) перерастает в форму ствола, веток-координат и листьев-слоев (1).

Исходные этапы развития – позиции 0, точки отсчета эволюции систем – имеют структуру высокой мощности *S , т.е. самое простое «эфирное» образование ΔS соответствует самому сложному строению *I . Напротив, самые сложные типологически значимые проявленные структуры S аналогичны числовым множествам натурального ряда. Здесь проявляется некоторая закономерность развития сложных систем [21]: от систем формального тождества противоположностей (сингулярного, синкретического состояния) к диалектическим системам тождества (изоморфизма) противоположностей – от нуля к

единице, от Альфа к Омега по П. Терьяр де Шардену (рис. 4). Развитие трактуется как естественный процесс расслоения информации на базовых элементах свернутого средового пространства $\varepsilon(x) \in E \leftrightarrow \Delta S$.

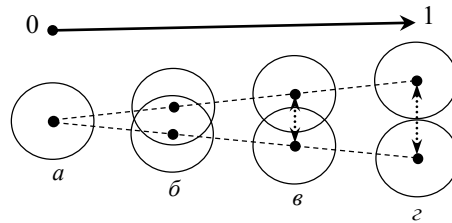


Рис. 4. Эволюционное расслоение (от 0 к 1) структуры числовых и реальных систем:
 a – начальное синкретическое состояние формального тождества, $б$ – формальное единство, $в$ – диалектическое единство, $з$ – диалектическое тождество (морфизм) слоев

Первобытное синкретическое состояние (a) – это сочетание или слияние «несопоставимых», разнородных начал в одну систему типа локальной области начала координат $\varepsilon_k = dx_k$. Такое состояние характеризуется нерасчленённостью существования различных видов в одном, первоначальной слитностью, непроявленностью, свойственными ранним стадиям развития. В синкретической системе происходит соединение – отождествление разнородных сущностей, игнорируются различия. Она едина, не расчленена в своём исходном, первоначальном состоянии. В диалектической системе ($з$) сущности расслаиваются, расходятся, проявляются и отождествляются (сравниваются) как противоположности.

Структура эпимонады $\varepsilon(x) = \{\varepsilon_k(x)\}$ может быть представлена формулой полного дифференциала функции $F(x)$ разных наборов бесконечно малых независимых значений $\varepsilon_k \in \mu(x)$ отклонений $\varepsilon_k = dx_k$ от $x \in I \subset R \subset^* R$:

$$a) dF = \sum_{k=1}^n a_k dx_k, б) d = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} dx_k, a_k = \frac{\partial F}{\partial x_k}, \quad (1)$$

где a_i – конечное действительное число, определяющее «вес» каждой $\varepsilon_k \in \varepsilon(x)$; $dF = \delta$ – бесконечно малая взвешенная сумма ε_k . Эти уравнения лежат в основе инфинитезимальных преобразований $S(x + \varepsilon) = S(x) + \varepsilon(x)a(x)$, закономерно объединяющих состояние конкретных систем $S(x)$, их изменений $\Delta S(x) = S(x + \varepsilon) - S(x)$ и действий $D(x) = \varepsilon(x)a(x) = \Delta S(x)$ по единому гомотопическому параметру $x \in I$: всякое изменение есть явление эпимонады в действии.

Эпимонада в развитии представляется как многомерный ($k=1, 2, \dots, n$) шар с центром в точке $x \in I$, или система вложенных шаров, или система локальных безразмерных координат $dx = \{dx_k\}$, или пучок линий (векторов) зависимостей $dF(dx)$ вида (1а). Такие эквивалентные структуры $\varepsilon(x)$ объективно формируются вокруг каждого стандартного числа $x \in I$, значением которого гомотопически индексируются. Уравнения связи ε_k определяются для каждой функции $F(x)$ формулой общего вида (1б), имеющего смысл операторного вектора. Часть его локальных координат $dx = \{dx_k\}$ в процессе развития распространяются вширь из начала координат $x \in I$ формируя системы разного рода, гомотопически связанные между собой в пространстве какого-либо пути γ . Например, это происходит в виде разнообразных касательных векторных слоев, соприкасающихся с ними структур и функций типа

сопровождающего трехгранника ортонормированный реперов $\frac{\partial}{\partial x_k}$ или уравнений эйлеровых векторных полей $\xi = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} x_k$ [23]. От величины $x \in I$ зависит, сколько, какого свойства и значения координаты проявляются. Процедура распространения соотношений рассматривается как форма экстраполяции, извлечения знаний.

Заключение. Инновационная идея «восхождения» (лифта) от абстрактного к конкретному в приложении к математическому моделированию реальности состоит в том, что описание конкретных ситуаций требует все более сложных глубоко формализованных и абстрактных математических конструкций. С другой стороны, не всякое выводимое в математике знание истинно в смысле объективного существования и проявления формализованных связей, и для конкретизации знания требуется на каждом уровне сложности вводить ограничения, выбирать в качестве эталона сравнения с действительностью замкнутую числовую систему – типовой слой расслоения на базе более простых числовых полей со структурой линейного порядка.

Основная теоретическая идея моделирования заключается в отождествлении реальных и математических объектов, свойств множеств натуральных, действительных и гипердействительных чисел со свойствами наблюдаемых систем, в чем выражается гипотеза возможности применения математических соотношений для описания природных, экономических и социальных явлений. Кроме свойств порядка, числовые системы обладают внутренними групповыми и алгебраическими свойствами. Для решения содержательных задач необходимо каждый тип систем и их элементов сопоставлять универсальному, инвариантному числовому множеству и его элементам с соответствующей алгебраической структурой. Из этого сравнения следует понимание и объяснение свойств выделенной реальности.

Особенности инфинитезимальных элементов ε гипердействительных чисел позволяет рассматривать монады в качестве первоисточника явлений и соответствующих знаний в последовательности «слой - база расслоения – связность слоев» числовых рядов, выделяя при этом конфигурационные свойства слоев, их позицию (координаты) в числовых рядах, их различие и сходство на разных этапах развития. При простоте внешнего проявления внутреннее содержание ε обладает сложным строением - это своеобразный кристалл, самодвижение которого раскрывается в реальности. Свойства нестандартных элементов передаются разными определениями: разрывной, неопределенный, случайный, хаотический, эфирный, сингулярный, синкретический, тривиальный, формальный, возможный, критический, начальный, первородный, первобытный и т.д. Эти термины широко используются в разных научных исследованиях, но не всегда связываются с их математическими аналогами. Решение задачи установления соответствия реальных процессов и явлений с точками гипердействительной шкалы будет дальнейшим инновационным вкладом в науку, особенно в создание формальных онтологий знаний с раскрытием объяснительных возможностей математики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельский А.В. Канторовская теория множеств. М.: Из-во МГУ. 1988. 112 с.
2. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Ч.2. Языки и исчисления. М.: МЦНМО, 2002. 288 с.
3. Гейзенберг В. Нелинейная квантовая теория поля. М.: Высшая школа. 1959. С. 49–50.
4. Гордон Е.И., Кусраев А.Г., Кутателадзе С.С. Инфинитезимальный анализ. М.: Наука. 2008. 399 с.
5. Гречко П.К. Концептуальные модели истории. М.: Логос. 1995. 144 с. Режим доступа: <https://docplayer.ru/72071443-P-k-grechko-konceptualnye-modeli-istorii.html> (дата обращения 13.01.2019)
6. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М.: Издательская группа URSS. 2004. 288 с.
7. Зиновьев А.А., Стёпин В.С., Голдберг Ф.И. Метод восхождения от абстрактного к конкретному // Гуманитарные технологии. Режим доступа: <http://gtmarket.ru/concepts/6994> (дата обращения 13.01.2019)
8. Ильенков Э.В. О диалектике абстрактного и конкретного в научно-теоретическом познании // Вопросы философии. 1955. № 1. С. 42–56. Режим доступа: <http://caute.ru/ilyenkov/texts/vf/daikntp.html> (дата обращения 13.01.2019)
9. Кантор Г. Труды по теории множеств. М. Наука. 1985. 431 с.
10. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. М. Наука. 1973. 144 с.
11. Клейн Ф. Элементарная математика с точки зрения высшей. В 2 т. Т. 1. Арифметика, алгебра, анализ. М.: Наука. 1987. 431 с.
12. Кутателадзе С.С. Некоторые тенденции в монадологии // Труды конференции «Геометрия и приложения», 13–16 марта 2000 г., Новосибирск. 2000. С. 84–94.
13. Кутателадзе С.С. Пространства Канторовича // Леонид Витальевич Канторович – ученый и человек. Том 1. Новосибирск: Филиал «Гео» Изд. СО РАН. 2002. С. 177–181.
14. Ларин С.В. Числовые системы. М.: Академия. 2001. 160 с.
15. Лейбниц Г.В. Сочинения в четырёх томах. Том 1. М.: Мысль. 1982. С. 413–429.
16. Максвелл Дж.К. Эфир // Дж.К. Максвелл. Речи и статьи. М.-Л.: Техтеоргиз. 1940. С. 195.
17. Маркс К. К критике политической экономии. М.: Госполитиздат. 1949. 272 с.
18. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. Перевод Ю.В. Рощиной. М.: Мир. 1968. 408 с.
19. Нечаев В.И. Числовые системы. Пособие для студентов педагогических институтов. М.: Просвещение. 1975. 199 с.
20. Сарданашвили Г.А. Современные методы теории поля. 1. Геометрия и классические поля. М.: УРСС. 1996. 224 с.
21. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Новосибирск: Наука. 1997. 502 с.
22. Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука. 2005. 280 с.
23. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №1. С. 61–84.
24. Янов Ю.И. Математика и метаматематика // Математические вопросы кибернетики. Вып. 16. М.: Физматлит. 2007. С. 129–154.

25. Cherkashin A.K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society // Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. V. 4. № 5. Pp. 4–20.
 26. Deleuze G., Parnet C. Dialogues. N.Y.: Columbia Univ. Press. 1987. 157 p.
 27. Euzenat J., Shvaiko P. Ontology Matching. Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer. 2013. 332p.
 28. Hjorth P.G. Innovative and collaborative industrial mathematics in Europe // Proc Math Phys Eng Sci. 2017. V. 473. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5454359/> (accessed 13.01.2019)
-

UDK 51.7:511.48:004.9

**INNOVATIVE MATHEMATICS: A SEARCH OF THE BASES
AND LIMITS OF MODELING REALITY**

Alexander K. Cherkashin

Dr., Professor, Chief Researcher,

Head of the Laboratory "Theoretical geography"

V.B. Sochava Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Russia, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya1, akcherk@irnok.net

Abstract. The problem of using mathematical knowledge for modeling real processes and phenomena by comparing the features of numerical systems with the laws of the structure and development of systems of the observed world is discussed. The basis and limitations of modeling in the procedures of formalization of conceptual constructions and substantial interpretation of mathematical formulas are determined. The cognitive procedure of transition from abstract to concrete knowledge is described as the metatheoretic transformation of knowledge connected with emergence of new quality of numerical systems, new information layers on old bases of numerical point sets. Description of new specific situations requires more complex and abstract mathematical constructions.

Keyword: innovative mathematical knowledge, comparison of real world phenomena with numerical sets of monads and epimons hidden knowledge, the development of real systems according to the structure of the hyperreal numbers.

References

1. Arhangel'skij A.V. Kantorovskaya teoriya mnozhestv [Cantor's sets theory]. Moscow. Iz-vo MGU = Moscow university press. 1988. 112 p. (in Russian)
2. Vereshchagin N.K., Shen' A. Lekcii po matematicheskoi logike i teorii algoritmov. CH.2. Yazyki i ischisleniya [Lectures on a mathematical logic and theory of algorithms. Ch.2. Languages and calculations]. Moscow. MCNMO = Moscow center for continuous mathematical education. 2002. 288 p. (in Russian)
3. Gejzenberg V. Nelinejnaya kvantovaya teoriya polya [Nonlinear quantum field theory]. Moscow. Vysshaya shkola = Publishing house "Vysshaya Shkola". 1959. Pp. 49–50. (in Russian)

4. Gordon E.I., Kusraev A.G., Kutateladze S.S. Infinitezimal'nyj analiz [Infinitesimal analysis]. Moscow. Nauka = Science. 2008. 399 p. (in Russian)
5. Grechko P.K. Konceptual'nye modeli istorii [Conceptual models of history]. Moscow. Logos. 1995. 144 p. Available at: <https://docplayer.ru/72071443-P-k-grechko-konceptualnye-modeli-istorii.html> (accessed 13.01.2019) (in Russian)
6. Grin B. EHlegantnaya Vselennaya. Superstruny, skrytye razmernosti i poiski okonchatel'noj teorii [Elegant Universe. Superstrings, hidden dimensions and search of the final theory]. Moscow. Izdatel'skaya gruppа URSS = Editorial URSS. 2004. 288 p. (in Russian)
7. Zinov'ev A.A., Styopin V.S., Goldberg F.I. Metod voskhozhdeniya ot abstraktnogo k konkretnomu [From the abstract to concrete ascension method] // Gumanitarnyye tekhnologii = Humanitarian technologies. Available at: <https://gtmarket.ru/concepts/6994> (accessed 13.01.2019) (in Russian)
8. Il'enkov E.H.V. O dialektike abstraktnogo i konkretnogo v nauchno-teoreticheskom poznanii [On dialectics of the abstract and concrete in scientific-theoretical knowledge] // Voprosy filosofii = Philosophy issues. 1955. № 1. Pp. 42–56. Available at: <http://caute.ru/ilyenkov/texts/vf/daikntp.html> (accessed 13.01.2019) (in Russian)
9. Kantor G. Trudy po teorii mnozhestv [Works according to the sets theory]. M. Nauka. 1985. 431 p. (in Russian)
10. Kantor I.L., Solodovnikov A.S. Giperkompleksnye chisla [Hypercomplex numbers]. Moscow. Nauka = Science. 1973. 144 p. (in Russian)
11. Klejn F. EHlementarnaya matematika s tochki zreniya vysshej. V 2 t. T. 1. Arifmetika, algebra, analiz [The elementary mathematics in terms of the highest. In 2 t. T. 1. Arithmetics, algebra, analysis]. Moscow. Nauka = Science. 1987. 431 p. (in Russian)
12. Kutateladze S.S. Nekotorye tendencii v monadologii [Some trends in a monadologiya] // Trudy konferencii «Geometriya i prilozheniya», 13–16 marta 2000 g. = Proceedings of the conference "Geometry and Applications", March 13–16, 2000. Novosibirsk. 2000. Pp. 84–94. (in Russian)
13. Kutateladze S.S. Prostranstva Kantorovicha [Kantorovich's spaces] // Leonid Vital'evich Kantorovich – uchenyj i chelovek [Leonid Vitalyevich Kantorovich as the scientist and the person]. Tom 1. Novosibirsk. Filial «Geo» Izd. SO RAN = Branch "Geo" Publishing houses SB RAS. 2002. Pp. 177–181. (in Russian)
14. Larin S.V. CHislovyye sistemy [Numer systems]. Moscow. Akademiya = Publishing Center "Academy", 2001. 160 p. (in Russian)
15. Lejbnic G.V. Sochineniya v chetyryoh tomah [Collected works in four volumes]. Tom 1. Moscow. Mysl' = Publisher "Thought". 1982. Pp. 413–429. (in Russian)
16. Maksvell Dzh.K. EHfir [Ether] // Dzh. K. Maksvell. Rechi i stat'i [Speeches and Articles]. Moscow-Leningrad.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury = State publishing house of technical and theoretical literature. 1940. 195 p. (in Russian)
17. Marks K. K kritike politicheskoy ehkonomii [To criticism of political economy]. Moscow. Gospolitizdat. 1949. 272 p. (in Russian)
18. Materon ZH. Osnovy prikladnoj geostatistiki [Fundamentals of applied geostatistics]. Perevod YU.V. Roshchinoj. Moscow. Mir. 1968. 408 p. (in Russian)
19. Nechaev V.I. CHislovyye sistemy. Posobie dlya studentov pedagogicheskikh institutov [Numer systems. A training aids for students of teacher training colleges]. Moscow. Prosveshchenie. 1975. 199 p. (in Russian)

20. Sardanashvili G.A. *Sovremennye metody teorii polya. 1. Geometriya i klassicheskie polya* [Modern methods of a field theory. 1. Geometry and classical fields]. Moscow: Izdatel'skaya gruppа URSS = Editorial URSS. 1996. 224 p. (in Russian)
21. Cherkashin A.K. *Polisistemnyj analiz i sintez* [Polysystem analysis and synthesis]. Novosibirsk. Nauka = Science. 1997. 502 p. (in Russian)
22. Cherkashin A. K. *Polisistemnoe modelirovanie* [Polysystem modelling]. Novosibirsk. Nauka = Science. 2005. 280 p. (in Russian)
23. Cherkashin A.K. *Metateoreticheskoe sistemnoe modelirovanie prirodnyh i social'nyh processov i yavlenij v neodnorodnoj srede* [Metatheoretical system modeling of natural and social processes and the phenomena in the heterogeneous environment] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. №1. Pp. 61–84. (in Russian)
24. Yanov YU.I. *Matematika i metamatematika* [Mathematics and metamathematics] // *Matematicheskie voprosy kibernetiki. Vyp. 16*. Moscow. Fizmatlit. 2007. Pp. 129–154. (in Russian)
25. Cherkashin A.K. *Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society* // *Mathematical modelling of natural phenomena*. 2009. V. 4. № 5. Pp. 4–20.
26. Deleuze G., Parnet C. *Dialogues*. N.Y.: Columbia Univ. Press, 1987. 157 p.
27. Euzenat J., Shvaiko P. *Ontology Matching*. Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer. 2013. 332p.
28. Hjorth P.G. *Innovative and collaborative industrial mathematics in Europe* // *Proc Math Phys Eng Sci*. 2017. V. 473. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5454359/> (accessed 13.01.2019)

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ НА ВОСТОКЕ РОССИИ

Дзюбина Татьяна Владимировна

К.т.н., с.н.с., e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Илькевич Николай Иванович

Д.т.н., гл.н.с., e-mail: ilkev@isem.irk.ru,

Сурнин Николай Валерьевич

Инженер, e-mail: arsenik_s@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской Академии наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Аннотация. Актуальность исследований обусловлена значимостью строящегося магистрального газопровода «Сила Сибири» для транспортировки природного газа в Китай, а также для развития Восточных регионов России: их газификации и появлению новых газохимических и смежных производств. Сложные природно-климатические и геологические условия, в которых строится и будет эксплуатироваться данный газопровод, предъявляют высокие требования к надежности его функционирования. На основе математической модели оптимизации технических параметров проектируемого магистрального газопровода с учетом надежности и разработанной вычислительной программы были выполнены исследования по выбору оптимального варианта и оценке надежности участка магистрального газопровода «Сила Сибири» от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск. Анализ результатов показал, что полученный оптимальный вариант строительства участка газопровода по техническим условиям согласуется с вариантом газопровода, реализуемым ПАО «Газпром». Уровень его надежности оценивается как достаточно высокий. Однако, реализуемый проект магистрального газопровода «Сила Сибири» имеет неоднозначное значение для социально-экономического развития Сибири и Дальнего Востока РФ и поставки газа в Китай.

Ключевые слова: газотранспортная система, магистральный газопровод, «Сила Сибири», варианты развития, математическая модель, оценка структурной надежности.

Цитирование: Дзюбина Т.В., Илькевич Н.И., Сурнин Н.В. Оценка структурной надежности газотранспортной системы, формируемой на востоке России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №2 (14). С. 88-100. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-08

Введение. В настоящее время в рамках проекта «Сила Сибири» в восточной части России идет формирование крупной газотранспортной системы (ГТС). Ее основным элемент – магистральный газопровод (МГ), предназначенный для транспортировки газа из базовых центров добычи – Якутского и Иркутского – на Дальний Восток и в Китай [11]. Трасса МГ пролегает по территории трех субъектов РФ: Иркутской области, Республики Саха-Якутия и Амурской области (рис. 1).

На 1-м этапе строительства МГ началось возведение участка от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск протяженностью 2158 км, диаметром 1420 мм и рабочим давлением 9,8 МПа. На 2-м этапе будет построен участок длиной 793 км от Ковыктинского до Чаяндинского месторождения с аналогичными техническими параметрами. На 3-м этапе планируется расширение газотранспортных мощностей на участке от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск, строительство двух лупингов протяженностью 844,5 и 719,3 км. Всего на российском участке длиной более 3 тыс. км предполагается разместить 8 компрессорных станций (КС) общей мощностью 1331 МВт [12]. На 7 КС будут установлены по 6 газоперекачивающих агрегатов (ГПА) единичной мощностью 16 МВт (ГПА-16), за исключением КС-8 «Зейская», расположенной на границе с Китаем, на которой будут размещены 2 единицы ГПА-16 и 6 единиц ГПА мощностью 32 МВт (ГПА-32) [1]. Всего к настоящему моменту построено около 2000 км газопровода.

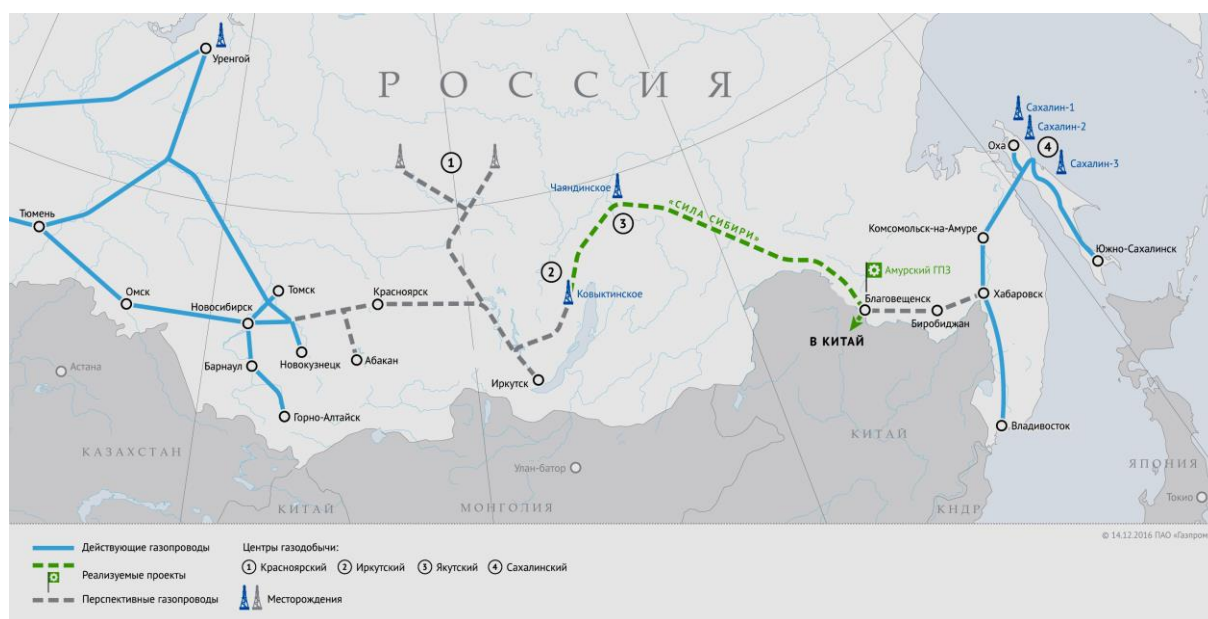


Рис. 1. Формирование ГТС на Востоке России (Источник: ПАО «Газпром»)

Данный проект имеет неоднозначное значение для социально-экономического развития Сибири и Дальнего Востока РФ и поставки газа в Китай. Рентабельность МГ «Силы Сибири» вызывала сомнения у специалистов уже на самом старте проекта. Стоимость строительства «Силы Сибири» оценивалась примерно в 770 млрд. руб., но вполне может превысить 1 трлн рублей (от 55 до 70 млрд. \$). Таким образом, газопровод обойдется бюджету России в солидную сумму, и если цена на газ будет ниже 300 \$ за тыс. м³, Россия понесет убытки.

После падения цены на нефть, к которой, согласно контракту, привязана стоимость газа, МГ оказался нерентабельным. За последние несколько лет (2014–2018 гг.) цена на газ в Азиатско-Тихоокеанском регионе снизилась вдвое – с 600 до 300 \$ за тыс. м³. Согласно официальному инвестиционному обоснованию ПАО «Газпром», окупаемость проекта по чистому доходу превышает 16 лет. Принимая во внимание цены на нефть и газ 2014 года, по чистому дисконтированному доходу проект не сможет окупиться до 2048 г., а если учесть, что строительство началось на два года позже, до 2050 года.

По данным на 2014 г. экономика КНР потребляла около 200 млрд. м³ газа в год, при этом основная его часть – порядка 130 млрд. м³ – добывалась на территории страны. Остаток – 65 млрд. м³ импортировался из Туркмении по ценам ниже российских.

Согласно плану развития газовой отрасли, опубликованному в январе 2017 года управлением по делам энергетики КНР, потребление газа в течение ближайших 15 лет должно вырасти всего на 76 %, достигнув 347 млрд. м³ газа в год. При этом почти весь дополнительный газ Китай намерен добывать самостоятельно. Примерно 14 % объема добычи должен составить сланцевый газ, разработка месторождений которого ведется в Китае с 2016 года. Кроме того, правительство изучает дополнительные возможности на рынке сжиженного природного газа и рассматривает возможность энергетического развития с привязкой не только к газу, но и к альтернативным источникам энергии, в том числе солнечным и ветровым установкам. В настоящее время КНР является мировым лидером по вводу подобных объектов.

Трасса МГ «Сила Сибири» пролегает по малонаселенным заболоченным, горным и сейсмоактивным территориям и преодолевает участки с вечномерзлыми и скальными грунтами и абсолютными минимальными температурами воздуха -62°C в Республике Саха (Якутия) и -41°C на территории Амурской области. По МГ «Сила Сибири» многокомпонентный природный газ должен транспортироваться на Амурский газоперерабатывающий завод (ГПЗ), где из него планируют выделять компоненты для различных отраслей промышленности – этан, пропан, бутан, пентан-гексановую фракцию и гелий, главным образом для продажи в Китай. Принимая во внимание столь большие расстояния между центрами добычи и переработки, необходимо учитывать возможные большие потери, в том числе ценных компонентов, при транспортировке газа, что может поставить под сомнение всю ценность проекта.

В начале 2000-х г. авторами были проведены исследования, в рамках которых выполнены расчеты по формированию альтернативного проекта газотранспортной системы на базе Ковыктинского газоконденсатного месторождения и оптимизации экспортного МГ «Ковыктинское – Иркутск – Улан-Батор – Пекин» [2]. Предложенный вариант развития ГТС видится более выгодным, как в экономическом, так и в социальном плане. В перспективе, учитывая выбранное направление прокладки, проходящее через освоенные и заселенные территории, реализация МГ могла бы создать реальные условия для газификации населенных пунктов, развития существующих и строительства новых современных газоперерабатывающих и газохимических производств вблизи центра добычи – как на территории Иркутской области, так и на Дальнем Востоке.

С учетом сложности реализации текущего проекта, предъявляются особые требования к надежности функционирования МГ и применяемому оборудованию. Для обеспечения высокого уровня надежности необходимо использовать современные, высоконадежные технологии и средства, например, трубы с повышенной деформационной способностью, имеющие внутреннее гладкостное покрытие, и специальные технические решения по их укладке, современные экономичные и энергоэффективные ГПА и пр. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования по оптимизации технико-технологических и технико-экономических параметров МГ и его элементов с учетом надежности.

В ИСЭМ СО РАН традиционно ведутся исследования основных проблем развития газоснабжающей системы (ГСС) в современных условиях, разрабатываются подходы,

методы и программные средства для многоуровневого моделирования ГСС, принципы согласования решений, где особое место отводится учету свойств надежности этих систем на разных уровнях иерархии [7]. В рамках этих исследований была разработана математическая модель (ММ) оптимизации технических параметров и участков МГ с учетом надежности, а также модель анализа надежности проектируемого МГ [5, 14]. Эти ММ легли в основу оптимизации технико-технологических и технико-экономических параметров с учетом надежности участка МГ «Сила Сибири» от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск.

Модель определения оптимальных параметров проектируемого МГ с учетом надежности. При создании модели были введены следующие допущения:

1. Газопровод рассматривается как отдельный элемент системы газоснабжения, вне связи с сырьевым источником газа и потребителем газа.
2. Линейная часть (ЛЧ) газопровода содержат одну или несколько ниток труб в общем случае разного диаметра.
3. Рассматриваются только стационарные состояния МГ, переходные режимы не рассматриваются.
4. Не учитывается возможность резервирования за счет аккумулирующей способности концевых участков МГ, за счет форсированной работы ГПА в пределах технических ограничений и за счет использования перемычек на ЛЧ. Следует при этом иметь в виду, что указанные выше возможности могут приводить только к повышению надежности газопроводов, а не к ее снижению.
5. Среди свойств надежности МГ учитываются его безотказность и ремонтпригодность. Причем потоки отказов и восстановлений оборудования (ГПА и ниток трубопроводов) являются простейшими потоками.
6. Учитываются только аварийные отключения оборудования и текущие ремонты в виде профилактики, а отключения оборудования в планово-предупредительный ремонт (ППР) в данной постановке не рассматриваются.

Общий процесс выбора оптимальных параметров МГ с учетом надежности предполагает:

1. Вариантное рассмотрение способов развития МГ на перспективу.
2. Анализ надежности проектируемого МГ.
3. Оптимальный выбор рационального варианта на основе расчета технико-экономических характеристик и интегральных показателей надежности МГ.

В общем виде задача определения рациональных параметров проектируемого МГ с учетом надежности формулируется следующим образом. Исходя из среднесуточной производительности МГ (Q), его технико-технологических (T), технико-экономических ($\mathcal{E}$) показателей и показателей надежности (H), принципиальной схемы МГ и избыточных конечных способов резервирования (r), следует определить оптимальные технические параметры, соответствующие минимуму приведенных затрат в проектируемый МГ

$$Z = f(T, H, \mathcal{E}, r) \rightarrow \min$$

при условии удовлетворения заданной нормы надежности газоснабжения

$$\Pi = y(Q, H, r) \geq \Pi^*.$$

Сформулированная задача может рассматриваться как комбинаторная оптимизационная задача, которая решается на основе метода полного перебора. Инженерный опыт исследований показывает, что число вариантов развития газопровода сравнительно небольшое, и все они могут быть просмотрены обычным перебором.

Среднесуточная расчетная производительность (Q) определяется из годовой расчетной производительности МГ с учетом коэффициента неравномерности потребления газа. Для МГ, не имеющих подземных газовых хранилищ (ПХГ) у потребителей, он обычно принимается равным 0,85, а для отводов от МГ – 0,75.

Под технико-технологическими показателями (Т) понимается длина МГ, список количества ниток трубопроводов и соответствующих диаметров, список типоразмеров номинальных мощностей ГПА (число рассматриваемых вариантов по ЛЧ и КС).

Под надежностными показателями (Н) понимаются интенсивности отказов и восстановлений ЛЧ и ГПА. В качестве нормативного показателя надежности газопровода P^* принимается коэффициент надежности K_n . Его текущее значение (P) равно отношению математического ожидания производительности к ее номинальному значению:

$$K_n = \frac{M[Q]}{Q_n}.$$

Под технико-экономическими показателями (Э) понимаются: удельные ежегодные эксплуатационные расходы и капиталовложения в ЛЧ МГ; удельные ежегодные эксплуатационные расходы и удельные ежегодные капиталовложения, пропорциональные установленной мощности КС; удельные металлоложения.

В результате решения данной задачи синтеза (оптимизации) структурной надежности [8] проектируемого МГ определяются следующие его параметры: число ниток трубопроводов; соответствующие оптимальные диаметры; число КС; число и длина линейных участков (ЛУ); число рабочих и резервных ГПА на каждой КС; оптимальная номинальная мощность ГПА; металлоложения в ЛЧ.

Число всех возможных рассматриваемых вариантов проектируемого МГ равно произведению чисел вариантов ЛЧ МГ и типоразмеров ГПА для КС и максимального числа резервных агрегатов на КС, которое не должно превышать числа рабочих агрегатов.

Предлагаемая ММ синтеза надежности для определения оптимальных параметров проектируемого МГ с учетом надежности включает в себя модель анализа надежности МГ.

Модель анализа надежности проектируемого МГ. Разработанная модель анализа надежности МГ [5] носит оценочный характер. В ней объектом исследования является сложный многониточный МГ, состоящий из нескольких ветвей. Каждая ветвь представляет собой цепь последовательно соединенных звеньев – ЛУ трубопроводов и КС.

Основная исходная надежностная информация, используемая в модели, – это интенсивности отказов его элементов $\lambda = 1 / T_p$ (отдельных ЛУ и ГПА) и интенсивности восстановлений этих элементов $\mu = 1 / T_v$, где T_p – среднее время исправной работы элемента между отказами (наработка на отказ), T_v – среднее время восстановления элемента.

В общем виде задача оценки надежности магистрального газопровода формулируется следующим образом: исходя из схемы соединения элементов газопровода, определенного способа резервирования, а также надежности элементов определяются следующие интегральные показатели надежности МГ: ряд и функция распределения вероятностей

работоспособного состояния газопровода, математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение пропускной способности МГ, коэффициент надежности газопровода (K_n), средний процент потерь пропускной способности МГ, связанных с отказами основного оборудования.

Для анализа надежности МГ используется схема «гибели и размножения». Это аналитический метод, который рассматривает объект на уровне случайного процесса и предполагает определение переходных вероятностей из одного состояния в другое, составление и решение системы алгебраических уравнений марковского процесса.

Схема «гибели и размножения» позволяет анализировать вероятности событий при изменении времени отказов и восстановлений, она хорошо работает при анализе надежности систем однородных элементов.

В данной работе МГ рассматривается в виде совокупности как однородных, так и неоднородных систем, поэтому для приведения его во втором случае к однородному виду были использованы методы эквивалентирования [3], когда исходная система неоднородных элементов заменяется системой из однородных элементов. В качестве условий эквивалентирования рассматриваются равенства: числа исходных и эквивалентных элементов (ниток), суммарных производительностей и математических ожиданий значений производительности в аварийном простое в однородной и неоднородной системах.

Схема «гибели и размножения» используется для восстанавливаемых элементов и предполагает наличие резервов.

ЛЧ МГ состоит из n одинаковых (эквивалентных) ниток, резерв в общем случае не рассматривается. Облегченный и ненагруженный резервы ЛУ не может иметь в силу своих технологических особенностей. Здесь можно говорить только о нагруженном резерве, который хорошо моделируется учетом его в числе дополнительных рабочих ниток.

Время безотказной работы каждой нитки распределено по показательному закону с интенсивностью отказа λ .

КС ГС может состоять из $(n' + r)$ одинаковых ГПА соответствующего типа. Время безотказной работы каждого ГПА распределено по показательному закону, причем n' агрегатов может находиться в рабочем состоянии и иметь интенсивность отказа, равную λ' , r агрегатов может находиться в резерве и в этом состоянии не отказывать.

Схема «гибели – размножения» предусматривает, что каждый отказавший рабочий агрегат заменяется из резерва (из числа r), а каждый восстановленный агрегат поступает в резерв.

Каждый отказавший элемент (нитка или агрегат) ремонтируется одной ремонтной бригадой. Общее количество ремонтных бригад равно R для ЛЧ и R' для КС. Время ремонта распределено по показательному закону с интенсивностью восстановления μ для ЛЧ и μ' для КС. Если все ремонтные бригады заняты, то отказавший элемент становится в очередь и ожидает начала своего ремонта.

Работа таких систем может описываться процессом «гибели – размножения». Обозначим через P_k вероятность того, что в системе в момент t неисправны k элементов из n или n' , при этом вероятность P_k в общем случае определяется по формуле:

$$P_k = \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k} \cdot P_0,$$

где

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1}{\mu_1 \cdot \mu_2} + \dots + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k}}.$$

Для ЛЧ МГ параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = (n - k + 1) \cdot \lambda \text{ при } 0 < k \leq n,$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu, & \text{если } k \leq R \\ R \cdot \mu, & \text{если } k > R. \end{cases}$$

Для КС ГС параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = \begin{cases} n' \cdot \lambda', & 0 \leq k-1 \leq r \\ (n' + r - k + 1) \cdot \lambda', & r \leq k-1 \leq n' + r \end{cases}$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu', & \text{если } k \leq R' \\ R' \cdot \mu', & \text{если } k > R'. \end{cases}$$

Таким образом, для звеньев МГ определяются функции распределения пропускной способности ЛУ и КС, затем осуществляется их композиция. В результате находится конечная функция распределения пропускной способности МГ в целом, и определяются соответствующие показатели надежности.

Оптимизация технических параметров участка МГ от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск с учетом надежности. На основе ММ оптимизации технических параметров и участков МГ с учетом надежности [5] выполнены расчеты оптимальных параметров МГ «Сила Сибири» для 1-го этапа ее формирования — участка от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск протяженностью 2158 км. Максимальная производительность (Q) на конец строительства равна 38 млрд. м³, отборы газа не учитывались.

Следует отметить, что в данной ММ рассматривается структурная надежность МГ, а не надежность удовлетворения спроса. Поэтому варианты с недостаточной производительностью, так же как и с избыточной, не влияют на снижение или повышение надежности самого МГ, которая определяется только надежностными показателями элементов, формирующих МГ. Здесь производительность не сравнивается со спросом, а выбор оптимального варианта с недостаточной производительностью обусловлен предположением, что газ может быть доставлен до пункта назначения за счет увеличения давления.

Кроме того, авторы допускают, что в перспективе рассматриваемый МГ, как и весь проект ГТС «Сила Сибири» может не выйти на заявленную мощность, поскольку к этому может привести как снижение спроса, так и преждевременная выработка базовых месторождений.

Для расчета показателей надежности МГ использовались данные, приведенные в источниках [6, 9, 14]. Анализ данных по компрессорной части [6] показывает удовлетворительный уровень надежности различных модификаций ГПА-16 и низкий уровень надежности модификаций агрегатов ГПА-25 даже в период стабилизации эксплуатации в течение 3–4 лет после пуско-наладки и освоения (табл. 1), поэтому в дальнейших расчетах ГПА-25 не рассматривался. В исследовании была учтена

положительная оценка экономической эффективности внедрения усовершенствованного ГПА-16 нового типа [1]. Авторы не располагают достоверными данными по надежности ГПА-32. В работе [4] представлены экономические обоснования установки данного типа ГПА при строительстве и реконструкции КС. Однако, принимая во внимание тот факт, что при реализации компрессорной части МГ «Сила Сибири» в основном используются ГПА-16, а ГПА-32 предполагается установить лишь на последней КС, в расчетах он не рассматривался.

При определении нормативного уровня надежности МГ использован внутренний стандарт ПАО «Газпром» [10]. Согласно стандарту, коэффициент надежности МГ длиной от 2000 до 2500 км принимается равным 0,96 для одониточного исполнения, 0,97 для двухниточного и 0,98 – для МГ, состоящего из 3 ниток труб; МГ «Сила Сибири» реализуется в одониточном исполнении и в рамках исследования нормативный коэффициент надежности K_n принят равным 0,96.

Исходные варианты по ЛЧ выбирались из ниток труб диаметром 1220 и 1420 мм как с избыточной, так и недостаточной максимальной производительностью (Q) (табл. 2).

Таблица 1. Исходные надежностные и технико-технологические параметры ЛЧ и ГПА

Показатели	Диаметр труб, мм		Тип ГПА	
	1220	1420	Ц-16	Ц-25
Пропускная способность, млрд м ³ /год	13,5	30		
Мощность, МВт			16	25
Интенсивность отказов: 1/сут. км 1/сут. агр.	$0,173 \cdot 10^{-5}$	$0,548 \cdot 10^{-6}$	0,010	0,019
Интенсивность восстановлений, 1/сут.	0,553	0,296	0,249	0,061

Таблица 2. Техничко-технологические показатели вариантов ЛЧ участка МГ «Сила Сибири» «Чаяндинское — Благовещенск»

Кол-во ниток $\times$ D, мм	Q , млрд м ³
1 $\times$ 1420	30,0
1 $\times$ 1420+1 $\times$ 1220	43,5
3 $\times$ 1220	40,5

Исходные варианты по компрессорной части выбирались из устанавливаемой модификации ГПА мощностью 16 МВт с различными удельными капитальными вложениями и эксплуатационными издержками. Резерв по ЛЧ не учитывался, а ненагруженный резерв по КС не должен превышать числа устанавливаемых рабочих агрегатов.

Удельные капитальные вложения (КВ) в ЛЧ и КС МГ «Сила Сибири», а также эксплуатационные издержки (ЭИ), были рассчитаны на основе международных цен, полученных Международным банком развития на уровне 2000 г. Затем все экономические характеристики были пересчитаны на основе индексов удорожания цен на строительство

[13], полученных за 2000–2017 гг., и переведены в валюту по состоянию на 10.01.2018 г. (1 долл. = 57,05 руб.) (табл. 3).

Таблица 3. Техничко-экономические параметры труб и ГПА

Показатели	Диаметр труб		ГПА-16	
	1220	1420	1220	1420
Удельные металлоложения, тыс. т на 1 км	0,65	0,76		
Удельные КВ в ЛЧ, млн \$ на 1 км	3,41	5,00		
Удельные эксплуатационные расходы в ЛЧ, млн \$ на 1 км	0,15	0,22		
Удельные КВ, пропорциональные установленной мощности, млн \$ на 1 ГПА			49,35	56,77
Удельные ЭИ, пропорциональные установленной мощности, млн \$ на 1 ГПА			8,18	8,97

С учетом возможных вариаций по ЛЧ, КС и количества устанавливаемых резервных ГПА для рассматриваемого участка МГ от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск были рассчитаны и проанализированы 60 вариантов.

В табл. 4 приведены варианты по технико-технологическим условиям наиболее близкие к реализуемому ПАО «Газпром» проекту МГ, в частности, по числу устанавливаемых КС и длине линейных участков.

Таблица 4. Варианты реализации МГ «Чаяндинское — Благовещенск»

Число×тип ниток	Число КС	Число×сред. длина ЛУ, км	Число×тип раб. ГПА	Число×тип резерв. ГПА	Норматив	K_n
1×1420	8	8×260	6×ГПА-16	Без резерва	0,96	0,787
1×1420	8	8×260	6×ГПА-16	1×ГПА-16		0,909
1×1420	8	8×260	6×ГПА-16	2×ГПА-16		0,966
1×1420+ 1×1220	8	8×260	6×ГПА-16	Без резерва	0,97	0,788
1×1420+ 1×1220	8	8×260	6×ГПА-16	1×ГПА-16		0,908
1×1420+ 1×1220	8	8×260	6×ГПА-16	2×ГПА-16		0,963
1×1420+ 1×1220	8	8×260	6×ГПА-16	3×ГПА-16		0,983
3×1220	8	8×260	6×ГПА-16	Без резерва	0,98	0,788
3×1220	8	8×260	6×ГПА-16	1×ГПА-16		0,909
3×1220	8	8×260	6×ГПА-16	2×ГПА-16		0,965
3×1220	8	8×260	6×ГПА-16	3×ГПА-16		0,984

Полученный оптимальный вариант строительства МГ имеет наименьшие приведенные затраты 2902 млн \$ и коэффициент надежности $K_n = 0,966$, который соответствует нормативному значению. Данный вариант по техническим условиям хорошо

согласуется с реализуемым ПАО «Газпром» МГ от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск, а именно: включает одну нитку труб диаметром 1420 мм, 8 ЛУ и КС с установленными на них ГПА единичной мощностью 16 МВт (в т. ч. 6 рабочих и 2 резервных ГПА).

Результаты расчетов также показали высокую надежность вариантов, в которых используются от 2 до 3 единиц резервных ГПА для ниток труб как с недостаточной (1×1420 мм – 30 млрд м³), так и с избыточной ($1 \times 1420 + 1 \times 1220$ и 3×1220 – 43,5 и 40,5 млрд м³) производительностью (табл. 4).

С учетом анализа структурной надежности участка МГ «Сила Сибири» «Чаяндинское – Благовещенск», в силу однотипности условий строительства и применяемого оборудования полученные результаты можно распространить на весь МГ – от Ковыктинского месторождения до г. Благовещенск.

Принимая во внимание применяемые при строительстве МГ «Сила Сибири» современные высоконадежные технологии и оборудование [1, 4, 11, 12], можно предположить, что уровень его надежности будет выше нормативных и полученных в рамках исследования значений.

Заключение. Трасса исследуемого МГ пролегает в сложных природно-климатических условиях, что предъявляет особые требования к надежности его функционирования. На основе разработанной ММ оптимизации технических параметров проектируемого МГ с учетом надежности были выполнены исследования по рационализации структуры и оценке надежности МГ «Сила Сибири» от Чаяндинского месторождения до г. Благовещенск. Анализ результатов показал, что уровень надежности реализуемого МГ «Сила Сибири» в полной мере соответствует предъявляемым требованиям к природно-климатическим и геологическим условиям его строительства, и даже может быть выше значений, полученных при расчетах, принимая во внимание современные технологии и оборудование, применяемые при его строительстве.

Реализуемый проект МГ «Сила Сибири» недостаточно экономически обоснован, имеет неоднозначное значение как для экспорта природного газа в Китай, так и для развития Восточных регионов России, т.к. проходит через неосвоенные и мало заселенные территории. Учитывая транспортировку многокомпонентного природного газа до Амурского ГПЗ, находящегося в тысячах километрах от центра добычи, необходимо принимать во внимание возможные большие потери, в том числе ценных компонентов, что также ставит под сомнение всю ценность проекта.

В качестве альтернативного варианта реализации ГТС, в перспективе имеющего более выгодное социально-экономическое значение, предлагается МГ от Ковыктинского месторождения на юг Иркутской области, с выходом к китайской границе через Улан-Батор. Учитывая выбранное направление трассы, проходящее через освоенные и заселенные южные территории, реализация такого проекта могла бы создать реальные условия для газификации населенных пунктов, развития существующих и строительства новых современных газоперерабатывающих и газохимических производств как на территории Иркутской области, так и на Дальнем Востоке.

Исследование выполнено по проекту III.17.5.3 программы фундаментальных исследований СО РАН (AAAA-A17-117030310437-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюхин Р.Е. Оценка экономической эффективности внедрения ГПА-16У в Единую систему газоснабжения России. М.: Нефть и газ. 2015. № 12. С. 3–10.
2. Дзюбина Т.В., Илькевич Н.И. Оптимизация параметров МГ в рыночных условиях с учетом надежности // Известия РАН. Энергетика. 2002. № 3. С. 93–101.
3. Дубицкий М.А., Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах. Ангарск: Изд. АГТА. 2015. 365 с.
4. Зюзьков В.В. Методы повышения энергоэффективности компрессорных станций при реконструкции магистральных газопроводов. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Газпром ВНИИГАЗ. Москва. 2011. 133 с.
5. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука. 2014. 217 с.
6. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочник. Надежность систем газо- и нефтеснабжения. Т. 3. Кн. 2 / Под редакцией Сухарева М.Г. М.: Недра. 1994. 288 с.
7. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения / Дьяков А.Ф., Стенников В.А., Сендеров С.М. и др.; отв. ред. Воропай Н.И. Новосибирск: Наука. 2014. 284 с.
8. Надежность систем энергетики (Сборник рекомендуемых терминов). М: ИНЦ «Энергия». 2007. 192 с.
9. Основные технические решения по системе магистральных газопроводов Ямал – Запад. Этап 3. Разработка принципиальных решений по технологической схеме транспорта газа по системе газопроводов Ямал – Запад с учетом ее эксплуатации в едином технологическом режиме // Отчет по договору 143.11.11. Министерство газовой промышленности. НПО «Союзгазтехнология». ВНИИГАЗ. М.: 1988. 71 с.
10. СТО Газпром 2-2.1-512-2010. Обеспечение системной надежности транспорта газа и стабильности поставок газа потребителям. М.: Газпром экспо. 2011. 88 с.
11. <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/pipelines/built/ykv/>. Информация о проекте МГ «Сила Сибири».
12. <http://www.gazprom.ru/press/news/reports/2015/gazprom-wide/>. Интервью председателя правления ПАО «Газпром» В. Маркелова за 5 мая 2015 г.
13. http://www.gks.ru/free_doc/new_site/prices/stroit/tab11.xlsx. Индекс цен производителей на строительную продукцию 1995–2017. Росстат. 2018.
14. Ilkevich N.I., Dzyubina T.V. Determination of rational parameters of gas trunklines in terms of reliability and effectiveness of their investment projects // Proceedings of the Russian national symposium on power engineering. Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2001. Pp. 308–311.

STRUCTURAL RELIABILITY ASSESSMENT OF GAS SUPPLY SYSTEM WHICH FORMING ON FAR EAST OF RUSSIA

Tatiana V. Dzyubina

PhD., Senior Researcher, e-mail: tvleo@isem.irk.ru.

Nikolai I. Ilkevich

Doctor of engineering sciences, e-mail: ilkev@isem.irk.ru.

Nikolai V. Surnin

Researcher, e-mail: arsenik_s@mail.ru.

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 664033 Irkutsk, Lermontov street, 130.

Abstract. The relevance of the research is due to the meaningfulness of the gas trunkline "Power of Siberia" for the development of the Eastern regions of Russia: their gasification and the emergence of new gas chemical and related industries, as well as the requirements for the reliability of its operation associated with the complex climate and natural conditions. On the basis of mathematical model of optimization of technical parameters of the projected trunkline taking into account reliability and the developed computing programs researches on the choice of an optimal variant and assessment of reliability of the site of trunkline "Power of Siberia" from the Chayanda field to Blagoveshchensk were executed. The analysis of results showed – the received optimal variant of construction of the site of trunkline on specifications will be coordinated with the version of the gas pipeline realized by PJSC Gazprom. Level of its reliability is estimated as rather high. However, gas trunkline "Power of Siberia" has ambiguous value for socio-economic development of Siberia and Far East of Russian Federation and gas supplies to China.

Keywords: gas supply system, gas pipeline, «Power of Siberia», variants of development (construction), mathematical model, structural reliability assessment.

The research was carried out within the project III.17.5.3 of the Fundamental research program of SB RAS (AAAA-A17-117030310437-3).

References

1. Goryukhin R.E. Ocenka ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya GPA-16U v Edinuyu sistemu gazosnab-zheniya Rossii [Cost-effectiveness analysis of the GPA-16U introduction in Russian gas transmission system]. Moscow. Oil and gas. 2015. vol. 12. Pp. 3–10. (in Russian)
2. Dzyubina T.V., Ilkevich N.I. Optimizaciya parametrov MG v rynochnyh usloviyah s uchetom nadezhnosti [Optimization of the parameters of gas trunk line in market conditions, taking into account the reliability]. Izvestiya RAN. Energetika = Bulleyin of RAS. Energy Series. 2002. vol. 3. Pp. 93–101. (in Russian)
3. Dubitsky M.A., Rudenko U.N., Cheltsov M.B. Vybor i ispol'zovanie rezervov generiruyushchej moshchnosti v elektroenergeticheskikh sistemah [Selection and use of generating capacity reserves in electric power systems]. Angarsk: AGTA. 2015. 365 p. (in Russian)

4. Zyuzkov V.V. Metody povysheniya energoeffektivnosti kompressornyh stancij pri rekonstrukcii magistral'nyh gazoprovodov [Methods of energy efficiency raising of gas compressor stations during reconstruction of gas trunklines]. Ph.D thesis in engineering science. Moscow: Gazprom VNIIGAZ. 2011. 133 p. (in Russian)
5. Ilkevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina J.V. Mnogourovnevoe modelirovanie razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multi-level modeling of development of gas supply systems]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 217 p. (in Russian)
6. Nadezhnost' sistem energetiki i ih oborudovaniya [Reliability of energy systems and their facilities: Reference-book «Gas and oil supply systems reliability»]. Responsible editor Sukharev M.G. Moscow: Nedra. vol. 3. book 2. 1994. 288 p. (in Russian)
7. Nadezhnost' sistem energetiki: Problemy, modeli i metody ih resheniya [Energy systems reliability: Problems, models and methods of their solutions]. Dyakov A.F., Stennikov V.A., Senderov S.M. and others, responsible editor Voropai N.I. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 284 p. (in Russian)
8. Nadezhnost' sistem energetiki (Sbornik rekomenduemyh terminov) [Energy systems reliability (Collection of recommendable terms)] Moscow: INC Энергия = Energy. 2007. 192 p. In Rus.
9. Osnovnye tekhnicheskie resheniya po sisteme magistral'nyh gazoprovodov YAmal – Zapad. Etap 3. Razrabotka principial'nyh reshenij po tekhnologicheskoy skheme transporta gaza po sisteme gazoprovodov YAmal – Zapad s uchetom ee ekspluatatsii v edinom tekhnologicheskom rezhime [Main technical decisions for gas trunklines system «Yamal – West»]. Stage 3. Development of overriding decisions for technical gas transport scheme of gas trunklines system «Yamal – West» allowing for its operation in joint technological mode, Contract report 143.11.11, Ministry of gas industry. Moscow: NPO «Soyuzgaztekhnologia» VNIIGAZ. 1988. 71 p. (in Russian)
10. STO Gazprom 2-2.1-512-2010. Obespechenie sistemnoj nadezhnosti transporta gaza i stabil'nosti postavok gaza potrebitelyam [Company standart 2-2.1-512-2010. Maintenance of system reliability for gas transport and stability of gas supply of consumers]. Moscow: Gazprom expo. 2011. 88 p. (in Russian)
11. <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/pipelines/built/ykv/>. Information about project specification of «Power of Siberia» gas trunkline.
12. <http://www.gazprom.ru/press/news/reports/2015/gazprom-wide/>. Interview with V. Markelov, chairman of the board of Gazprom. 5 May 2015.
13. http://www.gks.ru/free_doc/new_site/prices/stroit/tab11.xlsx. Producer price index for construction product in 1995–2017. Rosstat. 2018.
14. Ilkevich N.I., Dzyubina T.V. Determination of rational parameters of gas trunklines in terms of reliability and effectiveness of their investment projects // Proceedings of the Russian national symposium on power engineering. Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2001. Pp. 308–311.

**О ПРИМЕНЕНИИ ЕДИНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИКИ НА УРОВНЕ
СТРАНЫ И ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ**

Агафонов Глеб Владимирович

К.т.н., старший научный сотрудник, научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: gleb@isem.irk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты апробации нового подхода к моделированию взаимосвязей между энергетикой и экономикой, основанного на использовании теории систем при выполнении долгосрочного прогнозирования национальной экономики России. Автор описывает модель, дает схему взаимосвязей, уточняет последовательность модельных расчетов и делится опытом разработки модели на основе агрегированного представления национальной экономики России. Также оцениваются возможности использования разработанного подхода к моделированию экономики отдельных регионов и территорий и формулируются требования к исходным статистическим данным, необходимым для построения моделей.

Ключевые слова: теория систем, хозяйственный комплекс (ХК), прогнозные показатели, валовый выпуск, инвестиционная политика.

Цитирование: Агафонов Г.В. О применении единой динамической модели для прогнозирования развития энергетики и экономики на уровне страны и отдельных регионов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 101–111. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-09

Введение. Важным инструментом в системе управления хозяйственным комплексом (ХК) является прогноз экономического развития страны и отдельных регионов. Существуют достаточно много методических подходов для разработки прогнозов, различающихся, во-первых, горизонтом прогнозирования, а во-вторых, приемами и методами прогнозных расчетов, включающих как формирование моделей, так и выполнение самих этих расчетов [6–10]. Необходимо отметить, что большинство известных подходов основано на использовании систем моделей, основным недостатком которых является субъективное отделение «экономики» от «отраслевых систем» [7–9]. Подобное деление приводит к неизбежному разрыву объективно существующих взаимосвязей между моделируемыми экономическими системами и в конечном итоге - к неполноте учета их реальных взаимосвязей. Это особенно важно при прогнозировании развития «систем энергетики» (отраслей топливно-энергетического комплекса - ТЭК), поскольку связи с ТЭК пронизывают все отрасли ХК. В данной статье автором рассматривается возможность использования для целей долгосрочного прогнозирования взаимосвязанного развития экономики и энергетики на базе подхода, изложенного в [11]. Этот подход основывается на формировании последовательности состояний ХК как макроскопической динамической линейной распределенной системы с одной степенью свободы. Модели, построенные в рамках этого

подхода, характеризуются системной взаимозависимостью большинства прогнозируемых показателей, причем все эти показатели рассчитываются совместно в рамках одной общей модели, а не системы моделей.

1. Исходные методические предпосылки. Долгосрочное прогнозирование – первая стадия системных исследований и обоснования перспектив развития энергетики, предваряющая разработку Энергетической стратегии России. В настоящее время такое прогнозирование выполняется посредством использования комплексов разного рода экономико-математических моделей и последующей увязке их решений в ходе итерационных расчетов. Подробный и содержательный обзор таких методов прогнозирования приводится в работе Кононова Ю.Д. [7, стр. 29-41]. Существенным недостатком такого подхода являются его громоздкость, трудоемкость практической реализации и довольно ограниченный горизонт прогнозирования - 15-25 лет. Даже при современном уровне развития вычислительных средств и наличии современных информационных технологий, которые дают возможность создавать комплексы моделей любой сложности, а также осуществлять автоматизацию расчетов на таких комплексах (что весьма сложно и трудно реализуемо), остается проблема отладки информационного взаимодействия таких комплексов моделей.

Представляется необходимым поиск иных подходов, при которых многомодельный комплекс удалось бы заменить единой моделью. В такой модели на каждом временном шаге должен рассчитываться широкий набор прогнозируемых показателей в их системном взаимодействии между собой, и эти рассчитанные значения должны быть исходными данными для следующего временного шага. Элементы такого подхода уже присутствовали в ряде работ, выполнявшихся в ИСЭМ [1–5].

В теории систем широко используется подход, позволяющий прогнозировать последовательность состояний динамических систем с помощью так называемого «уравнения перехода», связывающего значения переменных, описывающих объект в его предшествующем и текущем состоянии. Как показано в работе [11], ХК с его отраслями и регионами может быть отождествлен с одним из простейших, хорошо изученных объектов теории систем, а именно линейной макроскопической распределенной динамической системой с одной степенью свободы. Прогнозируя последовательность состояний такой системы, мы очевидным образом получаем последовательность состояний описываемого ею ХК.

Высокая степень взаимообусловленности прогнозируемых показателей существенно упрощает и саму процедуру прогнозирования, которая сводится к заданию исследователем инвестиций в каждую из моделируемых отраслей. Этот выбор распределения инвестиций между отраслями осуществляется с учетом тех или иных содержательных условий и ограничений, которые зависят от конкретных постановок содержательных задач. Перечисленные особенности позволяют оперативно подготавливать и реализовывать на модели множество разных имитационных расчетов с одновременной интерпретацией получаемых результатов.

С точки зрения описания связей между «экономикой и энергетикой» не требуется как-то «по-особому» организовывать их внутримодельное взаимодействие, потому что в макроскопической модели все отрасли (энергетические, неэнергетические – и вообще какие бы то ни было) совершенно равноправны, описываются одними и теми же уравнениями и,

лишь в зависимости от конкретно решаемой содержательной задачи, мы можем объединять уже полученные на очередном шаге прогнозные показатели отраслей в те или иные, нужные нам, агрегаты. Следует отметить, что на саму вычислительную процедуру прогнозирования такой «содержательный выбор» никак не влияет.

Макроскопический подход означает, что моделируемая система складывается из большого числа подобных ей неделимых «элементарных подсистем». В нашем случае роль такой элементарной подсистемы выполняет j -я отрасль (вид экономической деятельности) k -го региона ХК. Выполняя прогнозные расчеты валовых выпусков и всех видов затрат для каждой такой подсистемы, мы можем на каждом шаге получать прогнозные значения этих показателей для любой интересующей нас части ХК: как выделенной нами по территориально-региональному признаку, так и по содержательно-отраслевому.

2. Параметрическая идентификация и использование модели. Для формирования модели необходима предварительная работа по ее параметрической идентификации (подробнее см. в [11]) на основе имеющихся ретроспективных данных объекта, т. е. рассчитываются численные значения приростных инвестиционных отдач (ПИО), а также затратно-емкостей валовых выпусков отраслей.

В соответствии с формулировкой модели [11] объект моделирования описывается в ежегодной динамике следующими показателями:

- объем инвестиций;
- валовый выпуск.

Помимо этих показателей для формирования модели требуется комплекс всех видов удельных затрат, рассчитываемых по ретроспективным данным: общие, материальные и энергетические затраты на производство продукции, а также ретроспективные данные счетов производства.

Важнейшим и наиболее ответственным этапом при формировании модели и проведении расчетов является задание инвестиционных политик (задаваемых условий, сценариев развития). На уровне страны может рассматриваться множество сценариев долгосрочного развития экономики, различающихся, прежде всего, стратегическими целями, в частности - темпами роста валового внутреннего продукта (ВВП), а также величиной и распределением инвестиций в основной капитал по отраслям.

Для региона наряду с вышеупомянутыми стратегическими целями множество инвестиционных политик может быть дополнено детальным рассмотрением отдельных территорий: ТПК, кластеров и т.п. с выделением в них отдельных отраслей и видов деятельности (к примеру - отраслей энергетики, отраслей, обеспечивающих инновационное развитие территорий, крупных инфраструктурных проектов и т.п.) и соответственно задаваемых условий (сценариев) развития объектов ХК и ТЭК. Вместе с тем, модель предполагает широкое варьирование и других инвестиционных политик, которые могут определяться различными целями, как-то: экспортной ориентацией, расширением (сворачиванием) объемов производства в зависимости от ожидаемого появления новых технологий, складывающегося спроса и т.п. Заметим, что способ математического описания ввода новых технологий в отрасли детально изложен в [11].

Модель настраивается на задаваемые исследователем показатели, а расчеты на модели позволяют получить, наряду с прогнозом валового выпуска, целый комплекс выходных и расчетных прогнозных показателей:

- добавленную стоимость (ДС), которая рассчитывается как разность между валовым выпуском и материальными затратами, являясь важнейшей составной частью ВВП;
- валовую прибыль (рассчитывается как разность между валовым выпуском и общими затратами);
- затраты на топливо, электро- и теплоэнергию, а также их натуральное потребление (включая и оценки конечного потребления);
- оценку фонда заработной платы и численности занятых;
- показатели топливо-энергоемкости ВВП и другие производные показатели.

Переход от стоимостных показателей к натуральным осуществляется посредством расчета цепочки индексов затрат с последующей подстановкой в качестве начального значения показателя натурального потребления соответствующего ресурса (а не его стоимостного эквивалента затрат, который использовался для расчета индексов).

Важно отметить, что доля вклада по видам деятельности и отдельным отраслям в валовый выпуск и в ВВП, а, следовательно, и во все остальные показатели ХК, не остаётся постоянной, потому что распределение ежегодных инвестиций между ними выбирается исследователем в зависимости от рассматриваемой политики. В силу этого отраслевая структура валового выпуска (а значит и ВВП, а также всех видов затрат – в том числе топливно-энергетических) будет получаться различной.

Полученные вышеописанным путём оценки показателей (т.е. валовых выпусков, затрат по их видам, добавленных стоимостей и валовых прибылей), скорее всего, будут иметь грубо-приближённый характер, т.е. проверочные расчеты ретроспективы могут дать отклонения от фактических данных на десятки процентов. Это объясняется очень высокой дисперсией (мерой рассеяния) практически всех статистически идентифицируемых удельных величин, которые, вместе с тем, не являются функциями времени (доверительные интервалы для коэффициентов корреляции содержат нулевую точку).

Некоторое повышение качества прогноза может быть достигнуто посредством агрегирования (суммирования) уже рассчитанных прогнозных показателей по какому-нибудь одному из номенклатурных признаков: «тип» (принадлежность к определённому виду деятельности), либо «месторасположение» (принадлежность к определённому региону). При суммировании по «типам» мы получим прогнозные показатели регионов (но уже без подразделения регионов на отдельные отрасли), при суммировании по «месторасположениям» – прогнозные показатели отраслей (но уже без подразделения отраслей на отдельные регионы).

Такое агрегирование носит вынужденный характер, оно приводит к потере мнимой «детализации» прогноза, но зато обеспечивается взаимная компенсация погрешностей при суммировании большого количества разнонаправленно искаженных величин. Расчеты подтверждают, что агрегированные прогнозные показатели лучше согласуются с фактическими данными, чем их отдельные не агрегированные составляющие.

Необходимо подчеркнуть, что агрегирование должно проводиться именно на завершающем этапе прогнозных расчетов, т.е. уже после получения «детализированной» прогнозной информации (но никак не на этапе предварительного расчета исходных удельных величин). Иначе рассчитываемые таким образом удельные величины окажутся зависящими от ежегодно меняющейся структуры отраслей и не будут пригодны для долгосрочного прогноза.

3. Возможные объекты моделирования и требования к исходной статистической информации. Важнейшим моментом, влияющим на степень трудоемкости формирования и работы с моделью ХК, является степень ее детализации, т.е. количество тех рассматриваемых подсистем ХК (далее – объектов модели), из которых складывается ХК в целом, как всей страны в целом (РФ), так и в случае отдельно взятого региона. В качестве таких объектов можно рассматривать: виды экономической деятельности в номенклатуре ОКВЭД с разной степенью их агрегации, отдельные отрасли и подотрасли в двухбуквенной номенклатуре ОКВЭД, а также государственные инновационные программы, особенно в области энергетики, крупные инвестиционные проекты и т.п. Определяющими моментами при выборе степени детализации объектов моделирования являются, во-первых, поставленные цели исследования и решаемые при этом задачи, а во-вторых, наличие исходной информации по этим объектам.

В качестве конкретного тестового объекта моделирования был взят хозяйственный комплекс Российской Федерации (ХК РФ), так как только для него удалось найти статистическую отчетность, охватывающую во всей совокупности все необходимые показатели для первичной идентификации параметров модели. При наличии аналогичной статистической отчетности по регионам России можно выполнить расчеты и для отдельно взятых регионов.

Источниками исходной статистической информации являлись имеющиеся в наличии сборники Госкомстата «Национальные счета России», «Инвестиции в России» и «Структура и основные показатели деятельности Хозяйствующих субъектов». Однако для использования вышеперечисленной информации требуются ее дополнительные преобразования, связанные с итерационным пересчетом вертикальных и горизонтальных невязок, возникающих при совмещении данных из разных сборников (посредством наложения структур), поскольку в первых двух сборниках представлена информация по полному кругу предприятий, а в третьем – только по крупным и средним. Получаемую в результате такого пересчета совмещенную отчетную форму можно охарактеризовать как «объединенный счет производства и образования доходов с детализированной номенклатурой промежуточного потребления и сведениями о получаемых инвестициях» (рис. 1).

Наименования видов деятельности	Инвестиции в основной капитал	Выпуск в основных ценах	в том числе													валовая добавленная стоимость	в том числе		
			промежуточное потребление (материальные затраты)	в том числе								оплата труда наемных работников	другие чистые налоги на производство	валовая прибыль экономики и валовые смешанные доходы					
				Электроэнергия	Теплоэнергия	Другие виды энергии	Уголь	Нефтепродукты	Газ	Другие виды топлива	Газ на отопление и нужды				Сырье и материалы		Прочие материальные затраты		
1																			
2																			
...																			
7																			
Всего																			

Рис. 1. Фрагмент совмещенной отчетной формы

Одной из дополнительных проблем, связанных с исходными данными, является частичное несовпадение представленной номенклатуры отраслей в отчетных данных трех сборников (инвестиций, валовых выпусков и затрат на производство) – что также затрудняет идентификацию параметров модели.

Это не только значительно затруднило работу над первичной исходной информацией, но главное – существенно ограничивало возможность максимальной детализации номенклатуры видов деятельности, что важно для полноты описания модели. По этой причине в качестве моделируемых объектов из рассмотрения исключался ряд таких видов деятельности, которые по своему содержательному смыслу тесно связаны с энергетикой и их наличие в модели было бы крайне желательно. Однако приходилось рассматривать их лишь в агрегированном виде в составе укрупненных видов деятельности.

Кроме этого, для окончательного перехода от расчетных стоимостных показателей ТЭР к натуральным требовалась информация по их конечному потреблению в детальной номенклатуре. В Российском статистическом ежегоднике (РСЕ) последних лет такая информация имеется в Балансах энергоресурсов, однако, лишь с расшифровкой только двух укрупненных видов экономической деятельности по ОКВЭД – **С**- добыча полезных ископаемых и **Д** - обрабатывающие производства, а большинство остальных видов представлены в агрегированном виде одной строкой. Учитывая трудоемкость процедуры первичной идентификации параметров модели ХК РФ, а также исходя из требований компактности экспериментальной модели было принято решение о формировании и апробации ее только по 7 агрегированным видам деятельности (табл. 1).

Таблица 1. Агрегирование видов экономической деятельности (ВД)

Номер ВД	Коды ВД	Наименование видов деятельности
1	Разделы (А+В)	СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, ОХОТА И ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО, РЫБОЛОВСТВО, РЫБОВОДСТВО
2	Раздел С	ДОБЫЧА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
3	Раздел D	ОБРАБАТЫВАЮЩИЕ ПРОИЗВОДСТВА
4	Раздел E	ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ГАЗА И ВОДЫ
5	Раздел F	СТРОИТЕЛЬСТВО
6	Раздел I	ТРАНСПОРТ И СВЯЗЬ
7	Разделы (G+H+J+K+L+M+N+O+P)	ПРОЧИЕ ВИДЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

4. Апробация модели. После определения перечня объектов и расчета для них необходимых показателей формировалась и сама модель в виде цепочки рекуррентных зависимостей. На этой модели ХК РФ была проведена серия расчетов по ее апробации, целью которой были: проверка работоспособности модели, предварительная оценка ее возможностей и формулировка требований к необходимой для ее формирования исходной статистической информации. Процесс формирования модели и реализация расчетов осуществлялись следующим образом. На основе имеющегося официального макропрогноза экономики страны задается какой-либо из сценариев перспективного ее развития в форме показателей темпов роста ВВП для ХК РФ в целом, а также для каждого из 7 видов деятельности. Исходя из стратегических целей сценария, путем задания темпов инвестирования каждого объекта в отдельности формируется динамика распределения общих инвестиций между рассматриваемыми объектами ХК и рассчитываются валовые

выпуски по каждому объекту с выведением их на заданные параметры сценария. Инвестиции выбирались так, чтобы обеспечить заданные темпы роста ВДС.

Затем, с помощью нормативных коэффициентов, предварительно рассчитанных по ретроспективным данным, вычисляются все виды затрат на этот выпуск: общих затрат, затрат трудовых ресурсов, материальных затрат с выделением каждого из используемых топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), в данном примере это - 4 вида топлива и 3 вида энергии (рис. 2). Рассчитанные по каждому объекту в отдельности они затем суммируются, формируя итоговые показатели по ХК в целом. По полученным стоимостным характеристикам для каждого объекта и по каждому виду затрат (в частности 7 видов ТЭР), рассчитываются ежегодные индексы физического объема затрат.

Далее осуществляется переход от показателей в стоимостном измерении к натуральным. Расчет основывается на допущении о совпадении индексов физического объема материальных затрат с индексами физического объема потребления, что вполне допустимо в рамках неопределенности используемой в модели информации. Необходимо отметить, что здесь имеются как минимум три источника неопределенности прогноза: 1) неопределенность удельных величин, оценки которых получены по ретроспективным данным; 2) неопределенность будущих инвестиционных сценариев; 3) неопределенность времени начала и продолжительности периодов переходов рассматриваемых объектов на новые технологии. Первый и третий вид неопределенности могут быть частично устранены посредством детализации многовариантных прогнозных расчетов, а второй - путем привлечения математических методов оценки меры рассеяния идентифицированных удельных показателей и всех прогнозных величин, получаемых с их участием.

Для перехода к натуральным показателям берется начальное значение потребляемого ресурса (вида ТЭР, численности занятых и т.п.) и с помощью цепочки ежегодных индексов рассчитываются физические объемы их потребления в натуральных единицах измерения на любой из рассматриваемых периодов, в частности, до 2050 года. В результате получают и показатели конечного потребления ТЭР.

Изменение соотношения между видами потребляемых ТЭР в ХК осуществляется моделью автоматически за счет изменений в структуре инвестиций, а значит, и в структуре соответствующих энергопотребляющих объектов. Напомним, что доля вклада по видам деятельности и отдельным отраслям в валовой выпуск (а, следовательно, и во все остальные показатели ХК) не остаются постоянными, потому что распределение ежегодных инвестиций между ними может варьироваться в зависимости от рассматриваемой политики различными темпами и соответственно - их объемами. Соответственно и структура отраслей будет получаться различной.

На этом примере были отлажены и апробированы различные варианты формирования показателей исходной информации:

- расчеты ПИО и удельных затрат различными способами, в частности, с использованием просто средних значений, или скользящей средней с различным охватом ретроспективы;
- задание различными способами инвестирования – по долям от прироста общих инвестиций, индивидуальными темпами инвестирования, а также варьированием темпов инвестирования по годам, отдельным интересующим периодам и т.п.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета по модели ХК РФ в сравнении с результатами расчетов по 5-летним периодам, взятыми из работы [8, стр. 175 и 183] – прогноз по 7 видам деятельности на 2050 год, данные валовых выпусков продукции и потребления электрической энергии.

Таблица 2. Динамика роста производства по видам деятельности к 2010 г., %

Вид деятельности	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2050 г.
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	110/0,95	121/0,82	132/0,85	145/0,88	160/0,9	211/1
Добыча полезных ископаемых	102/0,96	104/0,95	106/0,96	108/0,97	110/0,97	117/1
Обрабатывающие производства	118/1,08	139/0,93	164/0,91	194/0,9	230/0,91	380/1
Производство и распределение электроэнергии, газа, воды	106/1,05	113/0,97	120/0,95	127/0,94	135/0,93	160/1
Строительство	123/1,1	152/0,9	187/0,85	230/0,8	283/0,82	523/1
Транспорт и связь	116/1,09	134/0,97	154/0,95	177/0,94	204/0,94	306/1
Прочие	121/1,08	146/0,98	176/0,96	213/0,94	256/0,94	446/1
Всего по экономике	117/1,08	138/0,95	162/0,93	191/0,91	226/0,92	374/1

Примечание: в числителе - расчет по модели в %, в знаменателе - в долях единицы к прогнозу из [8]

Таблица 3. Динамика потребления электроэнергии рассчитанная на модели

	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2050 г.
Потребление электроэнергии, млрд кВт·ч	1114	1215	1326	1445	1573	2000
В долях единицы к прогнозу из [8]	1,014	0,999	0,993	1,032	1,002	1,000

Как следует из приведенных данных, отклонение полученных результатов не превышает 30 %, что вполне приемлемо, учитывая дальность горизонта прогнозирования.

Закключение. Апробация на примере ХК РФ показала, что полученные значения вышеприведенного комплекса показателей вполне удовлетворительно согласуются с аналогичными прогнозными значениями, приведенными в [8, стр. 175 и 183].

Достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что модели, которые могут быть построены вышеописанным образом, обладают необходимой степенью системной взаимосвязанности и «балансовой непротиворечивости» – что вытекает из самого принципа их построения («всё зависит от всего»). Независимо от приоритетов, задаваемых той или иной конкретной постановкой задачи, в результате прогнозных расчетов получается большинство системно взаимосвязанных социально-экономических показателей. Важно также отметить, что этот же круг показателей традиционно отражается и в сборниках, издаваемых статистическими органами.

Существенным недостатком описанной реализации модели ХК РФ (но не самого модельного подхода) является то, что рассчитанные затратные характеристики в ряде подотраслей (объектов модели) не учитывают те энергоресурсы, которые используются в качестве сырья и материалов. Это связано с тем, что в имевшихся в нашем распоряжении показателях затрат были представлены лишь энергозатраты на конечное потребление. Другими словами – для полного учета потребления всех ТЭР (на преобразование в другие виды топлива и энергии, на нетопливную продукцию и на нетопливные нужды) необходима взаимно-сопоставимая детализация видов деятельности и видов затрат, то есть данная

экспериментальная модель с агрегированием в 7 видов деятельности позволяет получать прогноз ТЭР лишь в части их конечного потребления в рамках рассматриваемого ХК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Г.В., Кузьмин Ю.Н., Цапах А.С. Технология прогнозирования энергетики и экономики региона с помощью замкнутых моделей // Труды Всероссийской конференции «Математические и информационные технологии в энергетике, экономике, экологии». Часть 1. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2003. С. 22–29.
2. Агафонов Г.В., Цапах А.С. Развитие подходов к долгосрочному прогнозированию энергетики и экономики // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть 1. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2013. С. 65–70.
3. Корнеев А.Г., Агафонов Г.В., Цапах А.С. Применение рекуррентной имитационной модели для прогнозирования энергетики и экономики региона при разработке региональных энергетических программ // Труды Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии». Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2004. С. 53–62.
4. Корнеев А.Г., Агафонов Г.В., Цапах А.С. Моделирование и учет связей экономики и энергетики при прогнозировании социально-экономического развития региона // Пространственная экономика. Хабаровск: ИЭИ ДВО РАН. 2005. № 2. С. 80–92.
5. Корнеев А.Г., Агафонов Г.В., Цапах А.С. Моделирование связей экономики и энергетики и оценка социально-экономических последствий от реализации энергетических стратегий и проектов в регионе // Изв. РАН. Энергетика. 2006. №3. С. 127–133.
6. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
7. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Новосибирск: Наука. 2015. 147 с.
8. Макаров А.А. Системные исследования развития энергетики: курс лекций. М.: Издательский дом МЭИ. 2015. 280 с.
9. Методы и модели разработки региональных энергетических программ / Б.Г. Санеев, А.Д. Соколов, Г.В. Агафонов и др. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
10. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2010. С. 418–429.
11. Цапах А.С. Прогнозирование последовательности состояний хозяйственного комплекса как динамической линейной распределенной макроскопической системы с одной степенью свободы // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 3. С. 65–70. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-65-70

THE APPLICATION OF SINGLE DYNAMIC MODEL TO FORECAST ENERGY AND ECONOMIC DEVELOPMENT AT THE NATIONAL AND REGIONAL LEVELS

Gleb V. Agafonov

PhD., Senior Researcher

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: gleb@isem.irk.ru

Abstract. The paper presents the testing results of a new approach to the modeling of interrelations between energy industry and economy with the use of the theory of systems in long-term forecasting of Russia's national economy. The authors briefly describe the model, give a scheme of interrelations, specify the sequence of model calculations, and share the experience of the model development based on the aggregate representation of Russia's national economy. The main results of the model testing concern the efficiency of the model. Also, the possibilities of using the developed approach to the modeling of the economies of certain regions and territories are assessed, and the requirements for the initial statistical data necessary for the construction of the models are formulated.

Keywords: the theory of systems, economic complexes, forecast indicators, Gross Domestic Product, investment policy

References

1. Agafonov G.V., Kuzmin Yu.N., Tsapakh A.S. Tehnologiya prognozirovaniya energetiki i ekonomiki regiona s pomoshyu zamknutih modelei [A technology for forecasting the regional energy sector and economy using closed models] // Proceedings of the All-Russian Conference "Mathematical and Information Technologies in the Energy, Economy, Ecology". Part 1. Irkutsk: ESI SB RAS. 2003. Pp. 22–29. (in Russian)
2. Agafonov G.V., Tsapakh A.S. Razvitie podhodov k dolgosrochnomu prognozirovaniyu energetiki i ekonomiki [Development of approaches to long-term forecasting of energy and the economy] // Proceedings of the XVIII Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management." Part 1. Irkutsk: ESI SB RAS. 2013. Pp. 65–70. (in Russian)
3. Korneev A.G., Agafonov G.V., Tsapakh A.S. Primenenie rekurentnoi imitacionnoi modeli dlya prognozirovaniya energetiki i ekonomiki regiona pri razrabotke regionalnih energeticheskikh program [Application of a recurrent simulation model for forecasting the regional energy sector and the economy to develop regional energy programs] // Proceedings of the Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies". Irkutsk: ESI SB RAS. 2004. Pp. 53–62. (in Russian)

4. Korneev A.G., Agafonov G.V., Tsapakh A.S. Modelirovanie i uchet svyazei ekonomiki i energetiki pri prognozirovanii socialno-ekonomicheskogo razvitiya regiona [Modeling and considering the relationship between the economy and the energy sector when forecasting the socio-economic development of the region] // Spatial Economics. Khabarovsk: ERI FEB RAS. 2005. No 2. Pp. 80–92. (in Russian)
5. Korneev A.G., Agafonov G.V., Tsapakh A.S. Modelirovanie svyazei ekonomiki i energetiki i ochenka socialno-ekonomicheskikh posledstviy ot realizacii energeticheskikh strategii i proektov v regione [Modeling the relationship between the economy and the energy sector and assessing the socio-economic implications of energy strategies and projects in the region] // Proceedings of RAS. Power Engineering. 2006. No 3. Pp. 127–133. (in Russian)
6. Kononov Yu.D. Metodi i modeli prognoznih issledovaniy vzaimosvyazei energetiki i ekonomiki / U.D. Kononov, E.V. Galperova, D.U. Kononov [Methods and models for predictive studies of the relationship between the energy sector and the economy] / Yu.D. Kononov, E.V. Galperova, D.Yu. Kononov. Novosibirsk: Nauka. 2009. 178 p. (in Russian)
7. Kononov U.D. Puti povisheniya obosnovannosti dolgosrochnih prognozov razvitiya TEK [Ways to increase the validity of long-term energy development forecasts]. Novosibirsk. Nauka. 2015. 147 p. (in Russian)
8. Makarov A.A. Sistemnie issledovaniya razvitiya energetiki: kurs lektsii [Systems studies of energy development: a course of lectures]. M.: Izdatelskii dom MEI. 2015. 280 p. (in Russian)
9. Metodi i modeli razrabotki regionalnih energeticheskikh program / B.G. Saneev, A.D. Sokolov, G.V. Agafonov i dr. [Methods and models for the development of regional energy programs] / B.G. Saneev, A.D. Sokolov, G.V. Agafonov et al. Novosibirsk. Nauka = Science. 2003. Pp. 42–55. (in Russian)
10. Sistemnie issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnih napravlenii SEI-ISEM / red. N.I. Voropai [Systems studies in the energy sector: A retrospective view of scientific areas of SEI-ESI] /ed. by N.I. Voropai. Novosibirsk. Nauka = Science. 2010. Pp. 418–429. (in Russian)
11. Tsapakh A.S. Prognozirovaniye posledovatelnosti sostoyaniy hozyastvennogo kompleksa kak dinamicheskoi lineinoi raspredelennoi makroskopicheskoi sistemi s odnoi stepenyu svobody [Forecast of the state flow in a household complex as a dynamic linear distributed macroscopic system with one level of freedom // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2017. vol. 7. No 3. Pp. 65–70. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-65-70 (in Russian)

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА АЛГОРИТМОВ И ОТКРЫТАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ALGOWIKI¹

Антонов Александр Сергеевич

К.ф.-м.н., вед. н. с.,

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова,
119234 г. Москва, Ленинские горы, д.1 стр.4, e-mail: asa@parallel.ru

Аннотация. В статье рассматриваются различные подходы к изучению информационной структуры алгоритмов. Одним из наиболее развитых подходов является построение и анализ информационных графов, называемых также графами алгоритмов. Информационный граф содержит всю необходимую информацию об информационных зависимостях, поэтому он может служить основой для обнаружения множества различных свойств исследуемого алгоритма. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов AlgoWiki реализует в сети Интернет описание свойств различных вычислительных алгоритмов. Основой описания многих базовых свойств алгоритма в рамках AlgoWiki является информационный граф. В рамках данной работы разрабатывается программное средство AlgoView, позволяющее строить интерактивное трёхмерное представление информационного графа и встраивать его на страницы Открытой энциклопедия AlgoWiki.

Ключевые слова: Информационная структура, параллелизм, граф алгоритма, AlgoWiki, визуализация, AlgoView.

Цитирование: Антонов А.С. Информационная структура алгоритмов и открытая энциклопедия AlgoWiki // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 112–121. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-10

Введение. Изучение информационной структуры алгоритмов необходимо для их успешной адаптации к архитектуре современных высокопроизводительных вычислительных систем. Умение определять, описывать и анализировать свойства алгоритмов критически важно как для суперкомпьютеров экзафлопсного уровня производительности, так и для мобильных вычислительных устройств. Существуют различные подходы к изучению информационной структуры алгоритмов. В одних подходах анализируется запись алгоритма в виде последовательности математических формул, другие рассматривают блок-схему алгоритма или его запись на некотором псевдоязыке, во многих случаях рассматривается запись реализации алгоритма на некотором реальном языке программирования. Анализ реализации алгоритма имеет тот недостаток, что на свойства алгоритма накладываются ограничения и особенности используемого языка программирования, однако этот подход часто используется на практике, поскольку описания алгоритмов в виде программ (или фрагментов программ) широко распространены, а процесс анализа программных реализаций

¹ Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант 19-07-01030. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

зачастую можно частично или полностью автоматизировать, как это делалось, например, в системе V-Ray [15], разработанной в НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова.

Анализ способов вычисления арифметических выражений [1] или исследование только ациклических участков программ не могут быть признаны достаточными, поскольку основной ресурс параллелизма программ сосредоточен в циклах. Методам анализа циклических конструкций и пространства итераций также уделено много внимания, например, в работах [7, 12 – 14]. В настоящее время ряд исследовательских групп идёт по пути изучения типовых алгоритмических структур (например, [10]), но большинство этих методов имеют только ограниченную применимость и не описывают весь потенциал параллелизма исследуемого фрагмента программы.

Для избавления от указанных недостатков применяют подходы, ориентированные на использование графовых моделей программ [5]. В них в соответствие исследуемому фрагменту программы ставится некоторый граф, вершины и дуги которого могут нести различную смысловую нагрузку. В зависимости от выбранной смысловой нагрузки получают различные типы графовых моделей, исследование которых даёт информацию о структуре анализируемого фрагмента программы.

Информационный граф как основа изучения информационной структуры алгоритмов. Одним из наиболее развитых подходов к исследованию информационной структуры является построение и анализ информационных графов, называемых также графами алгоритмов [2, 3]. Под информационным графом понимается ациклический ориентированный граф, вершины которого соответствуют отдельным срабатываниям операторов программы, а дуги - истинным информационным зависимостям между ними. Информационный граф содержит всю необходимую информацию об информационных зависимостях, поэтому он может служить основой для обнаружения множества различных свойств исследуемого алгоритма. В [4] доказано, что для достаточно широкого класса программ можно найти компактное параметрическое описание отвечающих им информационных графов. Наличие таких описаний позволяет проводить автоматический анализ исследуемых программ.

Открытая энциклопедия свойств алгоритмов AlgoWiki. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов AlgoWiki [6, 16] – это проект создания портала в сети Интернет, в рамках которого по единой схеме описываются свойства (в первую очередь, связанные с параллелизмом) различных вычислительных алгоритмов. Главной целью энциклопедии является исчерпывающее описание алгоритмов, которое помогает оценить их потенциал применительно к конкретной параллельной вычислительной платформе.

Все вычислительные алгоритмы в энциклопедии AlgoWiki описываются согласно единой структуре (см. рис. 1). Описание алгоритма состоит из двух частей, в первую часть включены разделы, связанные с машинно-независимыми свойствами алгоритмов, а во вторую – разделы, связанные с реализациями исследуемого алгоритма для различных программно-аппаратных платформ. Свойства, описанные в первой части, характеризуют сам анализируемый алгоритм и не должны изменяться при смене вычислительной парадигмы.

Основой описания многих базовых свойств алгоритма в рамках AlgoWiki является информационный граф.

- 1 Свойства и структура алгоритмов
 - 1.1 Общее описание алгоритма
 - 1.2 Математическое описание алгоритма
 - 1.3 Вычислительное ядро алгоритма
 - 1.4 Макроструктура алгоритма
 - 1.5 Схема реализации последовательного алгоритма
 - 1.6 Последовательная сложность алгоритма
 - 1.7 Информационный граф
 - 1.8 Ресурс параллелизма алгоритма
 - 1.9 Входные и выходные данные алгоритма
 - 1.10 Свойства алгоритма
- 2 Программная реализация алгоритма
 - 2.1 Особенности реализации последовательного алгоритма
 - 2.2 Локальность данных и вычислений
 - 2.3 Возможные способы и особенности параллельной реализации алгоритма
 - 2.4 Масштабируемость алгоритма и его реализации
 - 2.5 Динамические характеристики и эффективность реализации алгоритма
 - 2.6 Выводы для классов архитектур
 - 2.7 Существующие реализации алгоритма
- 3 Литература

Рис. 1. Структура описания свойств алгоритмов в энциклопедии AlgoWiki

Визуализация информационных графов. Зачастую ресурс параллелизма приложения можно оценить, исследуя изображение информационного графа. Часто информационный граф является сложным многомерным объектом, а его свойства раскрываются только при удачной его визуализации. К тому же, информационный граф является потенциально бесконечным, а его размеры определяются значениями внешних переменных. Это приводит к тому, что изображение информационного графа строится для относительно небольших заданных размеров, а сделанные выводы распространяются и на графы большого размера.

В простейшем случае изображение информационного графа строится вручную специалистом, хорошо изучившим структуру описываемого алгоритма. Наиболее естественная система координат, в которой изображается граф, связывается с пространством итераций анализируемой программы.

В рамках проекта Открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki были сформулированы рекомендации по методам изображения информационных графов, в которых определены используемые геометрические примитивы, их характеристики и комбинации, используемые для отображения особенностей графов. Следование этим рекомендациям позволяет для самых разных алгоритмов получать изображения информационных графов, имеющие «похожий» вид. В таких графах проще ориентироваться, отмечая в них знакомые фрагменты.

На рис. 2 приведён пример информационного графа для алгоритма умножения плотной матрицы на вектор. Он состоит из одной группы вершин, расположенной в

целочисленных узлах двумерной области, соответствующих операции $a+bc$. На рисунке отлично виден ресурс параллелизма данного алгоритма. Отдельными вершинами также показаны как входные (матрица a и вектор c), так и выходные (вектор out) данные алгоритма.

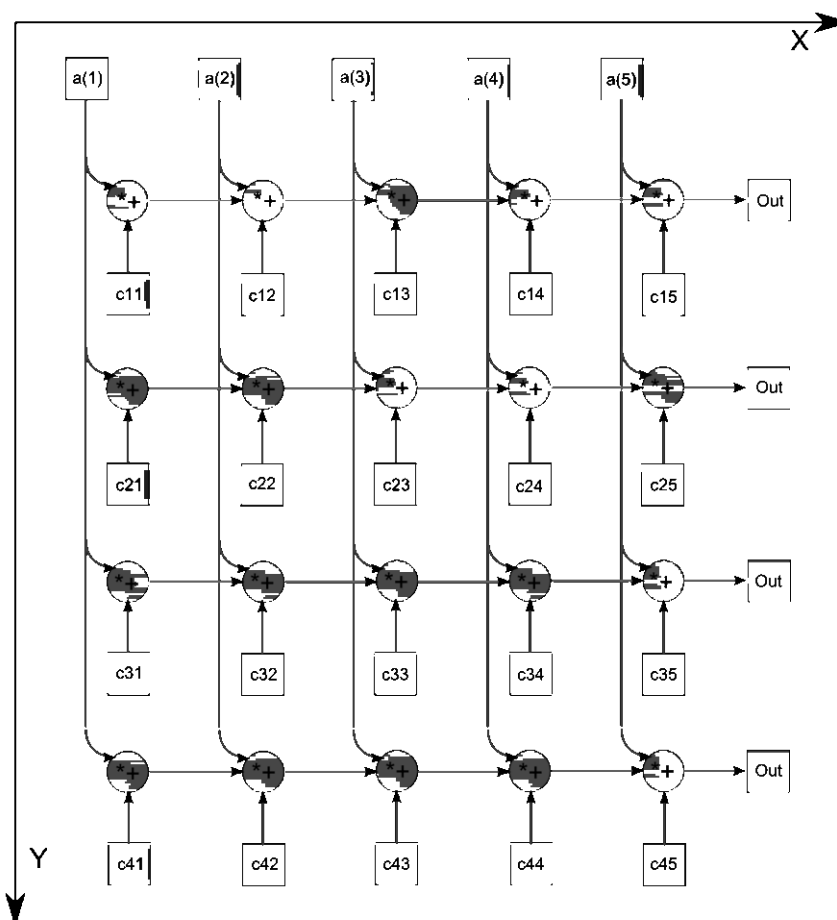


Рис. 2. Информационный граф умножения плотной матрицы на вектор

Однако построение такого наглядного изображения в общем случае является непростой задачей. В случае, если информационный граф представляет собой четырёх- и более мерный объект, то единственным разумным способом его планарного изображения представляется рассмотрение набора его проекций. Механизм построения проекций на координатные плоскости может быть полезен также и для лучшего понимания информационной структуры трёхмерных графов. Проекции позволяют выделить регулярные составляющие информационного графа и в то же время скрыть несущественные подробности.

В ряде случаев для упрощения получаемого изображения применяются специальные дополнительные методы, например, построение макрографа на основе группировки отдельных операций в макровершины. Так, на рис. 3 показана часть информационного графа метода Гивенса QR-разложения квадратной матрицы. Рис. 3а) показывает структуру алгоритма на самом верхнем уровне на основе укрупнённых операций, помеченных на графе как «F1» и «F2». Этот рисунок позволяет оценить ресурс параллелизма данного алгоритма на внешнем уровне и выбрать метод его реализации. Рис. 3б) и 3в) показывают

информационную структуру макроопераций, соответствующих вершинам, помеченным «F1» и «F2». В свою очередь, граф на рис. 3б) сам является макрографом, поскольку строится на основе операций, помеченных как «V0», «V1» и «V2», структура каждой из которых далее изображается в виде отдельного информационного графа.

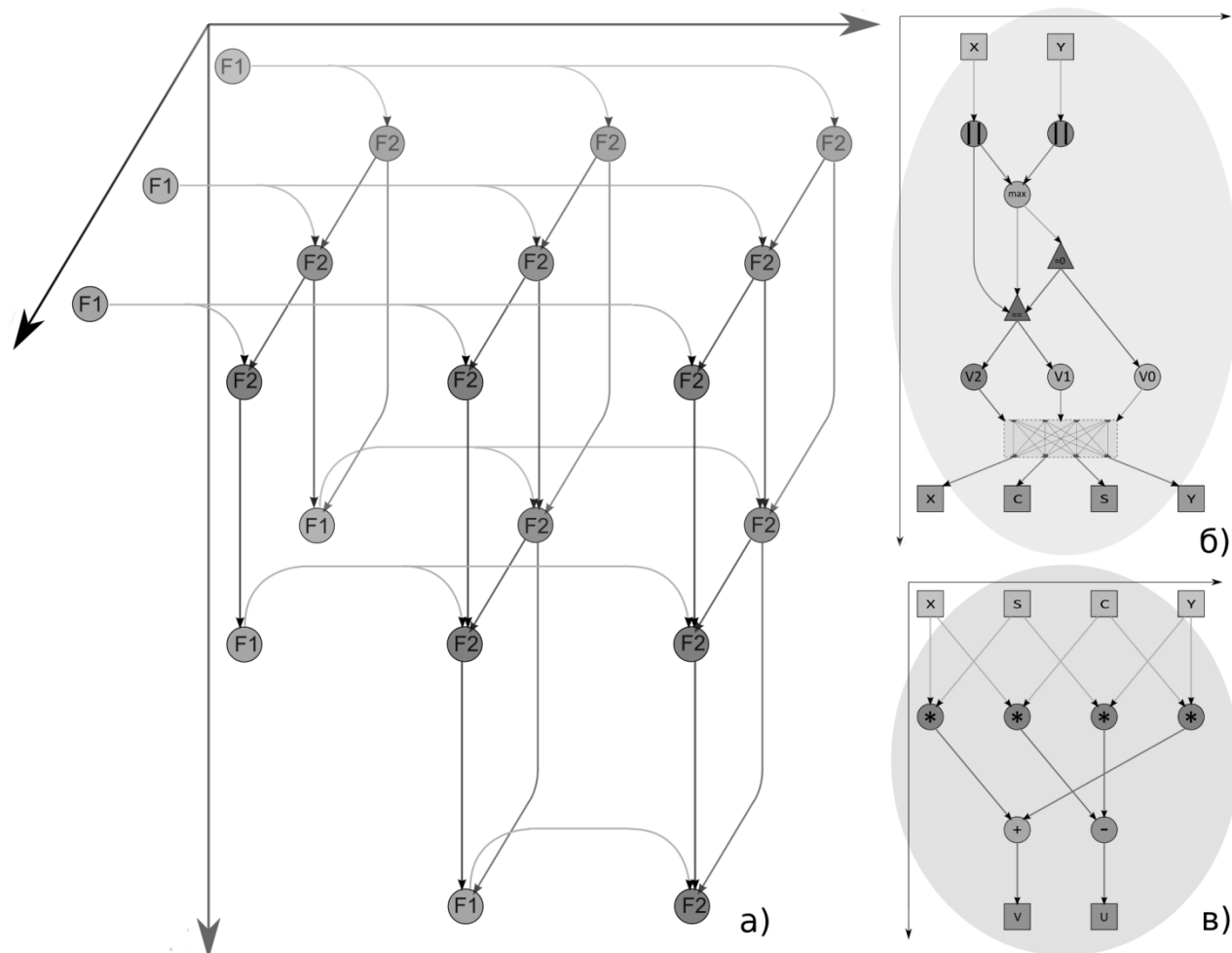


Рис. 3. Информационный граф метода Гивенса QR-разложения квадратной матрицы:
а) макрограф; б) и в) – детализация макровершин F1 и F2

Система интерактивной трёхмерной визуализации информационных графов AlgoView. Во многих случаях процесс построения изображения информационного графа может быть частично или полностью автоматизирован. В рамках данной работы разрабатывается программное средство AlgoView [8, 9], позволяющее строить интерактивное трёхмерное представление информационного графа и встраивать его на страницы Открытой энциклопедии AlgoWiki.

Информационные графы в рамках системы AlgoView строятся на основании описания, заданного на языке XML. Подробнее про данный формат описания графов можно прочитать в статье [8]. По XML-файлу, соответствующему исходному алгоритму, строится набор 3D-моделей в формате JSON [11]. Полученные модели визуализируются в окне браузера посредством технологии WebGL [17] и предоставляются на страницах описаний алгоритмов Открытой энциклопедии AlgoWiki.

Интерактивность построения изображения в системе AlgoView заключается во взаимодействии с пользователем, в результате которого можно подобрать удачный режим

изображения информационного графа, наиболее полно показывающий его параллельную структуру. Во многих случаях достаточно подобрать нужный ракурс и масштаб изображения, чтобы оценить ресурс параллелизма, присущий анализируемому алгоритму. На рис. 4 показан ракурс информационного графа алгоритма перемножения плотных матриц, на котором отчётливо видна структура информационных зависимостей. По этому рисунку легко оценить ресурс параллелизма алгоритма и, опираясь на это знание, написать его параллельную реализацию.

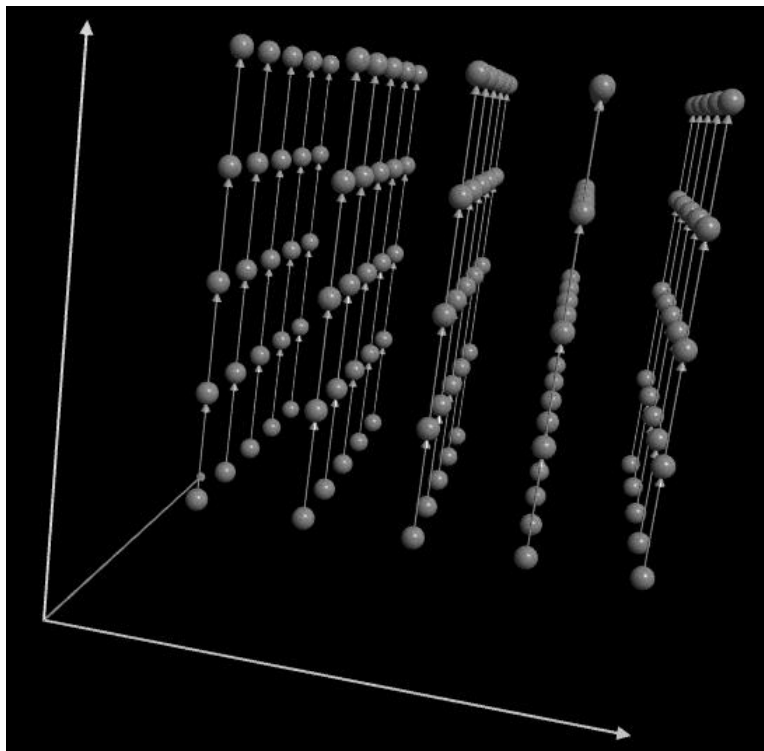


Рис. 4. Информационный граф алгоритма перемножения плотных матриц

Ресурс параллелизма некоторых алгоритмов можно показать, используя так называемую ярусно-параллельную форму информационного графа. Это такое представление информационного графа, в котором все вершины разбиты на перенумерованные подмножества ярусов, начальная вершина каждой дуги расположена на ярусе с номером меньшим, чем номер яруса конечной вершины, а между вершинами, расположенными на одном ярусе, не может быть дуг. Если при этом все входные вершины расположены на первом ярусе, а высота (число ярусов) ярусно-параллельной формы на единицу больше длины критического пути графа, то такую ярусно-параллельную форму называют канонической. В некотором смысле каноническая ярусно-параллельная форма представляет собой наилучший возможный способ параллельного исполнения исходного алгоритма, а высота канонической ярусно-параллельной формы соответствует параллельной сложности алгоритма, то есть, числу шагов, за которое можно выполнить данный алгоритм в предположении доступности неограниченного числа необходимых процессоров (функциональных устройств, вычислительных узлов, ядер и т.п.)

Каноническую ярусно-параллельную форму принято изображать графом с вершинами, помеченными номерами соответствующих ярусов. Однако даже для

относительно небольших графов такое изображение недостаточно наглядно, поэтому в интерактивной системе визуализации AlgoView предложен другой способ изображения канонической ярусно-параллельной формы. При нажатии определённых кнопок пользователь может получить ряд изображений, каждое из которых соответствует одному ярусу ярусно-параллельной формы. Так можно оценить ресурс параллелизма на конкретном шаге выполнения алгоритма, а пролистывая ярусы ярусно-параллельной формы, можно проследить продвижение «фронта», проходящего через информационный граф в процессе выполнения алгоритма. Так, на рис. 5 показан один ярус канонической ярусно-параллельной формы информационного графа метода Гивенса QR-разложения квадратной матрицы. Светлые вершины соответствуют операциям текущего яруса, более тёмные вершины – операциям последующих ярусов, а самые тёмные вершины – операциям предыдущих ярусов.

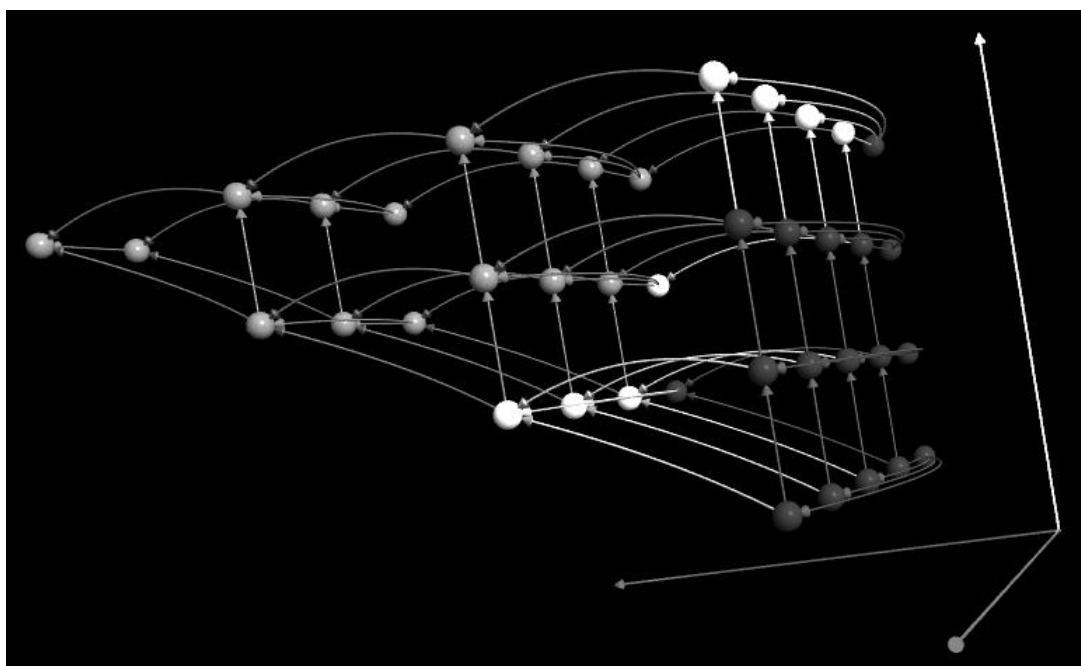


Рис. 5. Каноническая ярусно-параллельная форма информационного графа метода Гивенса QR-разложения квадратной матрицы

Заключение. В данной статье рассмотрен подход к исследованию информационной структуры алгоритмов, используемый в рамках Открытой энциклопедии AlgoWiki. Основой данного подхода является информационный граф, который может быть формально построен для широкого класса вычислительных алгоритмов. Информационный граф обладает многими полезными свойствами, в частности, содержит всю необходимую информацию для определения ресурса параллелизма анализируемого алгоритма.

В статье показаны некоторые способы представления информационных графов, предусмотренные в Открытой энциклопедии AlgoWiki. Для широкого графа алгоритмов возможно автоматическое построение информационного графа с использованием программного средства AlgoView. Дополнительные возможности предоставляются благодаря предусмотренным способам интерактивного взаимодействия с пользователем. Программное средство AlgoView продолжает развиваться, на его базе планируется замкнуть цепочку от анализа исходного кода программы до детальной визуализации информационной структуры реализуемого алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальковский В.А. и др. Элементы параллельного программирования. (Под ред. Котова В.Е.). М.: “Радио и связь”. 1983.
2. Воеводин В.В. Математические основы параллельных вычислений. М.: Изд. Моск. ун-та, 1991. 345 с.
3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ – Петербург. 2002.
4. Воеводин Вл.В. Теория и практика исследования параллелизма последовательных программ // Программирование. 1992. № 3. С. 38–53.
5. Воеводин Вл.В. Статический анализ и вопросы эффективной реализации программ // Вычислительные процессы и системы (Под ред. Марчука Г.И.). М.: “Физматлит”. 1993. № 9. С. 249–301.
6. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов. Режим доступа: <https://algowiki-project.org> (дата обращения 15.03.2019).
7. Allen J.R., Kennedy K. Automatic Loop Interchange // SIGPLAN Notices. Vol. 19. No 6. Pp. 233–246. 1984.
8. Antonov A.S., Volkov N.I. An AlgoView Web-visualization System for the AlgoWiki Project // Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 753. Pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5_1.
9. Antonov A., Volkov N. Interactive 3D Representation as a Method of Investigating Information Graph Features // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 965. Pp. 587–598. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_50.
10. Asanovic K., Bodik R., Catanzaro B.C., et al. The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley, Report UCB/EECS–2006–183 (Univ. California at Berkeley, Berkeley, 2006).
11. Introducing JSON. Режим доступа: <https://www.json.org> (дата обращения 15.03.2019).
12. Lamport L. The Parallel Execution of Do Loops // Communications of the ACM. 1974. Vol. 17. No 2. Pp. 83–93.
13. Maydan D.E., Hennessy J.L., Lam M.S. Efficient and Exact Data Dependence Analysis // Proceedings of the ACM SIGPLAN’91 Conference on Programming Language Design and Implementation.
14. Pugh W. A Practical Algorithm for Exact Array Dependence Analysis // Communications of the ACM. August 1992. Vol. 35, No 8. Pp. 102–114.
15. Voevodin V.V., Voevodin V.V. The V-Ray Technology of Optimizing Programs to Parallel Computers // Proc. of the 1st workshop on numerical analysis and applications. Russe, Bulgaria. 1996. Pp. 24–27.
16. Voevodin V., Antonov A., Dongarra J. AlgoWiki: an Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2015. Vol. 2. No 1. Pp. 4–18.
17. WebGL 2.0 Specification. Режим доступа: <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/latest/2.0> (дата обращения 15.03.2019).

INFORMATION STRUCTURE OF ALGORITHMS AND OPEN ENCYCLOPEDIA ALGOWIKI

Alexander S. Antonov

Ph.D., Leading researcher

Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University

1, bld.4, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russia, e-mail: asa@parallel.ru

Abstract. This paper discusses various approaches to the study of the information structure of algorithms. One of the most developed approaches is the construction and analysis of information graphs, also called algorithm graphs. The information graph contains all the necessary information about information dependencies, so it can serve as the basis for detecting many different properties of the algorithm under study. The Open encyclopedia of algorithm properties AlgoWiki implements online description of the properties of various computational algorithms. The basis of the description of many basic properties of the algorithm in the framework of AlgoWiki is an information graph. As part of this work, the AlgoView software tool is being developed that allows you to build an interactive three-dimensional representation of an information graph and embed it on the AlgoWiki Open encyclopedia pages.

Keywords: Information structure, parallelism, algorithm graph, AlgoWiki, visualization, AlgoView

References

1. Val'kovskij V.A. i dr. Jelementy parallel'nogo programmirovaniya [Elements of parallel programming]. (Ed. Kotov V.E.). Moscow. Radio i svjaz' = Radio and communication. 1983. (in Russian)
2. Voevodin V.V. Matematicheskie osnovy parallel'nyh vychislenij [Mathematical Foundations of Parallel Computing]. Moscow. Izd. Mosk. un-ta = MSU Publ. 1991. 345 p. (in Russian).
3. Voevodin V.V., Voevodin V.I. Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing]. St. Petersburg. BHV-Peterburg. 2002. (in Russian)
4. Voevodin V.I. Teoriya i praktika issledovaniya parallelizma posledovatel'nyh programm [Theory and practice of studying parallelism of sequential programs] // Programmirovaniye = Programming. 1992. N 3. Pp. 38–53. (in Russian)
5. Voevodin V.I. Stitcheskij analiz i voprosy jeffektivnoj realizacii programm [Static analysis and program implementation issues] // Vychislitel'nye processy i sistemy = Computational processes and systems (Ed. Marchuk G.I.), M.: Fizmatlit, 1993. N 9. Pp. 249-301. (in Russian)
6. Otkrytaja jenciklopediya svojstv algoritmov [Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features]. Available at: <https://algowiki-project.org> (accessed 15.03.2019). (in Russian)
7. Allen J.R., Kennedy K. Automatic Loop Interchange // SIGPLAN Notices. Vol. 19. No 6. Pp. 233–246. 1984.
8. Antonov A.S., Volkov N.I. An AlgoView Web-visualization System for the AlgoWiki Project // Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 753. Pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5_1.

9. Antonov A., Volkov N. Interactive 3D Representation as a Method of Investigating Information Graph Features // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 965. Pp. 587–598. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_50.
10. Asanovic K., Bodik R., Catanzaro B.C., et al. The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley, Report UCB/EECS–2006–183 (Univ. California at Berkeley, Berkeley, 2006).
11. Introducing JSON. Режим доступа: <https://www.json.org> (дата обращения 15.03.2019).
12. Lamport L. The Parallel Execution of Do Loops // Communications of the ACM. 1974. Vol. 17. No 2. Pp. 83–93.
13. Maydan D.E., Hennessy J.L., Lam M.S. Efficient and Exact Data Dependence Analysis // Proceedings of the ACM SIGPLAN’91 Conference on Programming Language Design and Implementation.
14. Pugh W. A Practical Algorithm for Exact Array Dependence Analysis // Communications of the ACM. August 1992. Vol. 35, No 8. Pp. 102–114.
15. Voevodin V.V., Voevodin V.V. The V-Ray Technology of Optimizing Programs to Parallel Computers // Proc. of the 1st workshop on numerical analysis and applications. Russe, Bulgary. 1996. Pp. 24–27.
16. Voevodin V., Antonov A., Dongarra J. AlgoWiki: an Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2015. Vol. 2. No 1. Pp. 4–18.
17. WebGL 2.0 Specification. Available at: <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/latest/2.0> (accessed 15.03.2019).

WEB-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПАРЕТО-АППРОКСИМАЦИИ В ЗАДАЧАХ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Белоус Валентина Владимировна

К.т.н., ст. преподаватель, e-mail: walentina.belous@gmail.com

Грошев Сергей Владимирович

Ст. преподаватель, e-mail: sgro@newmail.ru

Карпенко Анатолий Павлович

Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой, e-mail: akarpenko@bmstu.ru

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»,

ФГБОУ «Московский Государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 105005
г. Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5

Аннотация. WEB-ориентированная программная система PARETO-Q предназначена для удаленной оценки качества Парето-аппроксимации в задачах многоцелевой оптимизации. Система призвана решить проблему консолидации алгоритмов Парето-аппроксимации и алгоритмов оценки качества аппроксимации. Представляем используемое системой математическое обеспечение, архитектуру системы, некоторые результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: многоцелевая оптимизация, множество Парето, Парето-аппроксимация, индикаторы качества Парето-аппроксимации.

Цитирование: Белоус В.В., Грошев С.В., Карпенко А.П. Web-ориентированная система оценки качества Парето-аппроксимации в задачах многоцелевой оптимизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 122–132. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-11

Введение. При решении практических, прежде всего, технических задач оптимизации часто возникают задачи многоцелевой (*multi objective*) оптимизации (МЦО-задачи), когда желательно экстремизировать не одну, а несколько целевых функций. Хорошо известно, что поскольку, как правило, нельзя добиться экстремального значения всех целевых функций одновременно, решение такой задачи представляет собой некоторый компромисс, принадлежащий множеству Парето (*Pareto set*) задачи, то есть множеству решений, не улучшаемых одновременно по всем целевым функциям. Решением МЦО-задачи называем множество Парето этой задачи, предполагая, что после построения некоторой конечно-мерной аппроксимации данного множества (П-аппроксимация), лицо, принимающее решение (ЛПР), неформальными или формализованными методами выбирает из него единственное решение.

Известно значительное число алгоритмов решения МЦО-задачи (МЦО-алгоритмов). Классические алгоритмы решения этой задачи основаны на сведении ее к совокупности задач глобальной одноцелевой оптимизации. Рассмотрим относительно новый и быстро развивающийся класс МЦО-алгоритмов – класс алгоритмов П-аппроксимации (П-

алгоритмов), которые предполагают предварительное построение некоторой конечномерной аппроксимации множества, а тем самым, и фронта Парето МЦО-задачи.

Обычно П-алгоритмы, чаще всего строят на основе генетических алгоритмов. Такие алгоритмы называют эволюционными. Наряду с этим известно значительное число П-алгоритмов, построенных с помощью алгоритмов роя частиц, колонии муравьев и колонии пчел и т.д. [5]. В качестве общего названия рассматриваемых П-алгоритмов используем термин «популяционные алгоритмы».

В силу большого числа П-алгоритмов актуальной является задача оценки и сравнения их эффективности. Данную задачу решают путем оценки качества П-аппроксимации, полученной с помощью этих алгоритмов. В содержательных терминах это может быть сделано с помощью следующих характеристик:

- близость найденных решений к точному множеству Парето рассматриваемой МЦО-задачи;
- равномерность распределения решений в полученной П-аппроксимации;
- мощность найденного множества решений.

В практически значимых МЦО-задачах, в которых, как правило, используются более двух критериев оптимальности, визуальный анализ качества соответствующей П-аппроксимации затруднен. Поэтому актуальной является задача разработки индикаторов качества П-аппроксимации, формализующих указанные характеристики. Следуя работе Зитцлера (*E. Zitzler*) с соавторами [6], назовем индикаторы такого сорта унарными (*unary quality indicators*). Качество П-аппроксимации можно оценивать также путем сравнения найденных решений с некоторыми другими, например, эталонными решениями. Аналогично, индикаторы такого сравнения назовем бинарными (*binary quality indicators*) [6].

Вследствие высокой практической значимости МЦО-задач разработано большое число программных систем многоцелевой оптимизации (МЦО-систем), которые разделяют на два класса [8–10, 12–14]: системы, поддерживающие оценку качества П-аппроксимации; системы, в которых такая оценка не реализована. Выполненный авторами обзор МЦО-систем [1] показывает, что общим их недостатком является отсутствие *WEB*-интерфейса. В то же время, возможность использования сети Интернет для проведения многопользовательской оценки качества Парето-аппроксимации представляется целесообразной. Предлагаемая авторами *WEB*-ориентированная система оценки качества П-аппроксимации в МЦО-задачах оптимизации получила наименование *PARETO-Q*.

1. Математическое обеспечение системы *PARETO-Q*. Постановка МЦО-задачи.

Множеством допустимых значений вектора варьируемых параметров X является ограниченное и замкнутое множество

$$D_X = \{X \mid G(X) \geq 0\} \subset \{X\} = R^{|X|},$$

где $|X|$ - размерность вектора X ; $G(X) = (g_1(X), g_2(X), \dots)$ - ограничивающая вектор-функция. Целевая вектор-функция $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_{|F|}(X))$ со значениями в $|F|$ -мерном пространстве целей $\{F\} = R^{|F|}$ определена в области D_X . ЛПР стремится минимизировать в этой области каждую из частных целевых функций $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{|F|}(X)$, что условно записываем в виде

$$\min_{X \in D_X} F(X) = F(X^*) = F^*, \quad (1)$$

где векторы X^* , F^* - искомое решение МЦО-задачи.

Целевая вектор-функция $F(X)$ выполняет отображение множества D_X в множество D_F пространства целей, называемое множеством достижимости. Фронт Парето задачи (1) обозначаем $D_F^* \in D_F$, а соответствующее множество Парето - $D_X^* \in D_X$. Напомним, что согласно известному принципу Эджворта-Парето, при «разумном» поведении ЛППР выбор решения МЦО-задачи следует производить на множестве Парето.

Архивное множество решений задачи (1), недоминируемых в пространстве $\{F\}$, обозначаем Θ .

Алгоритмы П-аппроксимации. В системе *PARETO-Q* реализованы широко известные алгоритмы П-аппроксимации *NSGA-II*, *SPEA-2*, *IBEA*, *FEMO*, *SIBEA*, *ECEA*, *EPSMOEA* [4].

Индикаторы качества П-аппроксимации. Система *PARETO-Q* использует следующие унарные индикаторы качества П-аппроксимации [6]:

- среднее расстояние до точного фронта Парето (*Generalization Distance, GD*) $I_{GD}(\Theta)$, характеризующее близость найденных решений Θ к точному фронту Парето D_F^* .
- среднее рассеяние (*Spacing, S*) $I_S(\Theta)$, представляющее собой меру равномерности распределения решений П-аппроксимации;
- максимальное рассеяние (*Maximum Spread, MS*) $I_{MS}(\Theta)$;
- отклонение от равномерного распределения (*Deviation from Uniform distribution, DU*) $I_{DU}(\Theta)$, формализующее, аналогично индикаторам $I_S(\Theta)$, $I_{MS}(\Theta)$ равномерность распределения архивных недоминируемых решений Θ в целевом пространстве;
- мощность множества решений (*Overall Nondominated Vector Generation*) $I_{ONVG}(\Theta)$, то есть число элементов множества Θ ;
- объем объемлющего гиперкуба (*Hypercube enclosing indicator, HC*) $I_{HC}(\Theta)$;
- относительное число ошибочных решений (*Error Ratio, ER*) $I_{ER}(\Theta)$, равное отношению к числу решений архивного множества Θ , не принадлежащих точному фронту Парето D_F^* МЦО-задачи;
- максимальная ошибка аппроксимации (*Maximum Pareto front Error, MPE*) $I_{MPE}(\Theta)$.

Положим, что множество Θ^* недоминируемых решений в пространстве D_F является *эталонным*. Система *PARETO-Q* использует также ряд бинарных индикаторов [2]:

- индикатор $I_{\varepsilon}(\Theta^*, \Theta)$, формализующий близость множества Θ к множеству Θ^* как минимальную величину ε , при которой для любых векторов $F_j \in \Theta$, $F_k \in \Theta^*$ имеет место отношение ε -доминирования $F_j \succ_{\varepsilon} F_k$;

- покрытие (*Coverage*) $I_C(\Theta_*, \Theta)$, имеющее смысл относительного числа решений, принадлежащих множеству Θ_* , которые доминируются некоторыми из решений множества Θ ;

- разность покрытий (*coverage differences*) $\delta(\Theta_*, \Theta)$ - некоторая мера $\zeta(\bullet)$ части множества достижимости, слабо доминируемой множеством Θ_* , но не слабо доминируемой множеством Θ ;

- гиперобъем разности покрытий (*Hyper Volume of coverage difference*) $I_{HV}(\Theta_*, \Theta)$, использующий в качестве меры $\zeta(\bullet)$ объем соответствующей части множества достижимости.

Статистические методы сравнения П-алгоритмов. Положим, что речь идёт о сравнении эффективности $n \geq 2$ П-алгоритмов $A^1, A^2, \dots, A^n$. Пусть выполнено $r_i \geq 1$ запусков i -го алгоритма, в результате чего получена коллекция П-аппроксимаций $C = \{A_1^1, A_2^1, \dots, A_{r_1}^1, \dots, A_1^n, \dots, A_{r_n}^n\}$. Представленные выше индикаторы ставят в соответствие П-алгоритму $A^i, i \in [1:n]$ совокупность r_i наборов вещественных чисел $\{I_j(A_k^i), j \in [1:m], k \in [1:r_i]\}$ - значений используемых индикаторов $I_1, I_2, \dots, I_m$. К указанным наборам данных применяем стандартные процедуры статистического тестирования. Если сравниваются два П-алгоритма, то может быть использован ранговый статистический критерий Манна-Уитни [7]. Если сравниваются более двух алгоритмов, то используем ранговый статистический критерий Крускала-Уоллиса [7].

Заметим, что использование нескольких Парето-совместимых индикаторов качества П-аппроксимации может дать более полноценную оценку эффективности сравниваемых алгоритмов. Так, если два Парето совместимых индикатора оказываются по разным индикаторам противоречащими друг другу, то это означает, что рассматриваемые аппроксимации несравнимы.

Для оценки эффективности П-алгоритма A используем также эмпирическую функцию достижимости (*Empirical Attainment Function, EAF*). Для данного вектора $F \in D_F$ функция EAF имеет смысл относительной частоты, с которой данный вектор достижим в наборе аппроксимаций $\{A_j, j \in [1:r]\}$, то есть слабо доминируется элементами этого набора. Заметим, что значения EAF могут быть использованы также для визуализации результатов запусков П-алгоритмов [5].

Методы визуализации П-аппроксимации. Обзор методов визуализации многомерных данных и их применимость для визуализации решений П-аппроксимации представлен, например, в работе авторов [2] или других источниках [11,12]. В системе *PARETO-Q* для визуализации архивного множества решений Θ используем авторский комбинированный метод, основанный на *диагональном пересчете гиперпространства* (*Hyperspace diagonal counting, HSDC*) и методе параллельных координат [3].

В основе техники *HSDC* лежит теорема Кантора, утверждающая, что существует взаимно-однозначное соответствие между пространством произвольной размерности $|F|$ и пространством R^1 . Идея техники состоит в том, что гиперкуб $[0; 1]^{|F|}$ разбивают на гиперкубики, которые затем линейно упорядочивают. Пронумерованные кубики отображают на дискретную координатную ось в соответствии со своими порядковыми номерами.

Метод параллельных координат представляет собой одну из самых известных и часто используемых техник визуализации многомерных данных. Метод использует координатные оси, расположенные параллельно друг другу с некоторым интервалом. Точка многомерных данных отображается в виде ломаной линии, пересекающей координатные оси в местах, соответствующих значениям координат этой точки.

Тестовые МЦО-задачи. В системе реализованы «стандартные» тестовые задачи *ZDT1-ZDT6, DTLZ1-DTLZ7* [6].

2. Архитектура программной системы *PARETO-Q*. В системе реализована работа с проектами – совокупностью вычислительных экспериментов по оценке качества одной или нескольких П-аппроксимаций данной МЦО-задачи. Ядро программной системы составляет математическая подсистема, которая включает в себя пополняемые наборы программ для расчета индикаторов качества П-аппроксимации, программ для построения точного фронта Парето, а также программ, реализующих различные методы П-аппроксимации [4]. Общая структурная схема программной системы представлена на рисунке 1, а схема взаимодействия подсистем – на рисунке 2.

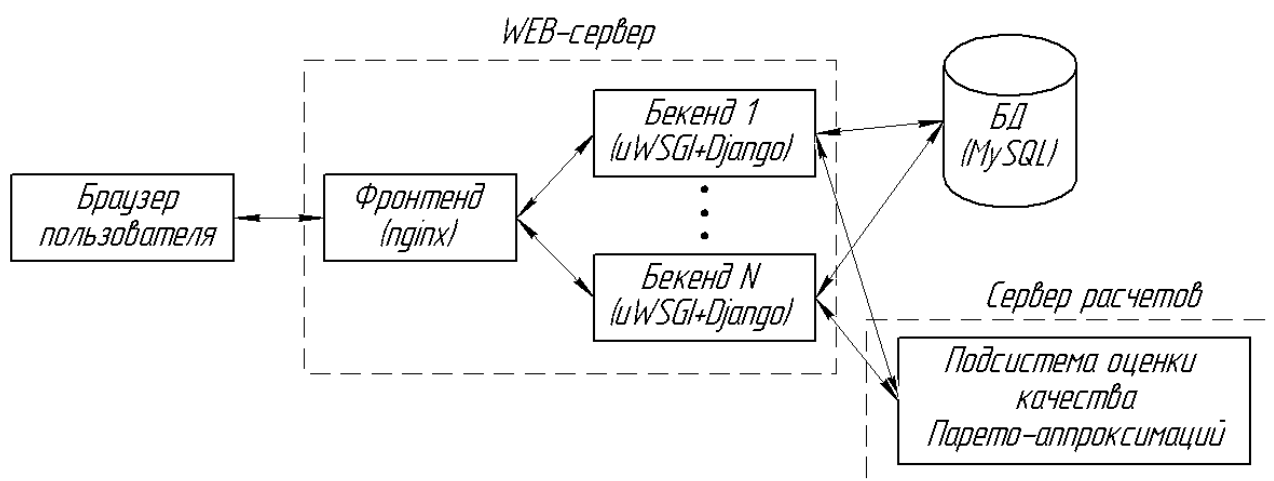


Рис. 1. Структурная схема системы PARETO-Q

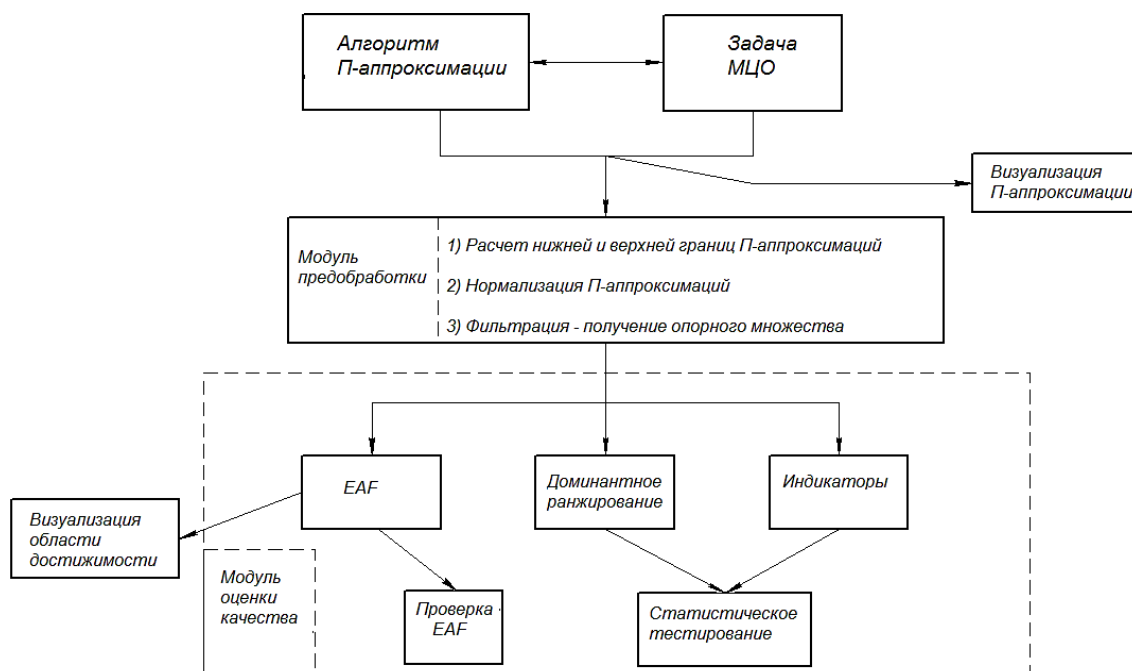


Рис. 2. Взаимодействие подсистем при оценке качества П-аппроксимации

В системе реализованы следующие основные режимы: «Настройка», «Вычислительный эксперимент», «Анализ».

Режим «Настройка» предоставляет ЛПР возможность передать на сервер полученную тем или иным способом П-аппроксимацию, а в качестве ответа системы получить ее визуализацию и соответствующие значения индикаторов качества. Для задания требуемого режима оценки необходимо ввести следующие данные (рис. 3):

Pareto-Q
root ▼

Настройки вычислительного эксперимента

Название эксперимента:

Тип индикаторов: ☒ Унарные ☐ Бинарные

Индикатор качества:

Первый фронт: Файл не выбран

Рис. 3. Экранная форма «Настройка» системы PARETO-Q

- имя режима;
- тип индикатора качества - бинарный или унарный;
- индикатор качества (в зависимости от выбранного типа индикатора в выпадающем списке будут представлены реализованные в системе унарные либо бинарные индикаторы);
- один (если выбран унарный индикатор) или два (если выбран бинарный критерий) файла исследуемой П-аппроксимации.

Режим «Вычислительный эксперимент» даёт возможность ЛПР выбрать требуемые П-алгоритм и тестовую МЦО-задачу (из числа реализованных в системе). ЛПР также может использовать собственные реализации П-алгоритмов и тестовых задач. Ответами системы в данном режиме являются П-аппроксимация выбранной тестовой задачи (в виде текстового

файла), визуализация этой аппроксимации, а также соответствующие значения всех реализованных в системе унарных индикаторов качества (рис 4).

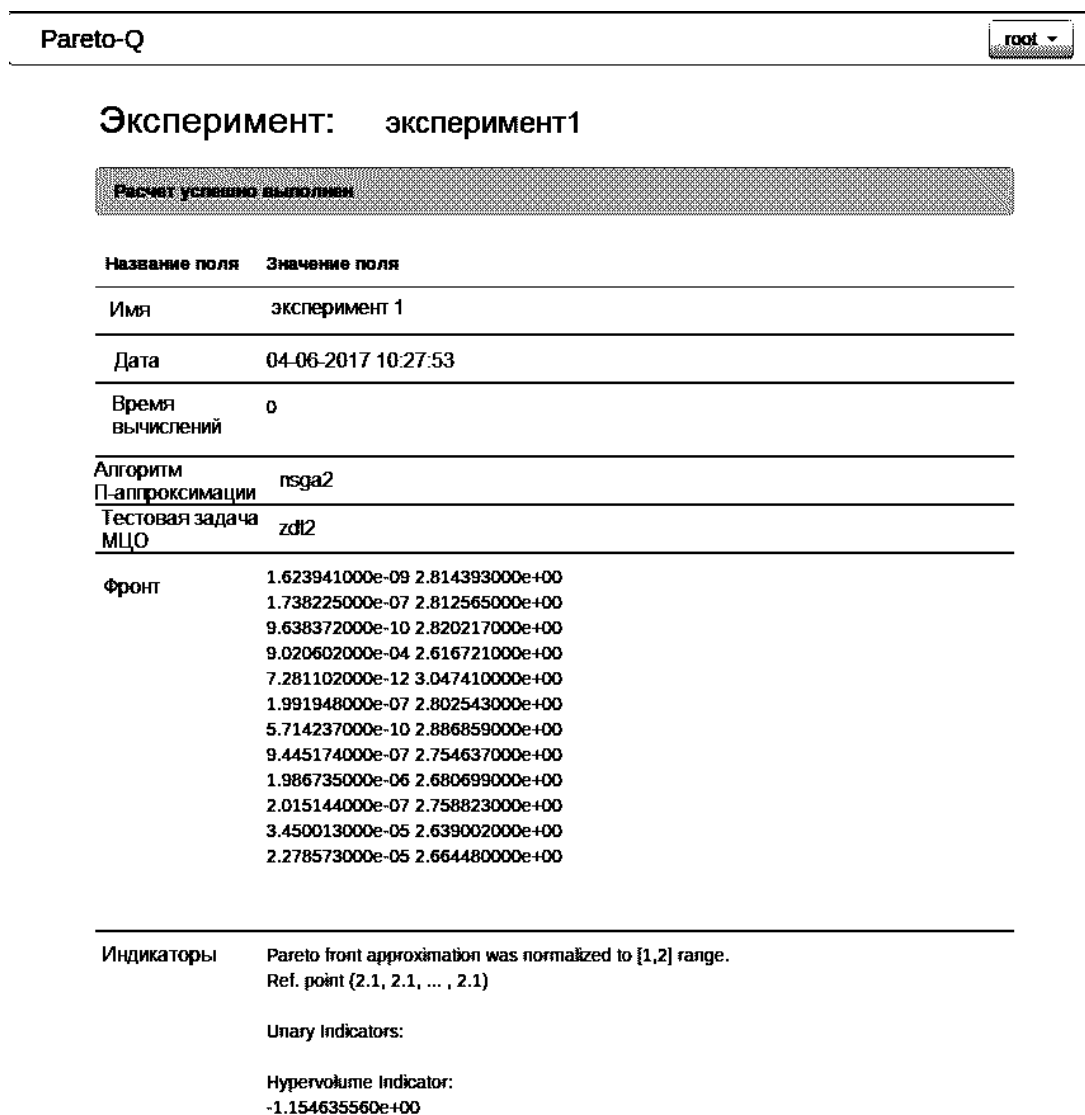


Рис. 4. Пример результатов вычислительного эксперимента в системе PARETO-Q

Режим «Анализ» дает ЛПР возможность выбрать П-алгоритмы и одну или несколько тестовых МЦО-задач, с помощью которых выполняется анализ эффективности этих алгоритмов. В качестве ответа системы ЛПР получает результаты статистического анализа данных, полученных при многократном запуске исследуемых П-алгоритмов.

3. Вычислительные эксперименты. Исследование эффективности разработанного алгоритмического и программного обеспечения выполнено на примере широко известных алгоритмов П-аппроксимации *NSGA-II*, *SPEA-2* и относительно нового алгоритма *IBEA*. В качестве тестовых МЦО-задач использованы двухкритериальные *ZDT1* - *ZDT5* и трёхкритериальные *DTLZ1* - *DTLZ3* задачи.

Исследование проводилось при 150 итерациях каждого из указанных П-алгоритмов. Для каждой пары «алгоритм-задача» выполнено по 30 запусков. Уровень значимости статистических критериев принят равным $\alpha = 0,05$.

В качестве примера приведём результаты, полученные системой для алгоритма *SPEA-2* и тестовой задачи *ZDT3* (рис. 5, а) в сравнении с точным фронтом Парето для той же задачи (рис. 5, б).

В результате доминантного ранжирования с последующим применением критерия Манна-Уитни было выявлено значительное превосходство алгоритма *IBEA* над алгоритмами *NSGA-II*, *SPEA-2* с точки зрения качества П-аппроксимаций, полученных с помощью этих алгоритмов. Сравнение распределений значений индикаторов качества $I_{\varepsilon+}^1$, I_H^- , I_{R2}^1 не позволило обнаружить превосходство какого-либо из исследуемых алгоритмов над остальными. Другими словами, указанные алгоритмы оказались несравнимыми по данным индикаторам качества. Сравнение эмпирических функций достижимости с применением критерия Колмогорова-Смирнова показало наличие существенных различий только в качестве П-аппроксимаций, полученных с помощью алгоритмов *SPEA-2* и *IBEA* [8].

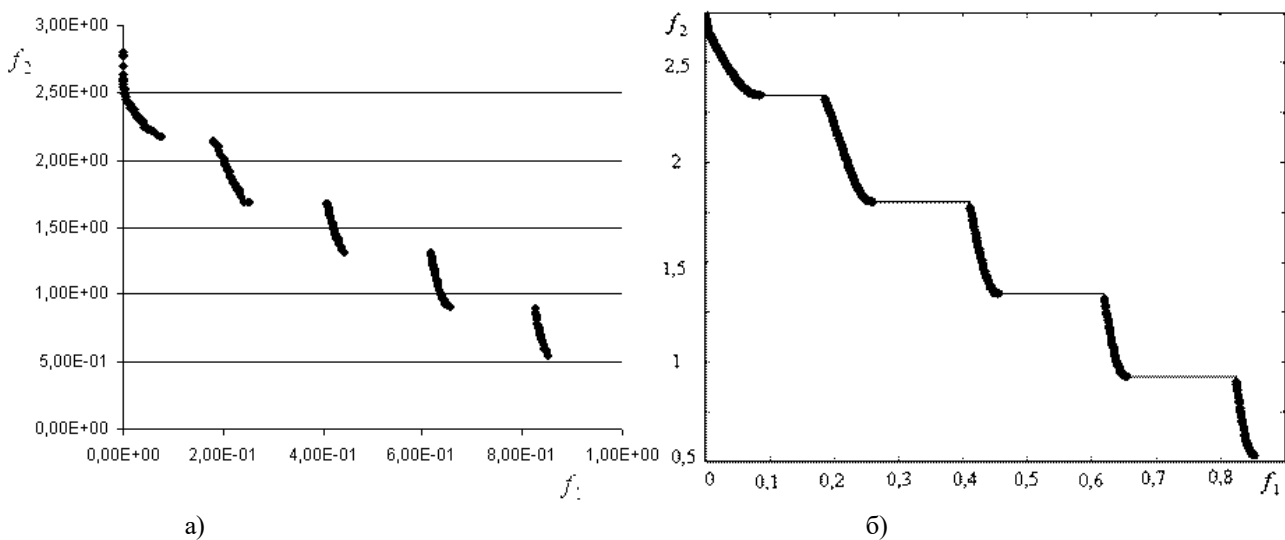


Рис. 5. Тестовая задача *ZDT3*: а) П-аппроксимация с помощью алгоритма *SPEA-2*; б) точный фронт Парето

Заключение. Программную систему *PARETO-Q* отличает от подобных известных систем комплексность подхода и *WEB*-ориентированность. Результаты широкого исследования эффективности системы позволяют сделать вывод об адекватности принятых алгоритмических и программных решений. Поскольку практические МЦО-задачи имеют высокую вычислительную сложность, актуальным является распараллеливание П-алгоритмов для различных классов параллельных вычислительных систем. Архитектурные и программные решения, использованные в системе, позволяют с небольшими затратами реализовать параллельный вариант системы.

Текущий вариант работающей системы доступен по адресу: <http://pareto-q.fvds.ru>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоус В.В., Грошев С.В., Карпенко А.П., Шибитов И.А. Оценка качества Парето-аппроксимации в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор программных систем // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 4. С. 300–320. DOI: 10.7463/0414.0709198 (<http://technomag.edu.ru/doc/709198.html>)

2. Белоус В.В., Грошев С.В., Карпенко А.П., Остроушко В.А. Методы визуализации фронта Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор // Труды XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», 1-7 июля 2015. Часть I. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 22–29
3. Грошев С.В., Карпенко А.П., Остроушко В.А. Комбинированный метод визуализации фронта Парето в задаче многокритериальной оптимизации, основанный на диагональном пересчете гиперпространства // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №8. С. 150–164. DOI:10.7463/0816.0844030 (<http://engineering-science.ru/doc/844030.html>)
4. Грошев С.В., Карпенко А.П., Сабитов Д.Р., Шибитов И.А. Программная система PARETO-RATING для оценки качества Парето-аппроксимации в задаче многокритериальной оптимизации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. (7): 193–214. DOI: 10.7463/0714.0720253 (<http://technomag.edu.ru/doc/720253.html>)
5. Карпенко А.П., Митина Е.В., Семенихин А.С. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. №4. (<http://www.technomag.edu.ru/doc/363023.html>)
6. E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele. Comparison of Multi-objective Evolutionary Algorithms: Empirical Results // Evolutionary Computation. Vol. 8(2). 2000. Pp. 173–195.
7. Fonseca C.M., Fleming P.J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization // Proc. of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo. California. 1993. Pp. 416–423.
8. Fonseca C.M., Grunert da Fonseca V., Hall A.O. Inferential performance assessment of stochastic optimizers and the attainment functions. In E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele, C.A.C. Coello, D. Corne. Proceedings of the First Internal Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2001). Berlin, Springer-Verlag. Pp. 213–225.
9. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning // Reading Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company. 1989. P. 201.
10. J. J. Durillo, A. J. Nebro. jMetal. A Java Framework for Multi-Objective Optimization // Advances in Engineering Software 42. 2011. Pp. 760–771.
11. Knowles J. A summary-attainment-surface plotting method for visualizing the performance of stochastic multiobjective optimizers // Computational Intelligence and Applications (Proceedings of the Fifth International Workshop on Intelligent Systems Design and Applications). 2005. Pp. 552–557.
12. M. Lukasiewicz, M. Glass, F. Reimann, J. Teic. Opt4J - A Modular Framework for Meta-heuristic Optimization // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computing Conference. 2011. Pp. 1723–1730.
13. S. Bleuler, M. Laumanns, L. Thiele, and E. Zitzler. PISA A Platform and Programming Language Independent Interface for Search Algorithms // In Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO. 2003. Pp. 494–508.

14. Shaw K. J., Nortcliff A. L., Thompson M., Love J., Fonseca C.M., Fleming P.J. Assessing the Performance of Multiobjective Genetic Algorithms for Optimization of a Batch Process Scheduling Problem // Congress of Evolutionary Computation, Washington D.C. IEEE Service Center. 1999. Pp. 37–45.
-

UDK 519.6

**WEB-ORIENTED SYSTEM FOR QUALITY ESTIMATION
OF PARETO-APPROXIMATION IN MULTI-OBJECTIVE TASKS**

Valentina V. Belous

Senior lecturer, chair «Computer Aided Design»,
e-mail: valentina.belous@gmail.com

Sergey V. Groshev

Senior lecturer, chair «Computer Aided Design»,
e-mail: sgro@newmail.ru

Anatoly P. Karpenko

Dr, Professor, head of chair «Computer Aided Design»,
e-mail: akarpenko@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, 2-nd Baumanskaya str. 5

Abstract. Web-oriented program system PARETO-Q is designed for remote estimating of Pareto-approximating quality in multi-objective tasks. The system is designed to solve the problem of consolidation of Pareto-approximation algorithms and algorithms for evaluating the quality of approximation. We present the software used by the system, the system architecture, and some results of computational experiments.

Keywords: multi-objective optimization, Pareto set, Pareto approximation, Pareto Front, indicators of quality Pareto-approximation.

References

1. Belous V.V., Groshev S.V., Karpenko A.P., Shibitov I.A. Otsenka kachestva Pareto-approksimatsii v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii. Obzor programmnykh sistem [Estimating quality Pareto-approximation in task of multiobjective optimization. Program systems review] // Science and Education. Scientific edition of Bauman MSTU. 2014. № 4. Pp. 300–320. DOI: 10.7463/0414.0709198 (<http://technomag.edu.ru/doc/709198.html>) (in Russian)
2. Belous V.V., Groshev S.V., Karpenko A.P., Ostroushko V.A. Metody vizualizatsii fronta Pareto v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii. Obzor [Pareto front visualization method in task of multiobjective optimization. Review] // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. Treatises of XX Baikal Russian conference, 1-7 June 2015. Vol 1. Pp. 22–29. (in Russian)

3. Groshev S.V., Karpenko A.P., Ostroushko V.A. Kombinirovannyi metod vizualizatsii fronta Pareto v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii, osnovannyi na diagonal'nom pereschete giperprostranstva [Combined visualization method of Pareto front visualization in task of multiobjective optimization, based on diagonal hyperspace recalculation] // Science and Education. Scientific edition of Bauman MSTU. 2016. №8. Pp. 150–164. DOI:10.7463/0816.0844030 (<http://http://engineering-science.ru/doc/844030.html>) (in Russian)
4. Groshev S.V., Karpenko A.P., Sabitov D.R., Shibitov I.A. Programmnaya sistema PARETO-RATING dlya otsenki kachestva Pareto-approksimatsii v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii [Program system PARETO-RATING for quality estimation in multiobjective optimization task] // Science and Education. Scientific edition of Bauman MSTU. 2014. №7. Pp. 193–214. DOI: 10.7463/0714.0720253 (<http://technomag.edu.ru/doc/720253.html>) (in Russian)
5. Karpenko A.P., Mitina E.V., Semenihihin A.S. Populyatsionnyye metody approksimatsii mnozhestva Pareto v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii [Populating methods of Pareto set approximation in task of multiobjective optimization] // Science and Education. Scientific edition of Bauman MSTU. 2012. №4. (<http://www.technomag.edu.ru/doc/363023.html>) (in Russian)
6. E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele. Comparison of Multi-objective Evolutionary Algorithms: Empirical Results // Evolutionary Computation. Vol. 8(2). 2000. Pp. 173–195.
7. Fonseca C.M., Fleming P.J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization // Proc. of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo. California. 1993. Pp. 416–423.
8. Fonseca C.M., Grunert da Fonseca V., Hall A.O. Inferential performance assessment of stochastic optimizers and the attainment functions. In E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele, C.A.C. Coello, D. Corne. Proceedings of the First Internal Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2001). Berlin, Springer-Verlag. Pp. 213–225.
9. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning // Reading Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company. 1989. P. 201.
10. J.J. Durillo, A.J. Nebro. jMetal. A Java Framework for Multi-Objective Optimization // Advances in Engineering Software 42. 2011. Pp. 760–771.
11. Knowles J. A summary-attainment-surface plotting method for visualizing the performance of stochastic multiobjective optimizers // Computational Intelligence and Applications (Proceedings of the Fifth International Workshop on Intelligent Systems Design and Applications). 2005. Pp. 552–557.
12. M. Lukasiewicz, M. Glass, F. Reimann, J. Teic. Opt4J - A Modular Framework for Meta-heuristic Optimization // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computing Conference. 2011. Pp. 1723–1730.
13. S. Bleuler, M. Laumanns, L. Thiele, and E. Zitzler. PISA A Platform and Programming Language Independent Interface for Search Algorithms // In Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO. 2003. Pp. 494–508.
14. Shaw K. J., Nortcliff A. L., Thompson M., Love J., Fonseca C.M., Fleming P.J. Assessing the Performance of Multiobjective Genetic Algorithms for Optimization of a Batch Process Scheduling Problem // Congress of Evolutionary Computation, Washington D.C. IEEE Service Center. 1999. Pp. 37–45.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Дунаев Михаил Павлович

Д.т.н., профессор, Иркутский национальный исследовательский
технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83,
e-mail: mdunaev10@mail.ru

Дунаев Андрей Михайлович

Аспирант, Иркутский национальный исследовательский
технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83,
e-mail: west-ma@yandex.ru

Аннотация. В рамках настоящей работы предложена автоматизированная система управления процессами сушки древесины. Посредством означенной системы осуществляется управление физическими процессами, протекающими в сушильной камере. Авторами статьи представлены функциональная схема автоматизированной системы управления (АСУ) оборудованием и детальное описание принципов её функционирования. Рассмотрены основные этапы создания и примеры работы экспертной системы (ЭС) «FCTD1», предназначенной для диагностирования сушильной камеры и позволяющей выполнять поиск неисправностей её функциональных блоков.

Ключевые слова: автоматизированная система управления; процесс сушки древесины; лесосушильная камера; алгоритм режима сушки; диагностирование; экспертная система.

Цитирование: Дунаев М.П., Дунаев А.М. Автоматизированная система управления процессами сушки древесины // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 133–141. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-12

Введение. Реалии различных сфер современной электроэнергетики усугубляют актуальность и значимость решения специфических задач, касающихся повышения качества и эффективности производств, осуществление технологических процессов в которых обеспечивается функционированием сложного электрического оборудования (ЭО) [3, 6].

В настоящее время значительная часть промышленных лесосушильных камер, использующих естественную циркуляцию сушильного агента, имеют невысокие технические характеристики. В особенной мере это касается значительного времени сушки и повышенных энергетических затрат.

Основной целью данной работы является создание автоматизированной системы научных исследований, позволяющей преодолевать вышеизложенные недостатки оборудования для сушки древесины.

1. Режимы процессов сушки. Преодоление первого из вышеупомянутых недостатков лесосушильных камер с естественной циркуляцией (значительного времени сушки) возможно осуществить с помощью применения осциллирующих режимов сушки

пиломатериалов [6]. Сущность этих режимов заключается в том, что весь процесс сушки при своей реализации подразделяется на повторяющиеся временные циклы прогрева и охлаждения штабеля древесины. При этом температурная разница между циклами прогрева и охлаждения составляет порядка 10 – 15 °С.

Необходимо также отметить, что технологический процесс сушки пиломатериалов в описываемом режиме начинается с цикла повышения температуры в сушильной камере. Указанный феномен закономерно влечёт за собой значительное повышение температуры верхних слоёв древесины. При последующей реализации цикла охлаждения происходит понижение влажности и температуры воздуха в сушильной камере. Вследствие упомянутого явления наружные слои древесины начинают отдавать влагу, в результате чего температура наружных слоёв древесины, напротив, становится ниже температуры внутренних слоёв материала.

Основной эффект от применения осциллирующих режимов заключается в продвижении влаги от более нагретых слоёв древесины к менее нагретым слоям. Всё это приводит не только к ускорению процесса сушки, но и к тому, что сушка происходит более равномерно, и тем самым осуществляется предотвращение возникновения опасных напряжений в пиломатериале. В целях обеспечения ещё большего снижения времени сушки и энергетических затрат лесосушильных камер применяется так называемый комбинированный режим сушки пиломатериалов [5, 7, 8], который сочетает в себе осциллирующий режим и естественную циркуляцию с кратковременным циклическим открыванием выпускного клапана сушильной камеры, а также включением принудительной циркуляции.

Применение указанного метода предполагает соблюдение следующих технологических предписаний:

- Нагрев в камере включается до достижения сушильным агентом значения $t_{ц.п.}$ – температуры циклового прогрева. Время этапа циклового прогрева составляет $\tau_{ц.п.}$.
- Далее нагрев отключается до достижения $t_{ц.о.}$ – температуры циклового охлаждения. Быстрому переходу от циклового прогрева к цикловому охлаждению способствует кратковременная вентиляция сушильной камеры посредством включения вентилятора.
- После завершения этапа циклового охлаждения, время которого составляет $\tau_{ц.о.}$, происходит переход к этапу циклового прогрева.
- Процесс сушки пиломатериала заканчивается, когда влажность в камере достигает заданного значения W_3 .

Графическое представление описанного алгоритма комбинированного режима сушки пиломатериалов показано на рисунке 1.

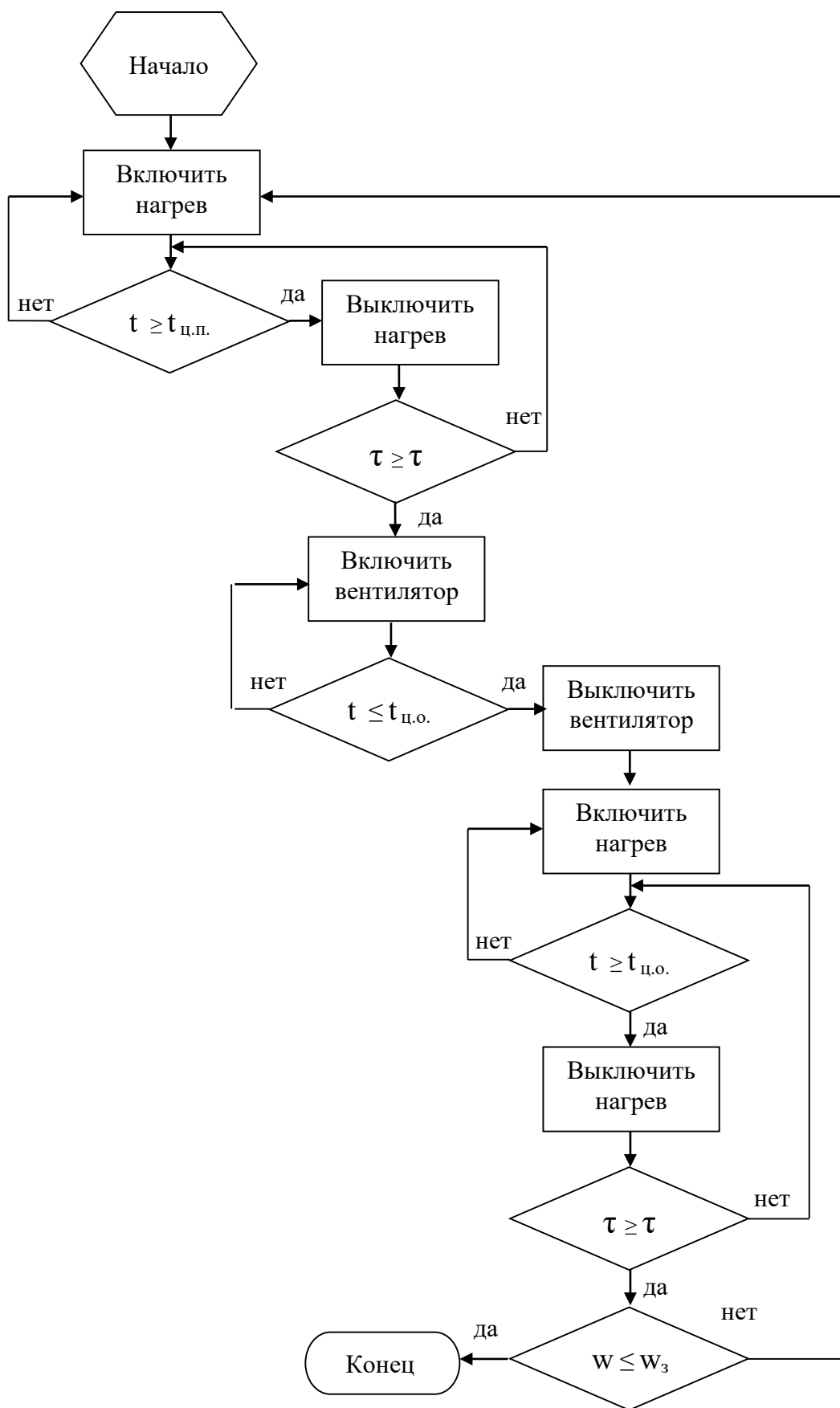


Рис. 1. Алгоритм комбинированного режима сушки пиломатериалов

2. Структура АСУ процессами сушки древесины. Для исследования процессов сушки пиломатериала авторами данного исследования предложена автоматизированная система управления процессами сушки древесины.

Указанная система позволяет управлять физическими процессами, протекающими в сушильной камере, а также исследовать их. Функциональная схема рассматриваемой АСУ представлена на рисунке 2.

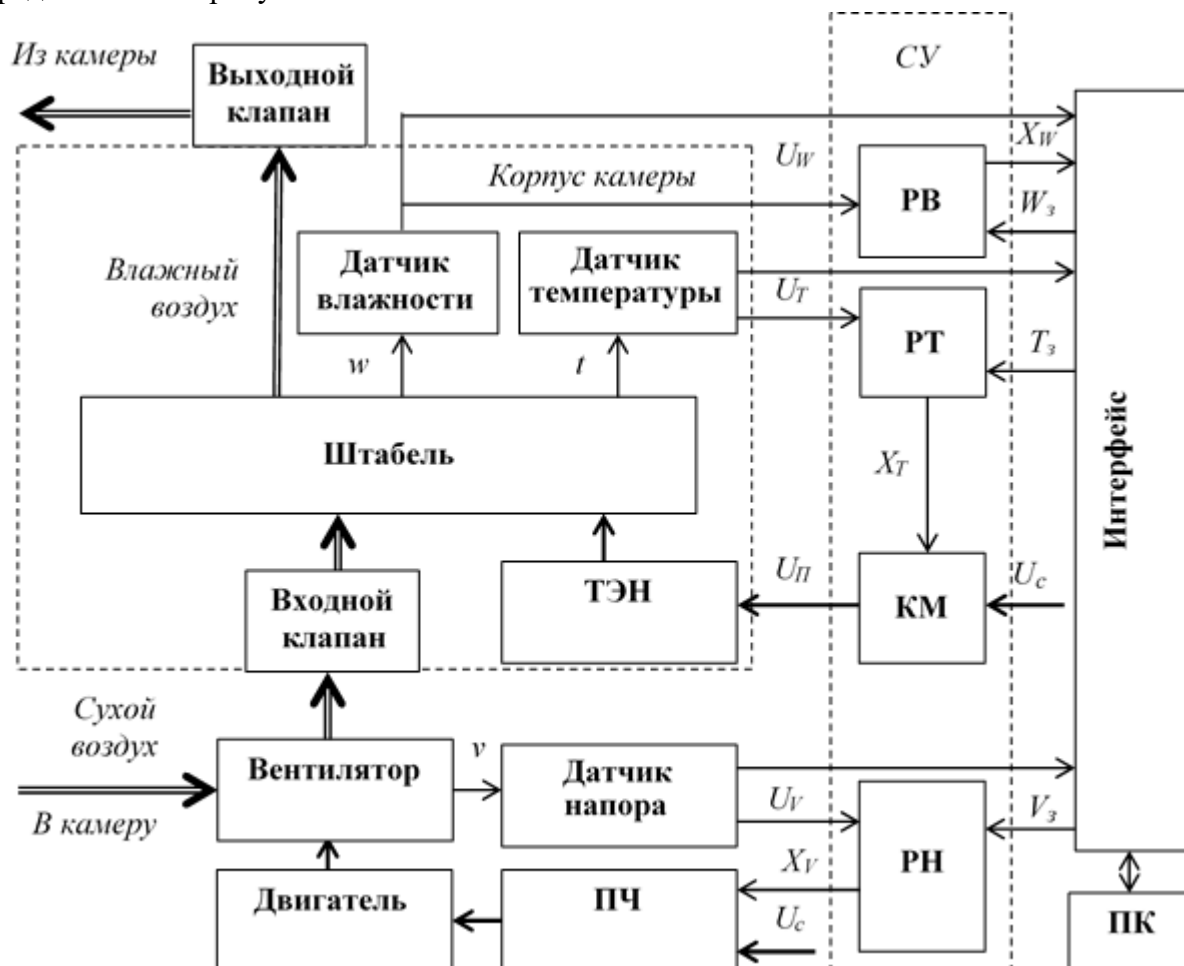


Рис. 2. Функциональная схема АСУ процессами сушки древесины

В корпус камеры помещён штабель пиломатериала. Нагрев воздуха в камере производится при помощи теплоэлектронагревателей (*ТЭН*), управляемых *системой управления (СУ)* сушильной камеры по программе, заданной в управляющем компьютере *ПК*. Подача напряжения питания U_{Π} на *ТЭН* производится включением контактора *КМ* по сигналу управления X_T . Питание *КМ* осуществляется от источника питания U_c .

Периодический продув камеры осуществляется посредством центробежного вентилятора, приводимого в движение асинхронным двигателем, питаемым от преобразователя частоты (*ПЧ*), который управляется *СУ*. При этом вход сухого воздуха производится через входной клапан, а выведение влажного воздуха, прошедшего через штабель, производится через выходной клапан.

Питание *ПЧ* осуществляется от источника питания U_c . Управление *ПЧ* осуществляется по сигналу управления X_v . Контроль температуры t и влажности w в камере и внутри штабеля производится соответственно при помощи регуляторов температуры *РТ* и

влажности $PВ$, а также *датчиков температуры и влажности*. Сигналы U_T и U_W от *датчиков температуры и влажности* передаются в $СУ$, которая через *интерфейс* подключена к $ПК$. В $ПК$ хранится программа сушки и ведётся контроль параметров процесса сушки.

Контроль напора сухого воздуха v на входе в *камеру* производится при помощи регулятора напора $РН$, а также *датчика напора*, сигнал U_V от которого также передаётся в $СУ$. Текущие сигналы задания температуры T_3 , влажности W_3 и напора V_3 поступают на вход соответствующих регуляторов $РТ$, $РВ$ и $РН$ через *интерфейс* от программы сушки из $ПК$.

Программа исследования задаётся алгоритмом сушки, представленным на рисунке 1. Исходные данные (параметры процесса сушки: начальная влажность древесины, температура и влажность воздуха в сушильной камере) определяются $СУ$ автоматически и хранятся в памяти $ПК$. Визуализация и фиксация текущих параметров процесса сушки осуществляется $ПК$ посредством служебной программы «МСТ10».

Результаты исследований технологического процесса сушки древесины сохраняются в памяти $ПК$ в виде файлов с расширением «.xls», после чего используются для анализа и последующей корректировки настроек АСУ.

Однако, следует отметить, что, помимо программного управления, большое значение для осуществления автоматизации поддержки выполнения технологического процесса сушки древесины в настоящее время имеет создание экспертных систем функционального диагностирования, поскольку указанная разновидность процесса выявления неисправностей наиболее предпочтительна с экономической точки зрения по причине того, что позволяет обнаружить большинство дефектов, влияющих на ресурс, задолго до его отказа, и при этом не требует останова электрооборудования [1]. В связи с вышеизложенным, а также с тем, что в состав электрооборудования входит достаточно сложный электронный узел – преобразователь частоты (ПЧ), разрабатываемая АСУ нуждается также в таком значимом программном компоненте, как экспертная система для диагностирования электрооборудования лесосушильной камеры.

3. Диагностическая экспертная система «FCTD1». В целях обеспечения надлежащего уровня качества экспертной системы как автоматизированного помощника при диагностировании технического объекта [9] процесс разработки её базы знаний предполагает выполнение нижеследующих этапов:

- извлечение знаний о предметной области;
- выбор инструментального средства построения базы знаний;
- представление полученных знаний;
- формирование БЗ с помощью выбранного средства;
- тестирование и отладка созданной экспертной системы.

Извлечение знаний о неисправностях основных функциональных **блоков** камеры осуществлено посредством такого активного коммуникативного метода, как интервьюирование эксперта.

В качестве инструментального средства для разработки БЗ диагностической ЭС выбрана система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой «Гераклит» [10], обладающая развитым графическим интерфейсом.

Знания, полученные в ходе проведения интервью с экспертом, представлены в виде продукционных правил классического вида «ЕСЛИ–ТО» и внесены в состав БЗ создаваемой

ЭС. Необходимо отметить, что при реализации этапов представления и формирования консеквентов указанных правил учтён такой аспект, как особенности структурирования информации о выявленных неисправностях объекта диагностирования, поскольку именно означенные особенности важны для обеспечения дальнейшего диагностирования и прогнозирования технического состояния исследуемого электрического оборудования [2].

Работа созданной экспертной системы описана на реальном, конкретном примере диагностирования оборудования лесосушильной камеры.

При осуществлении диалога с пользователем [4] экспертная система, прежде всего, последовательно выявляет штатный характер вращения вентилятора, корректность воздушного напора на выходе ЦВ и нормальность его шума, затем подтверждает правильное состояние входного клапана при включении и выключении вентилятора и, в заключение, определяет наличие неисправности выходного клапана.

Результаты работы ЭС «FCTD1» в форме протокола диалога с наладчиком проиллюстрированы рисунком 3.

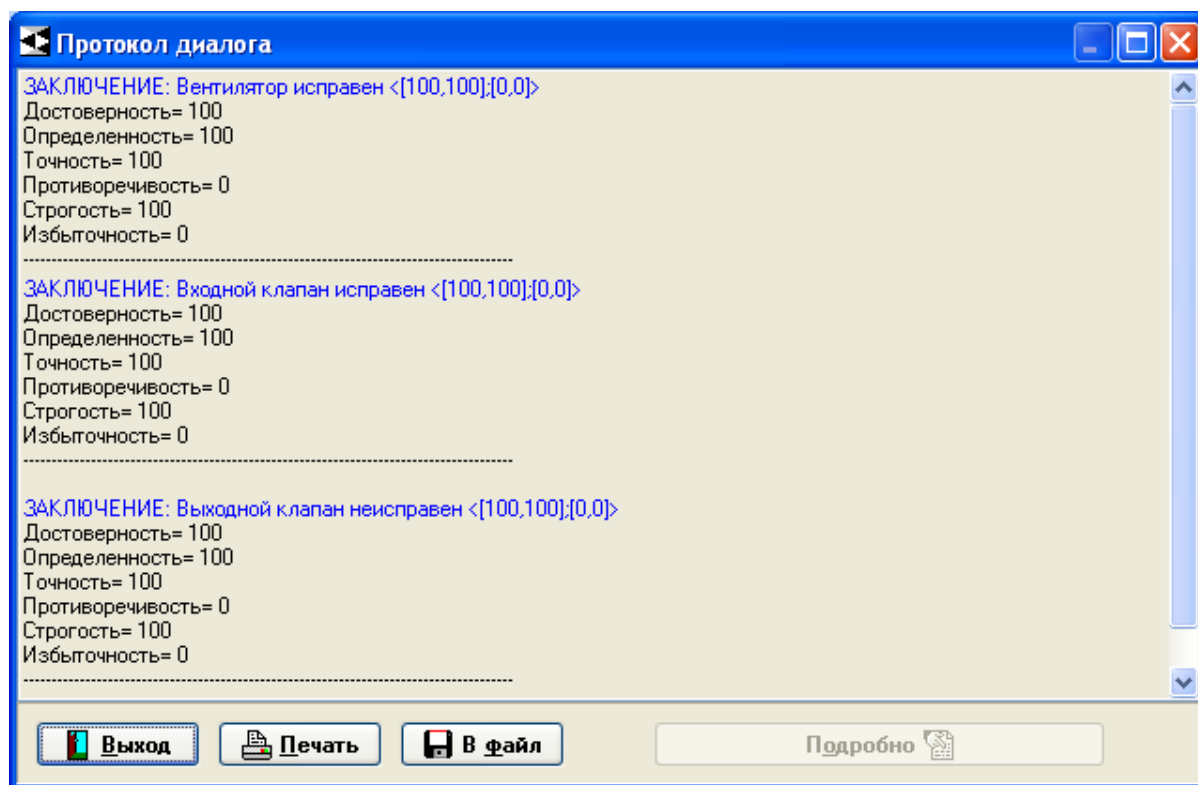


Рис. 3. Результаты работы ЭС «DCV1»

Закключение. В рамках настоящего исследования построена функциональная схема автоматизированной системы управления процессами сушки древесины и в соответствии с данной схемой разработана система, включающая аппаратные и программные компоненты.

С помощью программного приложения «МСТ10», предназначенного для контроля сложного электрооборудования, авторами реализовано управление комбинированным режимом сушки пиломатериалов.

Средствами системы моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой «Гераклит» разработана диагностическая экспертная система

«FCTD1», позволяющая выявлять дефекты основных аппаратных компонентов лесосушильной камеры.

Корректность и эффективность функционирования созданной автоматизированной системы управления процессами сушки древесины подтверждены на практике. Практическое применение разработанной АСУ позволяет снизить время сушки и энергетические затраты на осуществление вышеизложенных процессов в 1,5 – 2,0 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Филиппов В.Н., Насыров Э.М. Программное средство диагностики электродвигателя машинного агрегата методом спектрального анализа высших гармонических составляющих тока и напряжения // Кибернетика и программирование. 2015. № 6. С. 6–20. Режим доступа: https://e-notabene.ru/kp/article_17625.html (дата обращения 26.05.2019)
2. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Информационно-аналитическая поддержка экспертизы промышленной безопасности объектов химии, нефтехимии и нефтепереработки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 8. С. 30–36.
3. Васюченко П.В. Повышение надёжности работы электрооборудования путём применения методов диагностики // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 5(123). С. 27–34.
4. Дунаев М.П., Дунаев А.М. Экспертный комплекс для наладки преобразователей частоты // Информационные и математические технологии в науке и управлении: материалы XX Байкальской Всероссийской конференции (г. Иркутск, 29 июня 2015 г.). Иркутск. 2015. Ч. III. С. 20–28.
5. Михеев А.А., Дунаев М.П. Алгоритмы комбинированного режима в лесосушильной камере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1(33). С. 164–166.
6. Михеев А.А. Методы и средства автоматизированного управления сушильной камерой (промышленность) : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Иркутск. 2015. 133 с.
7. Михеев А.А. Способ комбинированной циркуляции в лесосушильной камере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4(32). С. 202–205.
8. Михеев А.А., Дунаев М.П. Способ сушки древесины с комбинированной циркуляцией воздуха в камере // Вестник ИрГТУ. 2012. № 4(63). С. 168–172.
9. Романов А.Н., Одинцов Б.Е. Советующие информационные системы в экономике. М.: ЮНИТИ. 2000. 487 с.
10. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ программы для ЭВМ «Гераклит 2.Х». № 2013616260 от 02.07.2013, Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой / Л.В. Аршинский; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF WOOD DRYING PROCESSES

Mikhail P. Dunaev

Dr., Professor, Irkutsk National Research Technical University (ISTU)
83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: *mdunaev10@mail.ru*

Andrey M. Dunaev

Graduate student, Irkutsk National Research Technical University (ISTU)
83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: *west-ma@yandex.ru*

Abstract. As part of this work, an automated control system (ACS) for wood drying processes has been proposed. The system controls the physical processes that take place in the wood-drying chamber. The authors of the article presented a functional diagram of an automated control system (ACS) of the equipment and a detailed description of the principles of its operation. The main stages of creation and examples of the expert system (ES) «FCTD1», designed to diagnose the automated control system of the drying chamber and allows troubleshooting of its functional blocks, are considered.

Keywords: automated research system; wood drying process; wood-drying chamber; wood drying algorithm; diagnosis; expert system.

References

1. Bashirov M.G. Churagulov D.G., Filippov V.N., Nasyrov E.M. Programmnoe sredstvo diagnostiki ehlektrodivigatelya mashinnogo agregata metodom spektral'nogo analiza vysshih garmonicheskikh sostavlyayushchih toka i napryazheniya [Software for diagnostics of an electric motor of a machine unit by the method of spectral analysis of the highest harmonic components of current and voltage] // Kibernetika i programmirovaniye = Cybernetics and Programming. 2015. No 6. Pp. 6–20. Available at: https://e-notabene.ru/kp/article_17625.html (accessed 26.05.2019). (in Russian)
2. Berman A.F., Nikolajchuk O.A., Pavlov A.I., Yurin A.Yu. Informacionno-analiticheskaya podderzhka ehkspertizy promyshlennoj bezopasnosti ob"ektov himii, neftekhimii i neftepererabotki [Information and analytical support for the examination of industrial safety of chemical, petrochemical and oil refining facilities] // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering. 2018. No 8. Pp. 30–36. (in Russian)
3. Vasyuchenko P.V. Povyshenie nadyozhnosti raboty ehlektrooborudovaniya putyom primeneniya metodov diagnostiki [Improving the reliability of electrical equipment through the use of diagnostic methods] // Ehnergobezopasnost. Ehnergetika = Ehnergoaudit [Energy saving. Energy. Energy audit. 2014. No 5(123). Pp. 27–34. (in Russian)
4. Dunaev M.P., Dunaev A.M. Ehkspertnyj kompleks dlya naladki preobrazovatelej chastoty [Expert complex for setting up frequency converters] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: materialy XX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii (g. Irkutsk, 29 iyunya 2015 g.) = Information and mathematical technologies in science and management: materials of the XX Baikal All-Russian Conference (Irkutsk, June 29, 2015). 2015. Vol. 3. Pp. 20–28. (in Russian)

5. Mikheev A.A., Dunaev M.P. Algoritmy kombinirovannogo rezhima v lesosushil'noj kamere [Algorithms of the combined mode in the wood-drying chamber] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. No 1(33). Pp. 164–166. (in Russian)
6. Mikheev A.A. Metody i sredstva avtomatizirovannogo upravleniya sushil'noj kameroj (promyshlennost') : diss. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk : 05.13.06 [Methods and means of automated control of the drying chamber (industry): diss. on the competition deg. Cand. of Tech. Sciences: specialty 05.13.06]. (in Russian)
7. Mikheev A.A., Dunaev M.P. Sposob kombinirovannoj cirkulyacii v lesosushil'noj kamere [The method of combined circulation in the wood-drying chamber] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. No 4(32). Pp. 202–205. (in Russian)
8. Mikheev A.A., Dunaev M.P. Sposob sushki drevesiny s kombinirovannoj cirkulyaciej vozduha v kamere [The method of drying wood with a combined air circulation in the chamber] // *Vestnik IrGTU* = Bulletin of ISTU. 2012. No 4(63). Pp. 168–172. (in Russian)
9. Romanov A.N., Odincov B.E. Sovetuyushchie informacionnye sistemy v ehkonomie [Advising information systems in economics]. Moscow. YUNITI = YUNITI Publ. 2000. 487 p. (in Russian)
10. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii v Reestre programm dlya EHVM programmy dlya EHVM «Geraklit 2.X». № 2013616260 ot 02.07.2013, Rossijskaya Federaciya, Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti (Rospatent). Sistema modelirovaniya pravdopodobnyh rassuzhdenij na osnove logik s vektornoj semantikoj / L.V. Arshinskij; zayavitel' i patentoobladatel' – Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. [Certificate of official registration in the Register of Computer Programs for the computer program "Heraclit 2.X". No. 2013616260 of 02.07.2013, the Russian Federation, the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). A simulation system for plausible reasoning based on logics with vector semantics. Arshinsky; the applicant and the patent holder are the Irkutsk State University of Communications]. (in Russian)

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЭС

Попова Ольга Михайловна

К.э.н., вед. специалист по информационным технологиям
лаборатории развития электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, e-mail: pom@isem.irk.ru

Аннотация. В статье предложены принципы создания прототипов программно-вычислительных комплексов. Показано место разрабатываемого прототипа программно-вычислительного комплекса с учетом требований интеллектуальной ЭЭС. Для задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети ЭЭС рассмотрены программные и интерфейсные особенности построения прототипа. Приведены примеры последовательного формирования варианта сети и вывода результатов.

Ключевые слова: прототип, программно-вычислительный комплекс, системообразующая электрическая сеть, оптимизация развития сети, интеллектуальная ЭЭС, база данных, геоинформационные технологии.

Цитирование: Попова О.М. Разработка прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети с учетом требований интеллектуальной ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 142–150. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-13

Введение. Реформирование электроэнергетики России предусматривает переход на инновационную технологическую платформу путем создания интеллектуальной ЭЭС. За рубежом такая платформа получила название Smart Grid [15]. Концепция интеллектуальной ЭЭС [3], одобренная ОАО "Федеральная сетевая компания ЕЭС", рассматривает такую систему, в которой все субъекты электроэнергетического рынка (генерация, сеть, потребители) принимают активное участие в процессах производства, передачи и распределения электроэнергии.

Ведущая роль при модернизации электроэнергетики на новых принципах отводится электрической сети как структуре, обеспечивающей надежные связи генерации и потребителя [2, 4, 10]. В составе интеллектуальной ЭЭС электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режимов работы энергосистемы [11]. Такую сеть называют активно-адаптивной электрической сетью [3].

В ИСЭМ СО РАН разработан и развивается программно-вычислительный комплекс (ПВК) для решения задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети (СЭС) [6, 7]. Состав ПВК, его информационное и программное обеспечение подробно рассмотрены в работе [8]. В связи с актуальностью концепции интеллектуальной ЭЭС

необходимо учитывать принципы ее создания при развитии ПВК, одним из которых является разработка различных прототипов.

1. Принципы создания прототипов. Прототип – это версия ПВК, которая используется для презентации и тестирования до поступления производственного заказа [1, 13]. Разработка прототипа начинается с создания концепции продукта. Изучаются особенности объекта и современные инновации, рассматриваются ожидаемые результаты реализации проекта. Разработчики предлагают несколько моделей, создается первый рабочий образец. Данный прототип проходит тестирование и испытание всех функций, которыми он обладает. Затем формируется стандарт продукта.

Прототипы программ создаются для анализа свойств исследуемой системы, предлагая возможности для коррекции при существенно меньших затратах. Прототипом интерфейса может служить даже макетная реализация.

При создании прототипа можно не в полной мере учитывать следующие свойства разрабатываемого программного комплекса [9]:

- Корректность. Там, где это приемлемо, используются неточные данные.
- Завершенность. Прототип может функционировать лишь в ограниченном смысле, возможно, лишь с одним наперед заданным фрагментом входных данных и небольшим меню.
- Надежность. Процедура проверки ошибок, вероятно, будет неполной или будет отсутствовать вообще.
- Стиль. Имена переменных, функций, процедур, их последовательность не являются окончательными.

2. Построение прототипа программного комплекса для задачи развития СЭС.

Место разрабатываемого прототипа с учетом требований интеллектуальной ЭЭС показано на рис. 1.

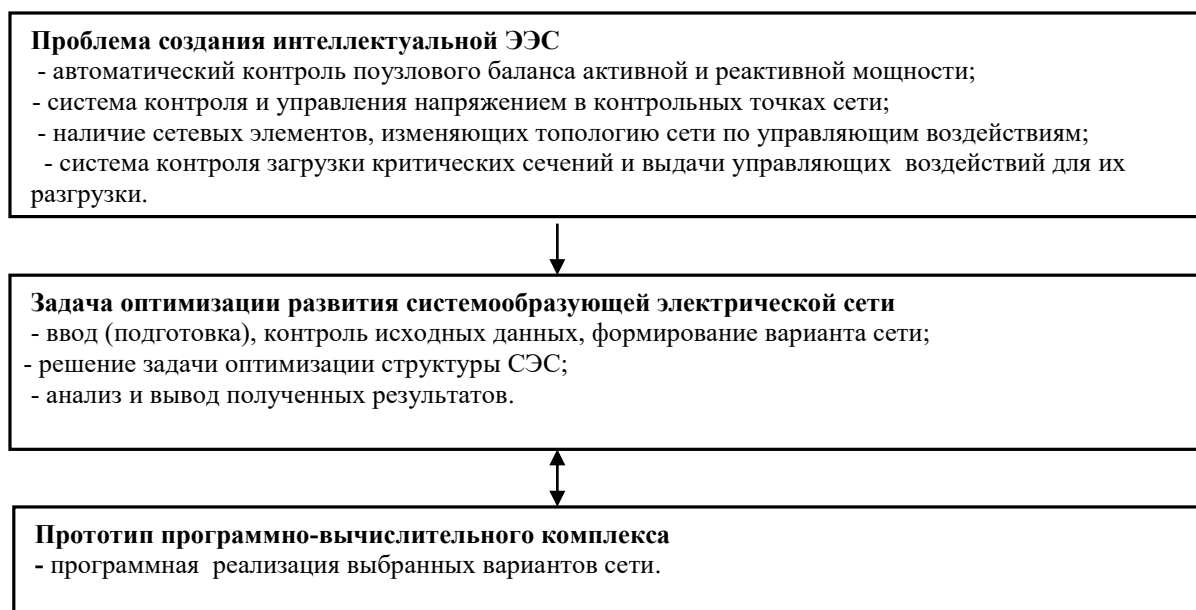


Рис. 1. Прототип программного комплекса для задачи развития СЭС с учетом требований интеллектуальной ЭЭС

Как отмечено в [2], основные отличия интеллектуальной ЭЭС заключаются в структуре и динамике развития системы.

В связи с постановкой задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети ЭЭС, рассмотренной в [6, 8], существенное значение для прототипа имеет формирование варианта сети. Прежде всего, необходимо осуществить ввод и контроль исходных данных. Сначала в основной программе ElNetCut выбирается необходимая работа над вариантом (рис. 2). При этом, если необходимо создать вариант с "нуля", то последовательно формируются необходимые таблицы в БД Elnetworks [12] (рис. 3).

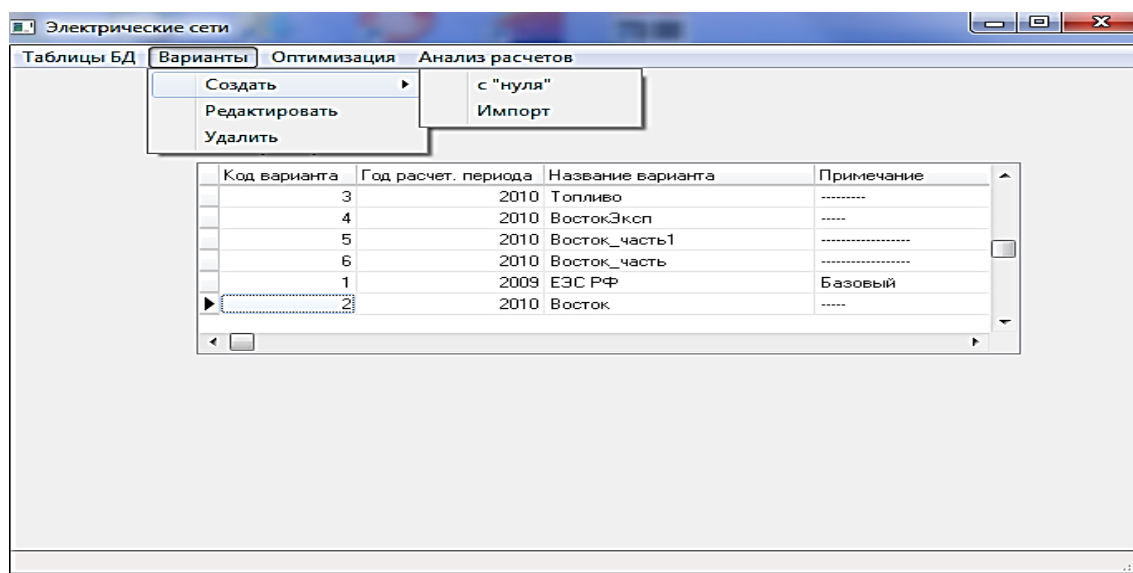


Рис. 2. Выбор варианта электрической сети

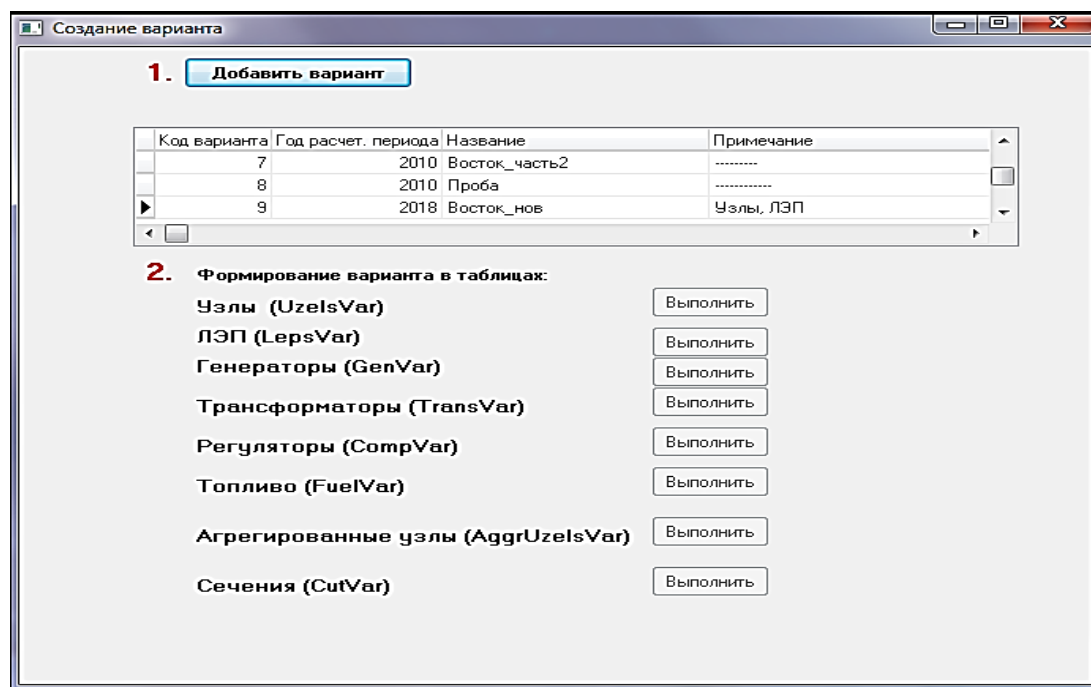


Рис. 3. Формирование таблиц выбранного варианта СЭС в базе данных

Схема базы данных Elnetworks (СУБД MySQL) показана на рис. 4.

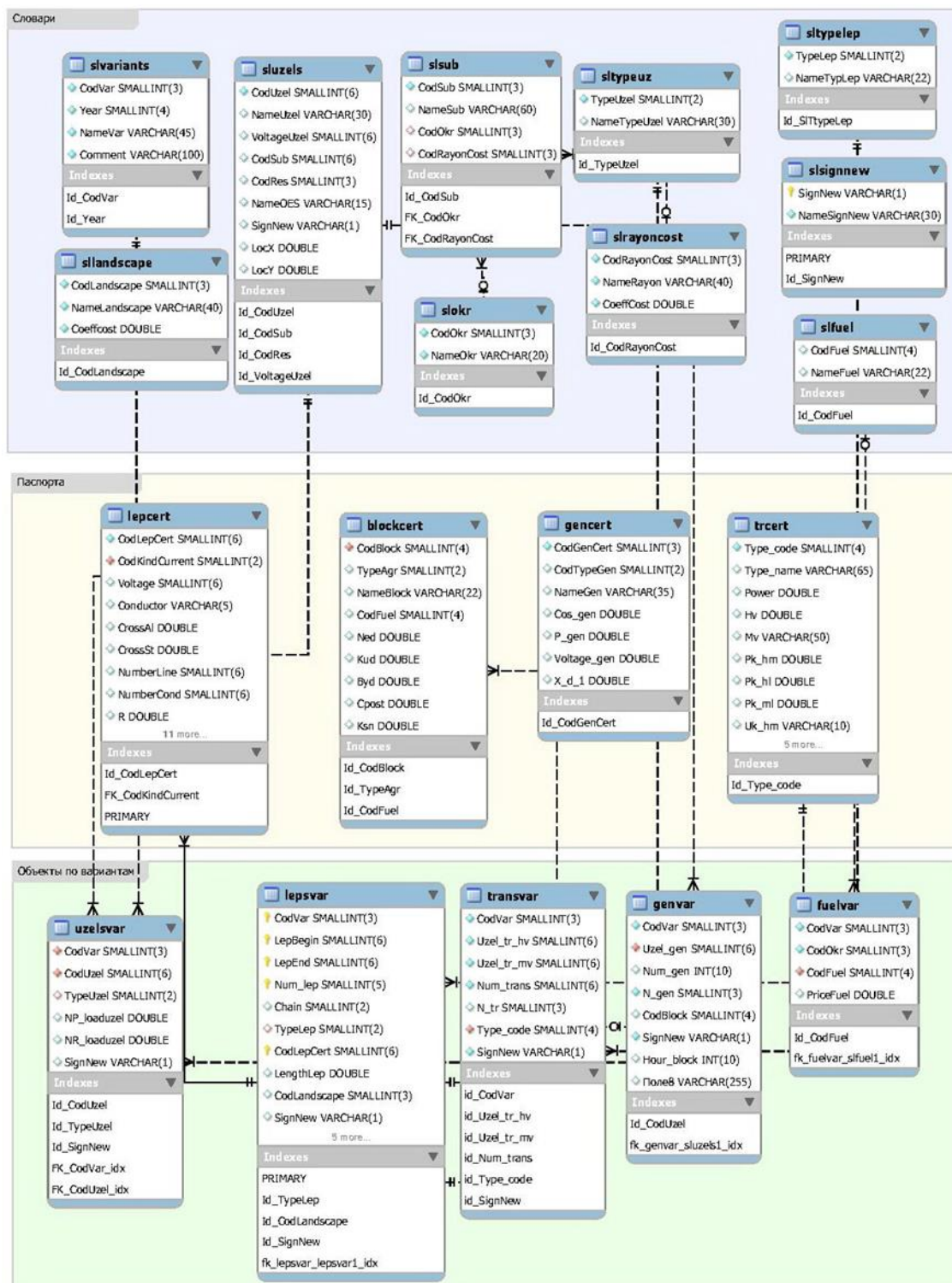


Рис. 4. Схема базы данных Elnetworks

Исходные данные для модели оптимизации развития СЭС включают: избыточный граф электрической сети, описывающий все существующие и новые электрические связи (кандидаты) в выбранном варианте, рабочие мощности станций $P_i^{\text{ген}}$, мощности нагрузок в узлах ($P_i^{\text{потр}}$) и пропускные способности элементов СЭС ($P_{ij}^{\text{сеть}}$). На основе паспортных данных оборудования для каждой электрической связи (трансформатора и линии

электропередач) рассчитываются удельные приведенные затраты на единицу передаваемой мощности по элементам СЭС $C_{ij}^{\text{нов.сеть}}$. Для узлов графа, в которых размещены электрические станции, рассчитываются удельные переменные затраты на генерируемую мощность ($C_i^{\text{ген}}$).

В соответствии с [6] проблема развития СЭС реализована в виде задачи поиска минимального потока на графе с целевой функцией

$$\min \left(\sum_i \sum_j C_{ij}^{\text{нов.сеть}} X_{ij}^{\text{нов.сеть}} + \sum_i C_i^{\text{ген}} X_i^{\text{ген}} \right), \quad (1)$$

т.е. минимум приведенных затрат при соблюдении балансов мощности в узлах ($i = 1, N$):

$$X_i^{\text{ген}} + \sum_j (1 - p_{ij}) X_{ji}^{\text{сеть}} - \sum_j X_{ij}^{\text{сеть}} = P_i^{\text{погр}}, \quad (2)$$

где перетоки мощности по всем элементам СЭС удовлетворяют условиям $0 \leq X_{ij}^{\text{сеть}} \leq X_{ij}^{\text{сущ.сеть}} + X_{ij}^{\text{нов.сеть}}$ с ограничениями на потоки мощности по существующим, новым элементам СЭС ($P_{ij}^{\text{сущ.сеть}}$, $P_{ij}^{\text{нов.сеть}}$), в сечениях ($P_i^{\text{пред}}$) и на располагаемые мощности станций:

$$0 \leq X_{ij}^{\text{сущ.сеть}} \leq P_{ij}^{\text{сущ.сеть}}, \quad 0 \leq X_{ij}^{\text{нов.сеть}} \leq P_{ij}^{\text{нов.сеть}}; \quad (3)$$

$$0 \leq X_i^{\text{ген}} \leq P_i^{\text{ген}}, \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_{X_{ij}^{\text{сеть}} \in I} X_{ij}^{\text{сеть}} \leq P_i^{\text{пред}}. \quad (5)$$

Неизвестными величинами являются $X_{ij}^{\text{сущ.сеть}}$, $X_{ij}^{\text{нов.сеть}}$ (потоки мощности по существующим и новым элементам СЭС между узлами i и j) и мощности генерации в узлах $X_i^{\text{ген}}$; p_{ij} – удельный коэффициент потерь мощности при передаче по связи между узлами i и j .

При редактировании таблиц выбранного варианта СЭС (рис. 5) вызываются и отображаются соответствующие таблицы базы данных и далее производятся необходимые действия по их корректировке. Здесь пользовательский интерфейс отражает взаимодействие основной программы с СУБД MySQL.

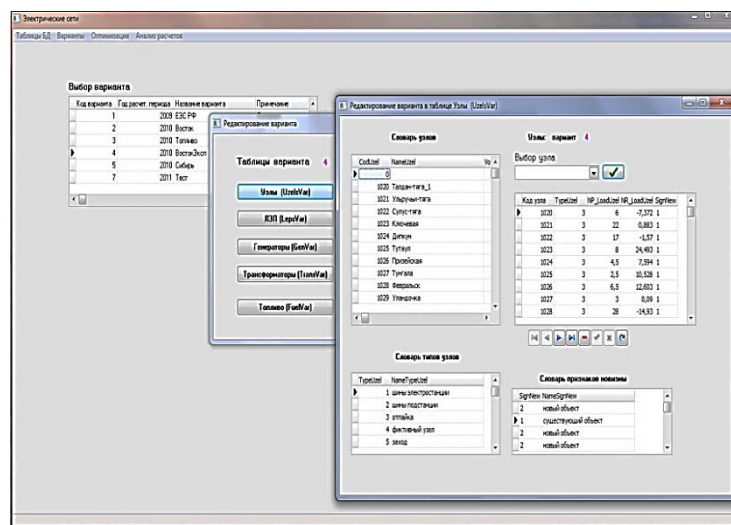


Рис. 5. Редактирование таблиц варианта СЭС в базе данных

Визуализация результатов в процессе работы компьютерной программы ElNetCut на этапе подготовки варианта СЭС в соответствии с постановкой задачи первоначально осуществляется в табличном виде. На экран выводятся данные, необходимые для проведения оптимизации структуры СЭС (рис. 6).

Формирование исходных данных для оптимизации

Выбранный вариант 4

Узлы

Код узла	Наименование	Нагрузка	Новизна
1020	Талдан-тяга_1	6.00	1
1021	Ульручи-тяга	22.00	1
1022	Сулус-тяга	17.00	1
1023	Ключевая	8.00	1
1024	Дикун	4.50	1
1025	Тутаул	2.50	1
1026	Призейская	6.50	1

Генерация

Код узла	Ном. мощность	Уд. переменные затраты	Новизна
1031	450.00	0.00	1
1043	900.00	0.00	1
1044	330.00	29440.00	1
1052	220.00	0.00	1
1059	670.00	0.00	1
1060	1340.00	0.00	1
1061	600.00	29440.00	2

Электрическая сеть

Начало ЛЭП	Конец ЛЭП	Уд. затраты	Пред. пропускная способ-ть	Уд. коэфф. потерь мощности	Новизна
1022	1023	25.30	218	0.0011400	1
1022	1134	25.30	218	0.0019200	1
1024	1025	28.82	249	0.0033900	1
1024	1130	28.82	249	0.0089580	1
1025	1026	28.82	249	0.0055860	1
1026	1027	28.82	249	0.0089700	1

Редактировать

OK

Рис. 6. Визуализация результатов подготовки данных варианта СЭС

После проверки подготовленных данных необходимая отформатированная информация посылается в систему GAMS для непосредственного решения задачи оптимизации структуры сети. Полученные результаты выводятся как в текстовом режиме, так и в графическом (картографическом) виде с помощью пакета MapInfo Professional [5, 14] (рис. 7).

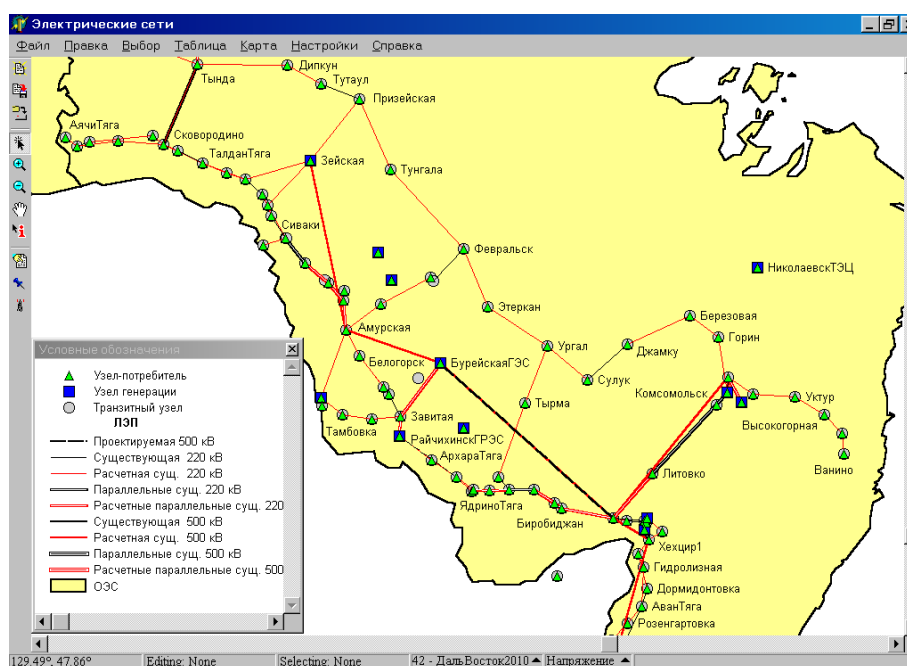


Рис. 7. Пример вывода результатов в графическом виде

Причем эта информация используется как для исследования сходимости алгоритма оптимизации (1)–(5), так и для отображения конечных результатов. Применение различных видов визуализации промежуточных и конечных результатов решения задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети способствует уточнению исходной информации по выбранным вариантам сети, а также ускорению процесса работы компьютерных программ, входящих в состав ПВК.

Заключение. Использование разработанного прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети позволит, с учетом требований интеллектуальной ЭЭС осуществить эволюционное развитие ПВК, а именно последовательно решать проблемы информационного обеспечения ПВК, совершенствовать программное обеспечение и пользовательский интерфейс задачи.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания III.17.4.2. (рег. № АААА-А17-117030310438-1) фундаментальных исследований СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варфел Т.З. Прототипирование. Практическое руководство. М: Манн, Иванов и Фербер. 2013. 240 с.
2. Инновационная электроэнергетика – 21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ИЦ "Энергия". 2017. 584 с.
3. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М., ОАО "ФСК ЕЭС". 2012. 219 с.
4. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2015. 448 с.
5. Попова О.М. Компьютерная реализация и визуализация задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): Материалы Девятой междунар. конф.-и. (3 –5 окт. 2016 г.). Т. 2. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2016. С. 37–39.
6. Попова О.М., Усов И.Ю. Алгоритмы упрощенного анализа надежности при оптимизации системообразующей электрической сети // Проблемы управления. 2014. № 2. С. 49–55.
7. Попова О.М. Особенности компьютерной реализации задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети // XIX Байкальская Всероссийская конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении»: труды. Часть I. Иркутск. ИСЭМ СО РАН. 2014. С. 61–64.
8. Попова О.М. Развитие программно-вычислительного комплекса для решения задачи оптимизации структуры системообразующей сети электроэнергетических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 1(5). С. 102–111.
9. Прототипы в программировании. Режим доступа: <http://www.imaladec.com/story/prototypes> (дата обращения 15.10.2018).
10. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС. 2012. 376 с.
11. Теоретические основы, методы и модели управления большими электроэнергетическими системами / отв. ред. Н.И. Воропай. М., ПАО "ФСК ЕЭС", 2015. 188 с.

12. Усов И.Ю., Попова О.М. Формирование базы данных для оптимизации структуры системообразующей электрической сети // Вестник ИрГТУ. 2013. № 1. С. 139–144.
13. Что такое Прототип. Режим доступа: <http://chto-takoe.net/chto-takoe-prototip/> (дата обращения 15.01.2019).
14. Popova O.M. Building a geoinformation system of electric networks // Problemy Avtomatiki i Upravleniya (Scientific and Technical Journal / National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic. Bishkek: IAIT). 2010. No.2. Pp. 49–52.
15. Smart Grid. Режим доступа: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_\(Умные_Сети\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_(Умные_Сети)) (дата обращения 22.01.2018).

UDK 681.3.06: 621.311

**SOFTWARE PROTOTYPE DEVELOPMENT FOR THE COMPUTING
OF SYSTEM-FORMING ELECTRICAL NETWORK TAKING INTO ACCOUNT
REQUIREMENT OF SMART GRID**

Olga M. Popova

PhD., Leading IT expert, e-mail: pom@isem.irk.ru
Laboratory for Expansion of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper focuses on the principles of prototyping. The role of the software prototype to be developed in the context of intelligent electric power system is demonstrated. The software and interface features of prototyping are considered for the optimization of the structure of the backbone electrical network of the electric power system. The examples of the sequential formation of a network option and the display of the software operation results are given.

Key words: prototype, software, backbone electrical network, network development optimization, intelligent electric power system, database, geoinformation technologies.

References

1. Varfel T.Z. Prototipirovanie. Prakticheskoe rukovodstvo [Prototyping. Practical guide]. Moscow. Mann, Ivanov i Ferber. 2013. 240 p. (in Russian)
2. Innovatsionnaya `elektro`energetika – 21 [Innovative electric power industry - 21] / Ed. V.M. Batenina, V.V. Bushueva, N.I. Voropaja. Moscow. ITS "Energiya" = Engineering Center "Energy". 2017. 584 p. (in Russian)
3. Kontseptsiya intellektual'noy elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoy set'yu [The concept of the intellectual electric power system of Russia with an active-adaptive network]. Moscow. OAO "FSK EES" = Federal Grid Company of Unified Energy System (PJSC FGC UES). 2012. 219 p. (in Russian)
4. Obosnovanie razvitiya jelektrojenergeticheskikh sistem: Metodologiya, modeli, metody, ih ispol'zovanie [Features of development of electric power systems: Methodology, models, methods, their use] / Eds. N.I. Voropaj. Novosibirsk. Nauka = Science. 2015. 448 p. (in Russian)

5. Popova O.M. Komp'juternaja realizatsija i vizualizatsija zadachi optimizatsii struktury sistemoobrazujushej elektricheskoy seti [Computer implementation and visualization of the task of optimizing the structure of the backbone electrical network] // Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem (MLSD'2016): Materialy Devjatoj mezhdunar. konf-i. (3 –5 okt. 2016 g.) = Large-Scale Systems Development Management (MLSD'2016): Proceedings of the Ninth Int. conf. (Oct. 3–5, 2016). T. 2. Moscow. Institut problem upravlenija im. V.A. Trapeznikova RAN = V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. 2016. Pp. 37–39. (in Russian)
6. Popova O.M., Usov I.Yu. Algoritmy uproschennogo analiza nadezhnosti pri optimizatsii sistemoobrazujushej elektricheskoy seti [Algorithms for simplified reliability analysis for optimizing the backbone electrical network] // Problemy upravleniya = Control sciences. 2014. No. 4. Pp. 49–55 (in Russian)
7. Popova O.M. Osobennosti komp'juternoj realizacii zadachi optimizacii struktury sistemoobrazujushhej jelektricheskoy seti [Features computer implementation problems to optimize the structure of power network] // XIX Baykal'skaya Vserossiyskaya konferentsii «Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii»: Trudy = XIX Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management": proceedings. Part I. Irkutsk. ISEM SB RAS. 2014. Pp. 61–64. (in Russian)
8. Popova O.M. Razvitie programmno-vychislitel'nogo kompleksa dlja reshenija zadachi optimizatsii struktury sistemoobrazujushej seti `elektro`energeticheskikh sistem [The development of software and computing complex for solving the problem of optimizing the structure of the backbone network of electric power systems] // Informatsionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2017. № 1(5). Pp. 102–111. (in Russian)
9. Prototipy v programmirovanii [Prototypes in programming]. Available at: <http://www.imaladec.com/story/prototypes> (accessed 15.10.2018). (in Russian)
10. Spravochnik po proektirovaniju jelektricheskikh setej [Guide to the design of electrical networks] / Eds. D.L. Faibisovich. Moscow. ENAS = ENAS Publishing Group. 2009. 392 p. (in Russian).
11. Teoreticheskie osnovy, metody i modeli upravlenija bol'shimi `elektro`energeticheskimi sistemami [Theoretical foundations, methods and models of control of large electric power systems] / Ed. N.I. Voropaj. Moscow. OAO "FSK EES" = Federal Grid Company of Unified Energy System (PJSC FGC UES). 2015. 188 p. (in Russian)
12. Usov I.Yu., Popova O.M. Formirovanie bazy dannyh dlja optimizacii struktury sistemoobrazujushhej jelektricheskoy seti [Formation of the database to optimize the power network structure] // Vestnik IrGTU = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013. No. 1. Pp. 139–144. (in Russian)
13. Chto takoe Prototip [What is a Prototype]. Available at: <http://chto-takoe.net/chto-takoe-prototip/> (accessed 15.01.2019). (in Russian)
14. Popova O.M. Building a geoinformation system of electric networks // Problemy Avtomatiki i Upravleniya (Scientific and Technical Journal / National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic. Bishkek: IAIT). 2010. No.2. Pp. 49-52.
15. Smart Grid. Available at: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_\(Умные_Сети\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_(Умные_Сети)) (accessed 22.01.2018). (in Russian)

УДК 620.9 : 632.15

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ НА ГЕОЭКОЛОГИЮ РЕГИОНОВ
(РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ И РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)**

Зорина Татьяна Геннадьевна

Д.э.н., доцент, зав. сектором «Экономика энергетики»,
Институт энергетики НАН Беларуси,
220072, г. Минск, ул. Академическая 15/2, e-mail: tanyazorina@tut.by

Александрович Сергей Александрович

Научный сотрудник лаборатории «Энергобезопасность»
Институт энергетики НАН Беларуси,
220072, г. Минск, ул. Академическая 15/2, e-mail: serje.alex@gmail.com

Майсюк Елена Петровна

К.э.н., ст. н. с. лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Массель Алексей Геннадьевич

К.т.н., ст. н. с. лаборатории «Информационные технологии в энергетике»,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: amassel@isem.irk.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты международного проекта «Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона», выполняемого при содействии Евразийского фонда поддержки научных исследований (ЕАПИ) и поддержанного грантами РФФИ и БРФФИ. Представлена структура выбросов загрязняющих веществ от объектов энергетики в исследуемых регионах Российской Федерации и Республики Беларусь. Выявлены критически важные объекты исследуемых регионов. Приведены результаты предварительной проверки гипотезы о влиянии энергетики на качество жизни населения.

Ключевые слова: геоэкология, выбросы загрязняющих веществ, энергетические объекты.

Цитирование: Зорина Т.Г., Александрович С.А., Майсюк Е.П., Массель А.Г. Влияние энергетики на геоэкологию регионов (Российская Федерация и Республика Беларусь) // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 151–161. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-14

Введение. В современных условиях возрастает влияние энергетики на геоэкологию региона. Устойчивое развитие промышленности невозможно без опережающего роста мощностей в электроэнергетике. Критически важные объекты энергетической инфраструктуры оказывают разнонаправленное воздействие на качество жизни населения и окружающую среду исследуемых территорий. Тепловые станции, работающие на твердом топливе, загрязняют атмосферу и отчуждают значительные площади под золошлаковые отходы. Гидростанции нарушают экосистему затоплением значительных территорий.

Исследования по оценке влияния энергетики на геоэкологию региона выполняются учеными из Республики Беларусь совместно с коллегами из Российской Федерации и Республики Армения в рамках международного проекта «Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона» [5, 6]. Целью проекта является разработка методов и технологий оценки воздействия энергетики на геоэкологию региона [7, 16, 17].

Объектом исследования с Белорусской стороны является Витебская область, с Российской стороны – Байкальская природная территория. Статья посвящена характеристике исследуемых регионов с позиции выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от объектов энергетики.

1. Структура выбросов загрязняющих веществ от объектов энергетики Витебской области. Основными загрязнителями атмосферного воздуха в Беларуси являются мобильные источники, то есть передвижные транспортные средства, а также промышленные предприятия, в т.ч. теплоэлектростанции. (Табл. 1) [3, 8, 10]

Таблица 1. Выбросы загрязняющих веществ по отдельным ингредиентам в 2017 году

Вещества	Суммарные выбросы	в том числе:		из них от сжигания топлива	
		от мобильных источников	от стационарных источников	на производство тепловой и электрической энергии	
				тыс. тонн	в % от суммарных выбросов по веществу
диоксид серы, SO₂	47,7	0,1	47,6	7,9	16,6 %
оксид углерода, CO	589,1	514,0	75,1	34,6	5,9 %
диоксид азота, NO₂	134,2	85,4	48,8	27,0	20,1 %
углеводороды	383,9	164,0	219,9	3,5	0,9 %
прочие	85,7	23,7	62,0	14,2	16,6 %
Всего:	1240,6	787,2	453,4	87,2	7,0 %

В ходе исследования был использован корреляционный анализ для предварительной проверки гипотезы о влиянии энергетики на качество жизни. Исследование динамических данных (2011-2017) о продолжительности жизни в Республике Беларусь и выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников в региональном разрезе показало наличие сильной отрицательной связи (рис. 1). На протяжении исследуемого периода значения коэффициента корреляции изменялись от -0,33 (2016) до -0,78 (2015). При этом среднее значение коэффициента в исследуемом периоде составило -0,63.

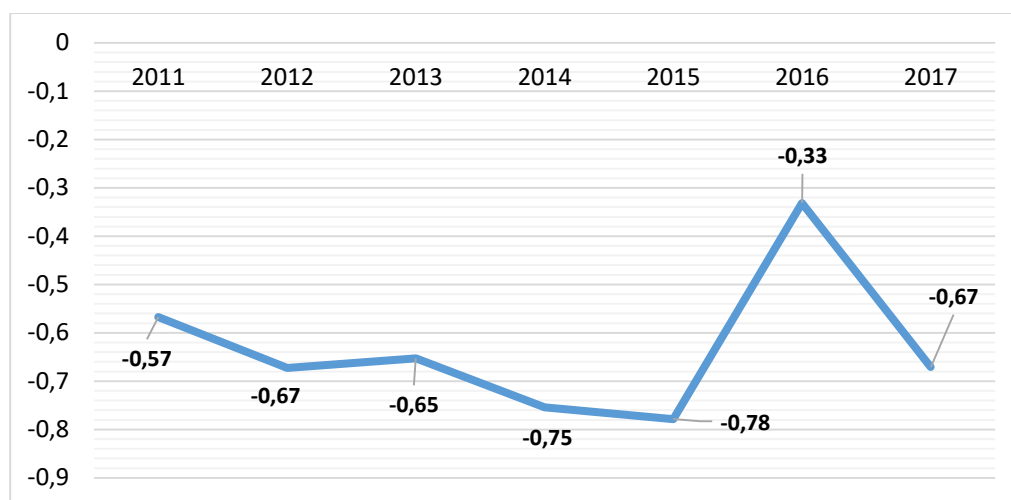


Рис. 1. Динамика изменения коэффициента корреляции продолжительности жизни в Республике Беларусь и выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников в региональном разрезе

На основе проведенного корреляционного анализа можно сделать вывод, что функционирование энергетических объектов (с точки зрения выбросов) оказывает влияние на продолжительность жизни, а, следовательно, и на качество жизни населения.

В таблице 2 представлены данные по выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух по областям Республики Беларусь.

Таблица 2. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух по областям Республики Беларусь за 2017 г. [4, 15]

Наименование показателя	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, тыс. тонн		
	От стационарных источников	От мобильных источников	Всего
Республика Беларусь	453.4	787.2	1240.6
Области и г. Минск			
Брестская	50.6	116.1	166.7
Витебская	102.3	88.3	190.6
Гомельская	105.6	97.8	203.4
Гродненская	60.3	94.2	154.5
г. Минск	18.3	136.8	155.1
Минская	68.6	178.6	247.2
Могилевская	47.7	75.4	123.1

Изучив пространственную структуру выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (табл. 2), можно сделать вывод, что наибольшее количество выбросов приходится на Минскую (19.9 %), Гомельскую (16.4 %) и Витебскую область (15.4 %)

Основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в Витебской области являются предприятия теплоэнергетики Республиканского унитарного предприятия (РУП) «Витебскэнерго» (табл. 3), предприятия химической промышленности и автотранспорт. Большое влияние на состояние атмосферного воздуха городов оказывают выбросы предприятий Новополоцкого промышленного узла (табл. 4).

Таблица 3. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу объектами РУП «Витебскэнерго» за 2017 г. [11]

Наименование предприятия	Выбросы загрязняющих веществ, тонн					
	Диоксид серы	Углерод оксид	Оксиды азота	НМЛОС	Твёрдые	Всего
Лукомльская ГРЭС	88,06	2813,15	4787,37	1541,27	4,15	9234,00
Новополоцкая ТЭЦ	29,35	182,33	1256,70	3,75	0,51	1472,64
Витебская ТЭЦ	6,80	44,49	249,74	1,39	0,15	302,57
Оршанская ТЭЦ	51,29	46,65	343,14	157,57	18,35	617,00

Таблица 4. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу предприятием ОАО «Нафтан» за 2017 г. [9]

Наименование загрязняющего вещества	Выбросы, тонн
Диоксид серы	17840,51
Углерод оксид	1162,31
Оксиды азота	1952,36
НМЛОС	17786,95
Твёрдые	52,62
Прочие	252,07
Всего	39046,82

Целесообразность выбора Витебской области в качестве объекта исследования обусловлена высокой концентрацией и разнообразием энергетических объектов, а также высоким объемом выбросов.

Критически важными объектами Витебской области, которые оказывают значительное влияние на геоэкологию региона и качество жизни населения являются:

- РУП «Витебскэнерго» – на территории Витебской области расположено 38,03 % установленной мощности Белорусской энергетической системы, которые осуществляют выработку 34,2 % электрической энергии в Республике Беларусь;
- ОАО «Нафтан» – около половины обрабатывающей промышленности Витебской области приходится на производство кокса и продуктов нефтепереработки;
- основные транспортные магистрали – Витебская область граничит с тремя странами и имеет развитую дорожную инфраструктуру, через регион проходят несколько автомобильных дорог международного значения.

Таким образом, влияние именно этих объектов инфраструктуры на геоэкологию региона и будет рассмотрено при построении геоинформационной системы для оценки влияния энергетики на геоэкологию региона.

2. Структура выбросов загрязняющих веществ от объектов энергетики РФ и Байкальской природной территории. Основными загрязняющими веществами атмосферного воздуха в Российской Федерации являются оксид углерода (CO), диоксид серы (SO₂) и оксиды азота. На протяжении 2011-2017 годов выбросы диоксида серы сократились

на 15% и составили в 2017 г. 11,83 % в общем объеме выбросов, выбросы оксидов азота сократились на 3,13 % и составили 11,02 % в общем объеме выбросов, выбросы оксида углерода возросли на 2,08 % и составили 50,42 % в общем объеме выбросов [14].

Результаты предварительной проверки гипотезы о влиянии энергетики на качество жизни населения в Российской Федерации показали, что существует взаимосвязь между продолжительностью жизни и объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (включая энергетические объекты). На основе динамических данных (2011-2017) о продолжительности жизни в Российской Федерации и выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников была построена диаграмма рассеивания (рис. 2). Коэффициент корреляции составил $-0,79$, что свидетельствует о наличии сильной отрицательной связи.

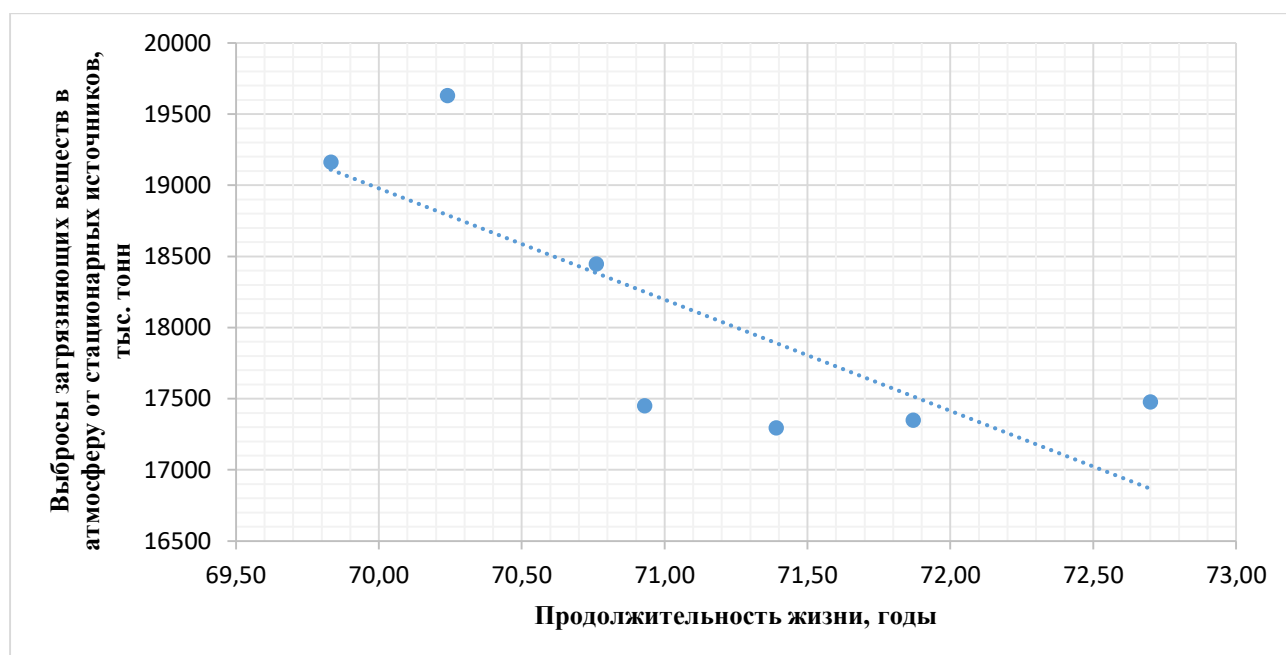


Рис. 2. Диаграмма рассеивания данных о продолжительности жизни и выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников в Российской Федерации в 2011-2017

Основными источниками загрязнений на территории Российской Федерации в 2017 являлись мобильные источники (45,5 %), а также предприятия обрабатывающей промышленности и энергетики. Наибольший урон для атмосферного воздуха Российской Федерации наносят предприятия добывающей отрасли (28,1 %), обрабатывающей отрасли (33,2 %) и энергетики (20,3 %) (Табл. 5). Однако, отдельные регионы Российской Федерации отличаются структурой выбросов стационарными источниками по видам экономической деятельности. В частности, на территории Байкальского региона 52 % выбросов загрязняющих веществ стационарными источниками приходится на обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха. Это свидетельствует о значительном негативном влиянии энергетических объектов на геоэкологию Байкальского региона [14].

Таблица 5. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух Российской Федерации от стационарных источников по видам экономической деятельности за 2017 г.

Наименование показателя	Российская Федерация, всего		Республика Бурятия		Иркутская область		Забайкальский край		Итого по Байкальскому региону	
	тыс. тонн	%	тыс. тонн	%	тыс. тонн	%	тыс. тонн	%	тыс. тонн	%
Добыча полезных ископаемых	4918,9	28,1	5,49	4,84	111,6	16,9	15,67	11,68	154,6	14,0
Обрабатывающие производства	5803,5	33,2	12,6	11,1	178,9	27,1	21,01	15,66	250,8	22,6
Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	3542,6	20,3	82,4	72,7	304,8	46,2	70,06	52,22	576,1	52,0

Основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха в экологической зоне атмосферного влияния Байкальской природной территории (Далее – ЭЗАВ БПТ) вносят предприятия теплоэнергетики, к которым относятся филиалы ПАО «Иркутскэнерго» (рис. 3):

- ТЭЦ-9 и участок № 1 ТЭЦ-9 (ТЭЦ-1);
- ТЭЦ-10 (г. Ангарск);
- Ново-Иркутская ТЭЦ (г. Иркутск);
- ТЭЦ-11 (г. Усолье-Сибирское);
- ТЭЦ-12 (г. Черемхово);
- Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Шелехов).

В 2017 году выбросы в атмосферу от источников предприятий теплоэнергетики ПАО «Иркутскэнерго» в границах ЭЗАВ БПТ составили 210,308 тыс. тонн загрязняющих веществ, (табл. 6) [1, 2].

Таблица 6. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от источников предприятий теплоэнергетики в границах ЭЗАВ БПТ в 2011 – 2017 гг.

Наименование загрязняющих веществ	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, тыс. тонн							Изменение к 2016 году	
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	тыс. тонн	%
Твёрдые	43,103	46,210	39,018	31,711	31,747	31,637	33,867	2,23	7,0
Диоксид серы	145,03	189,30	162,04	139,65	152,63	140,48	149,49	9,01	6,4
Оксиды азота	38,836	40,096	33,326	27,870	29,051	28,870	26,647	-2,22	-7,7
Прочие	0,215	0,198	0,230	0,191	0,312	0,288	0,307	0,02	6,6
Всего	227,2	275,8	234,6	199,4	213,7	201,3	210,3	9,0	4,5

По данным таблицы 6 видно, что общий валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух предприятиями ПАО «Иркутскэнерго», расположенными в ЭЗАВ БПТ, в 2017 году увеличился на 9,0 тыс. тонн (на 4,5%) по сравнению с 2016 годом. Увеличение

выбросов на 4,5 % обусловлено увеличением сожженного на ТЭЦ топлива на 8,2 % для выработки электроэнергии на тепловых электрических станциях на покрытие региональных и межрегиональных нагрузок.

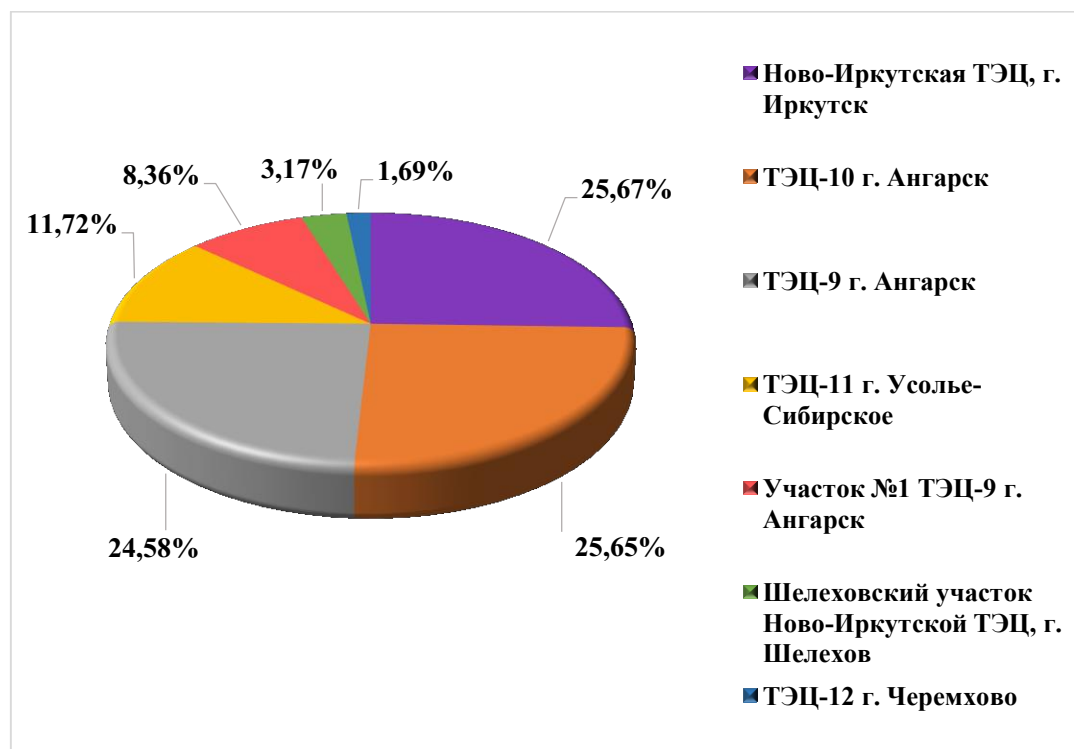


Рис. 3. Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по предприятиям ПАО «Иркутскэнерго», расположенных в ЭЗАВ в 2017 г. [2]

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в буферной экологической зоне БПТ являются предприятия энергетического комплекса Республики Бурятия [2, 13]:

- АО «ИнтелРАО-Электрогенерация», филиал «Гусиноозёрская ГРЭС»;
- филиалы ПАО «ТГК-14» «Генерация Бурятии» (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, Тимлюйская ТЭЦ);
- Улан-Удэнский энергетический комплекс (36 муниципальных котельных).

Выброс в атмосферу от этих энергообъектов оценивается в 60-63 тыс. т/год (или 60% от суммарных выбросов стационарных источников буферной экологической зоны) [2, 13]. В выбросах этих станций преобладающей примесью также являются оксиды серы.

В границах центральной экологической зоны БПТ основным объектом теплоэнергетики является ТЭЦ ООО «Теплоснабжение» г. Байкальска и 98 коммунальных котельных суммарной установленной мощностью 99 МВт, из которых 66 – угольные котельные, 19 – электрокотельные, 9 – дровяные 3 – газовые и 1 – мазутная [12].

В центральной экологической зоне источниками выбросов являются крупные и мелкие котельные с преимущественным выбросом твердых частиц. В количественном выражении этот выброс оценивается в 24,5 тыс. т в год, с преимущественным до 80-82% выбросом твердых частиц.

Суммарный объем выбросов, поступающих от энергоисточников Байкальской природной территории, оценивается в 280-300 тыс. т в год (табл. 7).

Таблица 7. Выбросы в атмосферу Байкальской природной территории в 2017 г. по экологическим зонам и вклад энергетики

Показатель	Экологическая зона			всего
	атмосферного влияния	центральная	буферная	
Выброс, всего, тыс. т/год	301,8	24,5	85,2	441,5
в том числе объекты энергетики	210,3	24,5	64,1	298,9
Вклад, %	69,9	100	75,2	67,7

Характерной особенностью энергетики Байкальской природной территории является использование в качестве топлива угля. При этом его сжигание на крупных тепловых электростанциях, расположенных в экологических зонах атмосферного влияния и буферной, связано с образованием значительного объема газообразных выбросов – оксидов серы и азота.

Заключение. Из энергетических объектов подавляющий объем вредных выбросов в атмосферу производят тепловые электростанции и котельные, работающие как на твердом, жидком, так и на газовом топливах. При функционировании промышленных и энергетических объектов, деятельность которых связана с выбросами в окружающую среду различных загрязняющих веществ, необходимо оценивать характер и степень их воздействия на прилегающие территории.

Результаты предварительной проверки гипотезы о влиянии энергетики на качество жизни населения показали, что существует взаимосвязь между продолжительностью жизни и объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (включая энергетические объекты).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ЕАПИ-РФФИ № 18-57-81001 и гранта РФФИ № 19-57-04003 с Российской стороны и гранта БРФФИ №X18EA-003 с Белорусской стороны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2017 году». Иркутск: ООО «Мегапринт». 2018. 249 с.
2. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году». Иркутск: АНО «КЦ Эксперт». 2018. 340 с.
3. Государственный кадастр атмосферного воздуха: информ. бюл. 2017 г. / Под редакцией: Г.И. Глазачевой, В.В. Валентейчика. Минск. 2018.
4. ГПО «Белэнерго». Режим доступа: <http://www.energo.by/> (дата обращения: 30.06.2019).
5. Массель Л.В. Проблема оценки влияния энергетики на геоэкологию региона: постановка и пути решения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2. С. 5–21.
6. Массель Л.В., Минасян С.А., Зорина Т.Г., Барсегян А.Р. Оценка влияния энергетики на геоэкологию с использованием информационных технологий // Вестник инженерной

- академии Армении, 2018. Т. 15. № 3 С. 480–483. Режим доступа: <http://engineeracademy.am> (дата обращения: 30.06.2019).
7. Массель Л.В., Иванова И.Ю., Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Ижбулдин А.К., Зорина Т.Г., Барсегян А.Р. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии // Онтология проектирования. 2018. Т.8. №4 (30). С. 550–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4.
8. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Режим доступа: <http://belstat.gov.by/> (дата обращения 30.06.2019).
9. ОАО «Нафтан». Режим доступа: <http://www.naftan.by/> (дата обращения 30.06.2019).
10. Охрана окружающей среды: статистический сборник. / Под редакцией: И.В. Медведевой. Минск. 2019.
11. РУП «Витебскэнерго». Режим доступа: <http://www.vitebsk.energo.by/> (дата обращения 30.06.2019).
12. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф. Внедрение природоохранных мероприятий в теплоэнергетике центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Экология и промышленность России. 2018. Т.22. №7. С. 20–25.
13. Территориальная генерирующая компания №14. Официальный сайт. Режим доступа: https://www.tgk-14.com/about/company/bur_ener/ (дата обращения: 30.06.2019).
14. Федеральная служба государственной статистики. Режим доступа: <http://www.gks.ru/> (дата обращения 30.06.2019).
15. Энергетический баланс Республики Беларусь. / Под редакцией: И.В. Медведевой. Минск. 2018.
16. Massel L.V. Intelligent decision-making support in energy and ecology in view of the quality of life // Industry 4.0, 2018, Issue 5. Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering “Industry 4.0”. Pp. 280–283. Режим доступа: <https://stumejournals.com/i4.htm> (дата обращения: 30.06.2019).
17. Massel L.V., Zorina T.G., Massel A.G. Methods and technologies for assessing the impact of energy on the geoecology of a region (using the examples of the Baikal region (Russia) and Belarus) // International Conference OSTIS-2019. Minsk: Belarus State University of Informatics and Radioelectronics. 2019. Pp. 209–214. Режим доступа: <http://old.proc.ostis.net/proc/Proceedings%20OSTIS-2019.pdf> (дата обращения: 30.06.2019).

**THE ENERGY SECTOR IMPACT ON THE GEOECOLOGY OF A REGION
(RUSSIAN FEDERATION AND BELARUS REPUBLIC)**

Tatsiana G. Zoryna

Dr., Associate professor, Head Sector "Energy Economics",
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
15/2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Belarus, e-mail: tanyazorina@tut.by

Siarhei A. Aliaksandrovich

Researcher of the laboratory "Energy Security"
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
15/2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Belarus, e-mail: serje.alex@gmail.com

Elena P. Maysyuk

PhD of economy, Senior researcher of the Laboratory of energy supply
for distributed consumers, Melentiev Energy Systems Institute
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Aleksei G. Massel

PhD., Senior Researcher of the laboratory «Information technology in the energy sector»
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: amassel@isem.irk.ru

Abstract. The article discusses the results of the international project "Methods and Technologies for Assessing of the Energy Sector Impact on the Geoecology of the Region", carried out with the assistance of the Eurasian Foundation for the Support of Scientific Research (EAPI) and supported by grants from the Russian Federal Property Fund and BRFFR. The article presents the structure of emissions of pollutants from energy facilities in the studied regions of the Russian Federation and the Republic of Belarus. Identified most important energy facilities of the studied regions. The results of preliminary testing of the hypothesis about the impact of energy on the quality of life of the population are given. This work was partially supported by the EAPI-RFBR grant № 18-57-81001 and the RFBR grant №19-57-04003 from the Russian side and the BRFFR grant № X18EA-003 from the Belarusian side.

Keywords: geoecology, pollutant emissions, energy facilities.

References

1. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2017 godu» [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2017"]. Irkutsk. OOO "Megaprint" = Megaprint LLC. 2018. 249 p. (in Russian)
2. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii ozera Baykal i merakh po yego okhrane v 2017 godu» [State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2017"]. Irkutsk. Avtonomnaya nekommercheskaya organizatsiya "Konsul'tatsionnyy tsentr "Ekspert" = Autonomous Nonprofit Organization "Consulting center "Expert". 2018. 340 p. (in Russian)
3. Gosudarstvennyy kadastr atmosfernogo vozdukha: informatsionnyy byulleten'. 2017 g. [State Air Cadastre: Newsletter. 2017] / Edited by G.I. Glazacheva, V.V. Valentine. Minsk. 2018 (in Russian)

4. GPO «Belenergo» [SPA "Belenergo"]. Available at: <http://www.energo.by/> (accessed 30.06.2019) (in Russian).
5. Massel L.V. Problema ocenki vlijanija jenergetiki na geojekologiju regiona: postanovka i puti reshenija [The problem of the impact assessing of energy sector on the geoecology of the region: statement and solutions] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №2. Pp. 5–21. (in Russian)
6. Massel L.V., Minasjan S.A., Zorina T.G., Barsegian A.R. Ocenka vlijanija jenergetiki na geojekologiju s ispol'zovaniem informacionnyh tehnologij [The impact assessment of the energy sector on geoecology using information technologies] // Vestnik inzhenernoj akademii Armenii = Bulletin of the Engineering Academy of Armenia. 2018. T. 15. № 3. Pp. 480–483. Available at: <http://engineeracademy.am> (accessed 30.06.2019). (in Russian)
7. Massel L.V., Ivanova I.Ju., Vorozhova T.N., Majsjuk E.P., Izhbuldin A.K., Zorina T.G., Barsegian A.R. Ontologicheskie aspekty issledovanija vzaimovlijanija jenergetiki i geojekologii [Ontological aspects of the study of the interaction of energy and geoecology] // Ontologija proektirovanija = Ontology of Design. 2018. T.8. №4 (30). Pp. 550–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4. (in Russian)
8. Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus' [National Statistical Committee of the Republic of Belarus]. Available at: <http://belstat.gov.by/> (accessed 30.06.2019). (in Russian)
9. OAO «Naftan» [Open Joint-Stock Company "NAFTAN"]. Available at: <http://www.naftan.by/> (accessed 30.06.2019). (in Russian)
10. Okhrana okruzhayushchey sredy: statisticheskiy sbornik [Environmental protection: a statistical compilation] / Edited by I.V. Medvedeva. Minsk. 2019. (in Russian).
11. RUP «Vitebskenergo» [Republican Unitary Enterprise “Vitebskenergo”]. Available at: <http://www.vitebsk.energo.by/> (accessed 30.06.2019). (in Russian).
12. Saneev B.G., Ivanova I.Ju., Majsjuk E.P., Tuguzova T.F. Vnedrenie prirodoohrannyh meroprijatij v teplojenergetike central'noj jekologicheskoy zony Bajkal'skoj prirodnoj territorii [Implementation of environmental measures in the power system of the central ecological zone of the Baikal natural territory] // Jekologija i promyshlennost' Rossii= Ecology and industry of Russia. 2018. T.22. №7. Pp. 20-25. (in Russian).
13. Territorial'naja generirujushhaja kompanija №14. Oficial'nyj sajt [Territorial Generating Company №14. Official site]. Available at: https://www.tgk-14.com/about/company/bur_ener/ (accessed 30.06.2019). (in Russian)
14. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service]. Available at: <http://www.gks.ru/> (accessed 30.06.2019). (in Russian)
15. Energeticheskiy balans Respubliki Belarus' [The energy balance of the Belarus Republic]. / Edited by I.V. Medvedeva. Minsk. 2018. (in Russian)
16. Massel L.V. Intelligent decision-making support in energy and ecology in view of the quality of life // Industry 4.0. 2018. Issue 5. Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering “Industry 4.0”. Pp. 280–283. Available at: <https://stumejournals.com/i4.htm> (accessed 30.06.2019)
17. Massel L.V., Zorina T.G., Massel A.G. Methods and technologies for assessing the impact of energy on the geoecology of a region (using the examples of the Baikal region (Russia) and Belarus) // International Conference OSTIS-2019. Minsk: Belarus State University of Informatics and Radioelectronic. 2019. Pp. 209–214. Available at: <http://old.proc.ostis.net/proc/Proceedings%20OSTIS-2019.pdf> (accessed 30.06.2019)