Information and mathematical technologies in science and management

ISSN 2413 - 0133

Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 3 (15)

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

2019

ISSN 2413 – 0133

EDITORIAL BOARD	**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**
Ablameyko S.V.	Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Arshinskiy L.V.	Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Bachkova I.A.	Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ
Berestneva O.G.	Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Boukhanovsky A.V.	Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Bychkov I.V.	Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Donskoy V.I.	Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского
Dunaev M.P.	Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНИТУ
Eliseev S.V.	Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Gornov A.Y.	Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Gribova V.V.	Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Groumpos P.	Грумпос П., Греция, University of Patras
Hodashinsky I.A.	Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Kalimoldaev M.N.	Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Karpenko A.P.	Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Kazakov A.L.	Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Khamisov O.V.	Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Komendantova N.P.	Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA
Lis R.	Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Massel L.V.	Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Mokhor V.V.	Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Moskvichev V.V.	Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Ovtcharova J.	Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Popov G.T.	Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Smirnov S.V.	Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Stylios C.	Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Taratukhin V.V.	Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Voevodin V.V.	Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Voropai N.I.	Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Woern H.	Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Wolfengagen V.E.	Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Yusupova N.I.	Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ
Zorina T.G.	Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

EXECUTIVE EDITORIAL	**ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**		
Chief Editor Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Executive Editor Makagonova N.N.	Выпускающий редактор	Макагонова Н.Н.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Kopaigorodsky A.N.	Редактор	Копайгородский А.Н.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer Ivanov R.A.	Дизайнер	Иванов Р.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Working contacts founder **Рабочие контакты учредителя**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науке Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

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 Роскомнадзоре. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018 г.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

Дата выхода 05.11.2019 г. Тираж 100 экз.
Цена свободная. (6+)

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.
© Издательство ИСЭМ СО РАН

Содержание

Искусственный интеллект, онтологии

Массель Л.В., Гергет О.М., Массель А.Г., Мамедов Т.Г.
Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики **5**

Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Малахова А.И., Гарайшин Ш.Г., Нагимов Т.Р.
Проектирование системы управления бизнес-процессами на основе онтологического анализа и имитационного моделирования предметной области **18**

Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н., Массель Л.В.
Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду **31**

Марухина О.В., Берестнева О.Г.
Разработка системы поддержки принятия решения для выбора траектории лечения детей с избыточным весом **42**

Информационные технологии и программные системы

Барахтенко Е.А., Соколов Д.В.
Методологический подход к разработке программного обеспечения для проектирования систем теплоснабжения **53**

Соколов Д.В., Барахтенко Е.А.
Алгоритмы нового поколения для определения оптимальных параметров систем теплоснабжения **66**

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А.
Управление конвейерно-параллельными вычислениями при решении задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений **79**

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Горский С.А.
Конструктивный подход к проверке истинности квантифицированных булевых формул в решателе HPC2QALL **91**

Башуров В.В., Губанов Д.А., Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Певзнер А.С.
Разработка автоматизированного координатного устройства для экспериментального исследования струйных течений **102**

Математическое моделирование и кибербезопасность в энергетике

Зорина Т.Г., Кашникова И.В., Богдан И.Т.
Развитие методов прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства республики Беларусь с использованием методов нечеткого математического программирования **111**

Колосок И.Н., Коркина Е.С.
Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы **121**

Калинина Ж.В., Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В.
Особенности агрегирования мировых газовых рынков **132**

Довудов С.А., Дунаев М.П.
Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя **144**

Content

Artificial intelligence, ontology

Massel L.V., Gerget O.M., Massel A.G., Mamedov T.G.
The use of machine learning in situational management in relation to the tasks of the power industry **5**

Chernyakhovskaya L.R., Nikulina N.O., Malakhova A.I., Garaishin S.G., Nagimov T.R. **18**
Business process management system design based on ontological analysis and simulation of subject area

Vorozhtsova T.N., Makagonova N.N., Massel L.V.
An ontological approach to the design of database for assessing the impact of energy sector on the environment **31**

Marukhina O.V., Berestneva O.G.
Development the decision support system for selecting the treatment trajectory for children with overweight **42**

Information technologies and program systems

Barakhtenko E.A., Sokolov D.V.
An approach to the software development for the design of heat supply systems **53**

Sokolov D.V., Barakhtenko E.A.
Development of algorithms for determination of optimal parameters of heat supply systems **66**

Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A.
Development of self-organizing multiagent system for decentralized control by distributed solution of applied problems **79**

Oparin G.A., Bogdanova V.G., Gorsky S.A.
A constructive approach to the checking of validity of 2-quantified boolean formulas in the Hpc2qall solver **91**

Bashurov V.V., Gubanov D.A., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Pevzner A.S.
Development of the automated axis motion device for the experimental research of jet flow **102**

Mathematical modeling and cybersecurity in the energy sector

Zoryna T.G., Kashnikava I.V., Bohdan I.T.
Development of methods for forecasting the optimal structure of energy production of the Belarus Republic using the fuzzy mathematical programming methods **111**

Kolosok I.N., Korkina E.S.
An analysis of cyber security of a digital substation in terms of cyber physical system **121**

Kalinina Z.V., Ilkevich N.I., Dzyubina T.V.
Features of aggregation of global gas markets **132**

Dunaev M.P., Dovudov S.U.
Simulation of the frequency-pulse converter circuit **144**

УДК 004.85 : 621.31

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИТУАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Массель Людмила Васильевна
Д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, e-mail: massel@isem.irk.ru
Зав. лабораторией «Информационные технологии в энергетике»,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130
Гергет Ольга Михайловна
Д.т.н., доцент, e-mail: gerget@tpu.ru
Отделение информационных технологий,
Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Массель Алексей Геннадьевич
К.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: amassel@isem.irk.ru
Мамедов Тимур Габилович
Инженер, e-mail: 4312786590435@mail.ru
лаборатория «Информационные технологии в энергетике»,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. В статье рассматриваются возможности применения методов машинного обучения (искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА) для формирования управляющих воздействий при применении концепции ситуационного управления для интеллектуальной поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики. На первом этапе рассматривается применение ИНС с целью классификации экстремальных ситуаций в энергетике, для предотвращения развития которых подбираются наиболее эффективные управляющие воздействия (превентивные меры), с тем, чтобы предотвратить перерастание критической ситуации в чрезвычайную. Генетические алгоритмы предлагается использовать для определения весовых коэффициентов при обучении ИНС. Приводятся алгоритм построения классификатора на основе нейронной сети и демонстрационная задача на примере данных о генерации и потреблении Объединенной электроэнергетической системы (ОЭС) Сибири.

Ключевые слова: ситуационное управление, машинное обучение, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, экстремальные ситуации в энергетике, управляющие воздействия (превентивные меры).

Цитирование: Массель Л.В., Гергет О.М., Массель А.Г., Мамедов Т.Г. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 5–17. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-01

Введение. В связи с распространением концепций интеллектуальной (Smart Grid) [2] и цифровой [11] энергетики становится актуальным как применение современных информационно-телекоммуникационных технологий, так и совершенствование технологической инфраструктуры, решения по развитию которой относятся к классу стратегических. В настоящее время является актуальным вопрос совершенствования технологий интеллектуальной поддержки принятия решений по минимизации риска возникновения неблагоприятных ситуаций, одно из перспективных подходов в этом направлении – использование технологий машинного обучения, которые показали хорошие результаты в других областях [13, 18, 21].

Коллективом, который представляют авторы, предложено использовать для интеллектуальной поддержки принятия таких решений концепцию ситуационного управления, а для выбора управляющих воздействий (или последовательности превентивных мероприятий) применить метод, основанный на синтезе ИНС [3, 19] и ГА [6, 20]. Первоочередной задачей при этом является классификация экстремальных ситуаций в энергетике в соответствии со шкалой «норма – предкризис (критические ситуации) – кризис (чрезвычайные ситуации)». Своевременные рекомендации по выбору превентивных мероприятий (управляющих воздействий) могут предотвратить переход критических ситуаций в чрезвычайные и позволить вернуться к нормальному состоянию энергетической системы (ЭС).

В статье рассмотрена современная трактовка концепции ситуационного управления и ее интерпретация на примере исследований по оценке состояния топливно-энергетического комплекса России. Генетические алгоритмы предлагается использовать для определения весовых коэффициентов при обучении ИНС. Приводятся алгоритм построения классификатора на основе нейронной сети и результаты решения демонстрационной задачи на примере данных о генерации и потреблении ОЭС Сибири с использованием разработанного прототипа программного модуля.

1. Ситуационное управление. Концепция ситуационного управления была предложена Д.А. Поспеловым и развивалась им и его учениками в 70-80 гг. прошлого столетия [10]. В то время ее не удалось реализовать в полной мере, как по причине недостаточных мощностей вычислительной техники, так и неудовлетворительного уровня развития теории и практики искусственного интеллекта. Спад интереса к ситуационному управлению в России, наступивший в 90-х гг., помимо объективного изменения внешних экономико-политических условий, можно объяснить наступившей «зимой искусственного интеллекта» и трудностями, с которыми столкнулись разработчики, пытаясь построить модели сложных объектов управления с помощью предлагаемого подхода.

Тем не менее, в настоящее время можно констатировать новый виток интереса к этому направлению, который подкрепляется как наличием более совершенной техники, так и появлением новых методов и подходов (интеллектуальных вычислений – Intelligent Computing), в том числе методов семантического моделирования.

В [1] используется идея ситуационного управления, суть которой заключается в выборе управленческих решений с учетом сложившейся ситуации из некоторого набора допустимых (типовых, стандартных) управляющих воздействий. Под текущей ситуацией C при этом понимается совокупность текущего состояния объекта (вектор состояния X) и его внешней среды (вектор возмущений F), тогда $C = < X, F >$. Вводится также понятие полной

ситуации $S = < C, G >$, где C – текущая ситуация, G – цель управления. В свою очередь, цель управления G может быть представлена в виде целевой ситуации G_g , к которой должна быть приведена имеющаяся текущая ситуация. Тогда $S =<C, G_g >$. Полагая, что текущая ситуация C принадлежит некоторому классу Q', а целевая (заданная) ситуация Gg – классу Q'', ищется такое управление (вектор управляющих воздействий U), которое принадлежит множеству допустимых управлений Ωu и обеспечивает требуемое преобразование одного класса ситуаций в другой:

$$C \in Q' \xrightarrow{U \in \Omega_u} G_g \in Q''$$

Таким образом, ситуационное управление выступает как отображение:

$$(Q', Q'') \to U \in \Omega_u \quad ,$$

сопоставляющее паре «текущая ситуация - целевая ситуация» требуемый результат – управление U.

Другими словами, при ситуационном управлении проблема выбора управляющих воздействий сводится к адекватной оценке состояния объекта и среды (что усложняется при наличии факторов неопределенности), отнесению соответствующей текущей ситуации к одному из типовых классов и выбору такого управления (из определенного набора альтернатив), которое приводит к достижению поставленной цели управления (целевой ситуации) [10].

В настоящее время эту концепцию предлагается применять преимущественно для оперативного управления, тем не менее авторами предложено использовать ее для стратегического управления в энергетике, что обосновывается на примере исследований развития топливно-энергетического комплекса страны с учетом требований энергетической безопасности [7 - 9].

2. Проблема выбора управляющих воздействий при ситуационном управлении. На рис. 1 представлена общая схема исследований проблем энергетической безопасности (ЭБ) с точки зрения ситуационного управления, или, иначе, оценки состояния ТЭК в условиях возможных сценариев угроз ЭБ с учетом мероприятий, направленных на повышение уровня ЭБ. Сопоставим эту схему с концепцией ситуационного управления, описанной выше [1, 10].

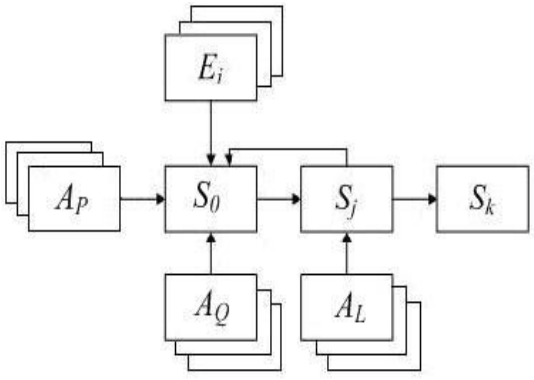


Рис. 1. Общая схема исследований по оценке состояния ТЭК с точки зрения ситуационного управления

S_0 – начальное состояние ТЭК, может рассматриваться как текущая ситуация ***C***;

E_i – сценарии возможных чрезвычайных ситуаций, возникающих в случае реализации угроз ЭБ (аналогичны влиянию внешней среды ***F)*** ;

$\boldsymbol{U} \subseteq A_P \cup A_Q \cup A_L$ – набор превентивных, оперативных и ликвидационных мероприятий, предотвращающих, нейтрализующих или смягчающих последствия чрезвычайной ситуации (может рассматриваться как набор соответствующих управлений ***U***);

S_j – состояние ТЭК после чрезвычайной ситуации E_i (реализации угроз) с учетом выполнения набора мероприятий A_P и/или A_Q; S_k – состояние ТЭК после проведения ликвидационных мер A_L (S_j и S_k могут рассматриваться как аналоги соответствующих целевых ситуаций $\boldsymbol{G_g}$).

До последнего времени выбор управляющих воздействий в этих исследованиях и оценка эффективности предлагаемых решений осуществлялись преимущественно экспертным путем.

В работах Гергет О.М. [4 - 5, 12, 16] была предложена бионическая модель управляющих воздействий, в основе которой лежит синтез искусственных нейронных сетей, генетического алгоритма и метода обобщенного показателя, позволяющая повысить эффективность принятия решения по выбору управляющего воздействия. Под бионическими моделями понимаются математические модели, построенные по принципу функционирования и организации биосистем [4]. Бионический подход был успешно применен в области медицины. Авторами, совместно с О.М. Гергет, было решено адаптировать этот подход применительно к задачам энергетики.

Для оценивания и прогнозирования эффекта от применения управляющих воздействий предлагается использовать бионическую модель выбора управляющих воздействий на основе сочетания метода обобщенного показателя (I), нейронных сетей (NS) [19, 20] и генетического алгоритма (GA) [6, 20]. На рисунке 2 приведена концепция выбора управляющих воздействий с использованием машинного обучения.

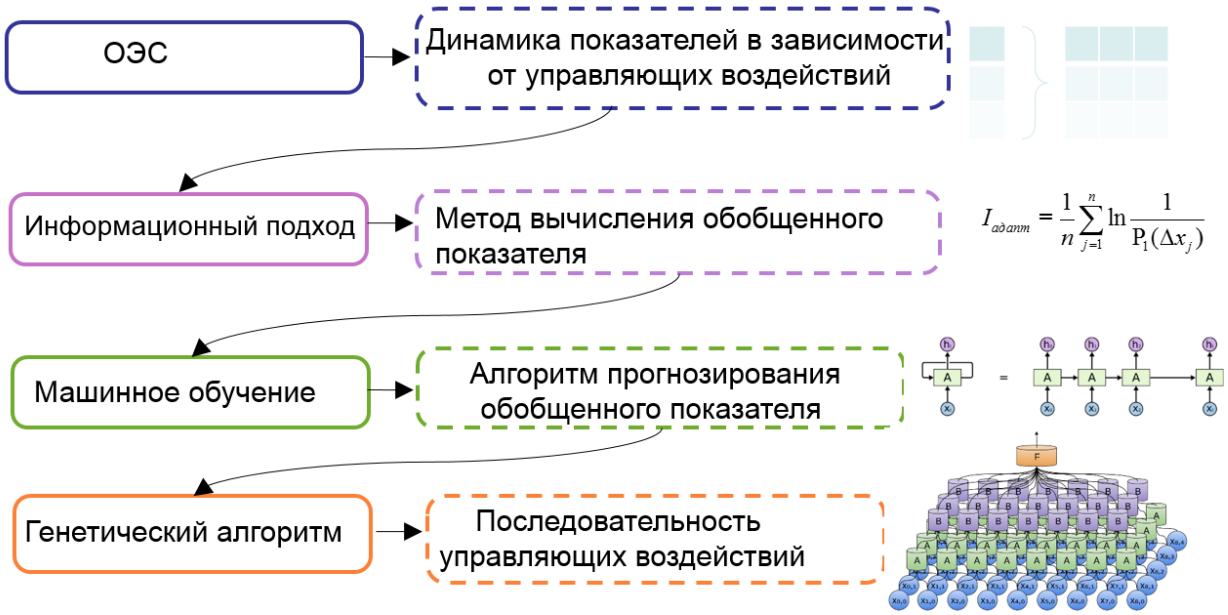


Рис. 2. Концепция выбора управляющих воздействий

Таким образом, каждый объект исследования описывается бионической моделью вида

<NS, GA, I, A>,

где A – алгоритмы настройки моделей.

Синтез в бионических моделях нейронной, генетической и информационной (метод обобщенного показателя) систем позволяет этим системам обмениваться информацией и передавать в качестве входных воздействий значения своих характеристик.

В нашем случае оценивание эффекта от применения управляющих воздействий на основе бионической модели может быть использовано для комплексного оценивания функционального состояния системы с учетом управляющих воздействий, в зависимости от полученной априорной информации по отнесению объекта исследования к одному из классов критических ситуаций: норма, предкризис, кризис. Метод обобщенного показателя связан с определением гомеостатических свойств системы и на этом этапе работы для наших задач не используется.

Ниже излагаются результаты исследования возможности применения бионического подхода в задачах электроэнергетики.

3. Оценка возможности применения нейронных сетей для классификации экстремальных ситуаций в энергетике. Сформулируем конкретную задачу, которая будет являться иллюстрацией возможности применения нейронных сетей для классификации экстремальных ситуаций в энергетике. Задача будет связана с генерацией и потреблением электричества в ОЭС Сибири.

ОЭС Сибири располагается на территории Сибирского Федерального округа и частично - Дальневосточного Федерального округа. Операционная зона «Объединенное диспетчерское управление» (ОДУ) ОЭС Сибири охватывает 12 субъектов Российской Федерации: республики Алтай, Бурятия, Тыва и Хакасия; Алтайский, Забайкальский и Красноярский края; Иркутскую, Кемеровскую, Новосибирскую, Омскую и Томскую области.

В ее состав входят 10 региональных энергетических систем: Алтайская, Бурятская, Читинская, Иркутская, Красноярская, Новосибирская, Омская, Томская, Хакасская, Кузбасская. При этом Алтайская энергосистема объединяет Республику Алтай и Алтайский край, Красноярская — Красноярский край и Республику Тыва.

Как было показано выше, для предотвращения перехода критической ситуации в чрезвычайную необходим выбор превентивных мер. Для того, чтобы вовремя ими воспользоваться, предлагается применить нейронные сети для своевременной классификации экстремальных ситуаций (ЭкС). Это означает, что алгоритм будет разделен на 2 этапа: 1) прогнозирование параметров ситуации; 2) классификация ситуации по спрогнозированным параметрам

Получив информацию о возможном (т.к. сеть способна ошибаться) возникновении экстремальной ситуации, зная класс, к которому принадлежит ЭкС, и дату ее возникновения, посредством работы генетического алгоритма можно сформировать совокупность превентивных мероприятий, которые распределены по временному принципу: от текущего дня до дня возникновения ЭкС, естественно, с учетом рисков и допущений.

Для ***построения классификатора на основе нейронных сетей*** необходимо выполнить следующие этапы:

- предварительная обработка данных,
- выбор топологии сети,
- выбор способов определения количества скрытых слоев,
- выбор способов определения количества нейронов скрытых слоев,
- выбор способов инициализации начальных весов,
- выбор алгоритма обучения сети,
- выбор способов оценки работы сети.

Алгоритм построения классификатора на основе нейронных сетей приведен на рис. 3. Этот алгоритм можно использовать также для построения нейронной сети, решающей задачу прогнозирования. В данном случае выходом нейронной сети будет являться прогнозируемое значение показателя, а не тип класса.

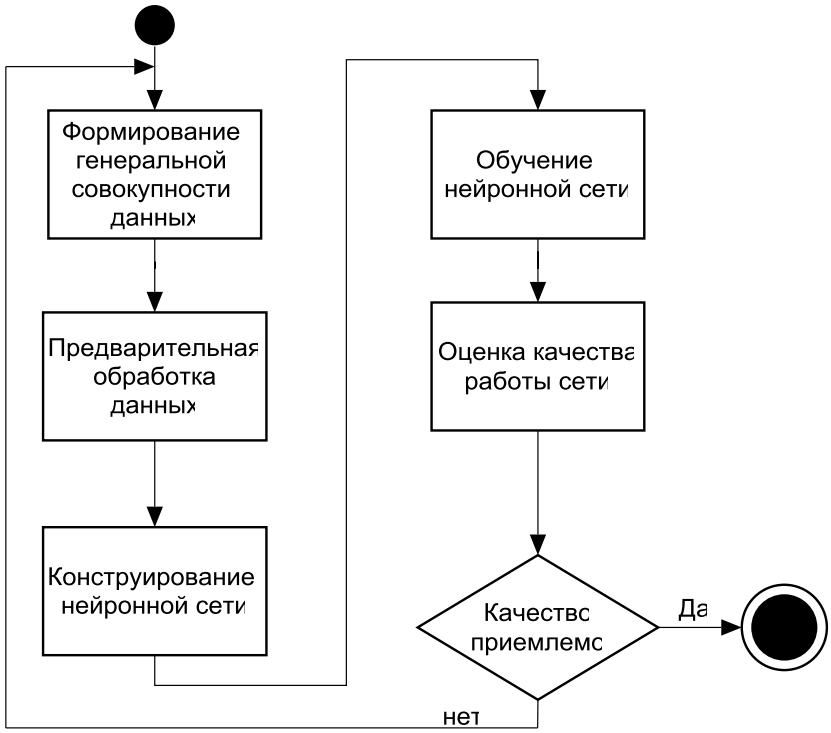


Рис. 3. Алгоритм построения классификатора на основе нейронных сетей

Одним из ключевых этапов в работе нейронной сети является процесс обучения с целью подбора весовых коэффициентов. Математическая постановка задачи обучения нейронной сети – минимизация целевой функции ошибки нейронной сети. Широко распространенный метод градиентного спуска [15] имеет ряд недостатков (низкая скорость сходимости, высокое число априорных показателей, проблема локального минимума). Альтернативой методу градиентного спуска является генетический алгоритм минимизации функции стоимости нейронной сети, который базируется на принципе естественного отбора и позволяет избежать многих проблем на этапе обучения сети [4]. Также появляется возможность с помощью генетического алгоритма решить задачу выбора последовательности управляющих воздействий, при которой отклонение прогнозируемого значения комплексной оценки ОЭС (или отдельного показателя электроэнергетической системы) от желаемого (требуемого значения показателя) минимально.

4. Демонстрационный пример для иллюстрации возможностей применения ИНС.

Постановка задачи. Необходимо спрогнозировать отношение генерации к потреблению электроэнергии на 7 дней вперед. Результаты прогнозирования классифицировать. Количество классов ситуаций равно трем – нормальная, предкризисная, кризисная. Данные для обучающей выборки (временной ряд) были взяты с 01.01.2013 по 17.06.2019 (временной интервал - сутки). Была сформирована генеральная совокупность из 2359 объектов для обучения сети. Каждый объект описывается 2 параметрами (признаками): дата и количество произведенной электроэнергии (МВт*сут) (рис. 4). Вся выборка была

нормализована в диапазоне от 0 до 1. На полученном наборе обучается сеть с 6 входами и одним выходом.

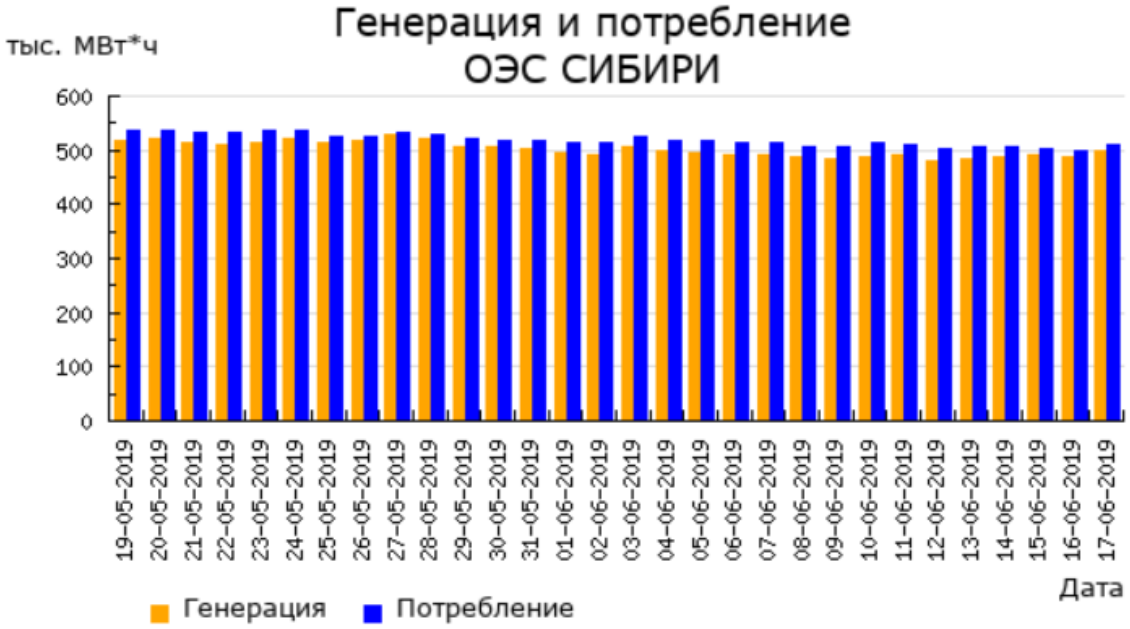


Рис. 4. Исходные данные для демонстрационного примера

Для разработки прототипа программного модуля была выбрана архитектура прямого распространения сигнала для нейронной сети, состоящая из 4 слоев: входной слой, 2 скрытых слоя, выходной слой. Входной слой состоит из 6 нейронов, первый скрытый слой - из 5 нейронов, второй скрытый слой - из 3 нейронов, выходной слой - 1 нейрон.

В качестве алгоритма обучения было предложено воспользоваться генетическим алгоритмом и алгоритмом обратного распространения ошибки, и затем сравнить их результаты. В качестве функции активации скрытых слоев используется сигмоидальная функция. Средства разработки прототипа: язык программирования Python; среда разработки для программной реализации PyCharm.

5. Результаты работы прототипа программного модуля. Обучение ИНС с помощью генетического алгоритма основано на идее естественного отбора в живой природе. В этой модели роль генов играют наборы чисел, в нашем случае это весовые коэффициенты нейронной сети. Мутация происходит путем изменения весового коэффициента на случайную величину. Диапазон и вероятность мутации заданы начальным значениями, но в ходе эволюции также могут мутировать. Скрещивание происходит путем случайного смешивания нейронов двух ИНС. Полученная таким образом новая ИНС занимает место в популяции. Задачей генетического алгоритма является минимизация целевой функции. В качестве целевой функции используется средняя ошибка нейронной сети. Параметры ГА: минимальное количество особей в популяции = 5; максимальное количество особей в популяции = 30; начальное количество мест в популяции = 10; вероятность мутации 0.1; уровень мутации = 0.5.

В табл. 1, рис. 5 и в табл. 2, рис. 6 приведены соответственно результаты работы прототипа для обоих случаев. Сравнение таблиц и графиков позволяет сделать вывод о сопоставимости результатов, что подтверждает возможность применения генетического алгоритма для определения весовых коэффициентов ИНС.

Таблица 1. Обучение с помощью генетического алгоритма

Кол-во итераций	Ожидаемый нормализованный выход	Реальный нормализованный выход	Ожидаемый выход	Реальный выход	Отклонение реального от ожидаемого %
500	0,214449	0,19879	490286	486169	0,84%
	0,174254	0,19788	479720	485930	1,29%
	0,19135	0,19753	484214	485838	0,34%
	0,199715	0,19663	486413	485601	0,17%
	0,213	0,1966	489905	485594	0,88%
	0,205437	0,19686	487917	485662	0,46%
	0,241912	0,19734	497505	485788	2,36%

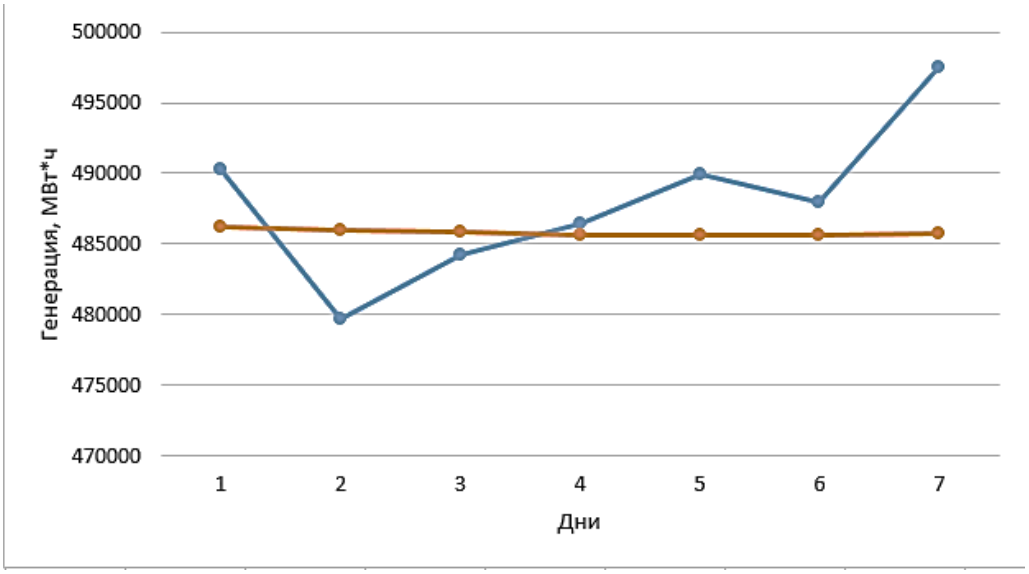


Рис. 5. Прогноз генерации электропотребления с помощью ИНС (использование ГА в качестве алгоритма обучения)

Таблица 2. Обучение с помощью алгоритма обратного распространения ошибки

Кол-во итераций	Ожидаемый нормализованный выход	Фактический нормализованный выход	Ожидаемый выход	Фактический выход	Отклонение (%)
500	0,214449	0,20585	490286	488025	0,46%
	0,174254	0,20029	479720	486564	1,43%
	0,19135	0,19777	484214	485901	0,35%
	0,199715	0,19584	486413	485394	0,21%
	0,213	0,19323	489905	484708	1,06%
	0,205437	0,19047	487917	483982	0,81%
	0,241912	0,18778	497505	483275	2,86%

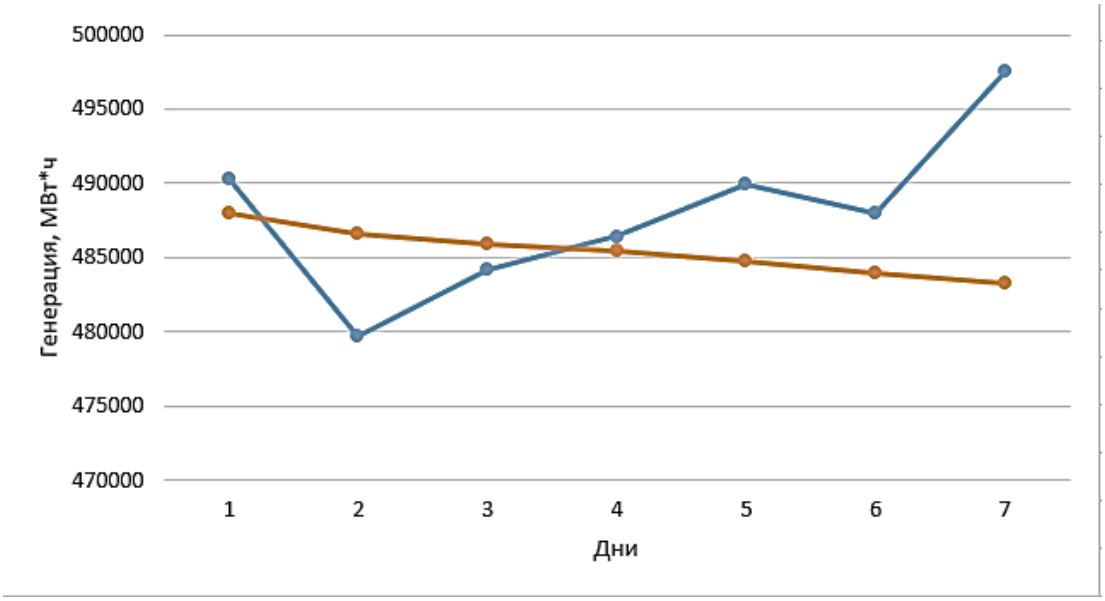


Рис. 6. Прогноз генерации электропотребления с помощью ИНС (обучение с использованием алгоритма обратного распространения ошибки)

Заключение. Проверена возможность применения методов машинного обучения при реализации концепции ситуационного управления, применительно к задачам электроэнергетики. С целью выбора последовательности управляющих воздействий предложено использовать бионическую модель, основанную на синтезе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Проанализирована возможность применения такого подхода, выбрана иллюстрационная задача, связанная с генерацией и потреблением электроэнергии в ОЭС Сибири.

Сформулированы требования к программному модулю классификации и прогнозирования экстремальных ситуаций на основе нейронных сетей; обоснован выбор инструментальных средств для проектирования и разработки программного модуля и реализован его прототип, Проведены расчеты, подтверждающие работоспособность реализованного прототипа. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают возможность применения генетического алгоритма для определения весовых коэффициентов ИНС. В дальнейшем предполагается интегрировать разработанный программный модель в состав интеллектуальной системы поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики [8].

Результаты получены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №19-07-00351, №18- 07-00714, № 19-57-04003

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика. М.: Радиотехника. 2009. 392 с.
2. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. С. 64–78.
3. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком. 2012. 496с.

4. Гергет О.М., Девятых Д.В. Бионические модели анализа функционирования динамических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении: труды XIX Байкальской Всероссийской конференции. 2014. Том 3. С. 17–21.
5. Гергет О.М., Девятых Д.В. Бионическая модель для идентификации биологических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 2 (6). С. 21–29.
6. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Под редакцией В.М. Курейчика. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит. 2006. 320 с. ISBN 5-9221-0510-8.
7. Массель Л.В., Массель А.Г. Методы и средства ситуационного управления в энергетике на основе семантического моделирования // Труды V Международной конференции OSTIS. Беларусь, Минск: БГУИР. 2015. С. 199–204.
8. Массель Л.В. Проблемы создания интеллектуальных систем семиотического типа для стратегического ситуационного управления в критических инфраструктурах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №1. С. 7–27.
9. Пяткова Н.И., Массель Л.В., Массель А.Г. Методы ситуационного управления в исследованиях проблем энергетической безопасности // Известия РАН. Энергетика. 2016. №4. С. 156–163.
10. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука. 1986. 284 с.
11. Федеральный проект «Цифровая энергетика». Режим доступа: http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf (дата доступа 7.08.2018)
12. Amirov A.Z., Gerget O.M., Bisenbay M.A., Baymuldin M.M. Applying Neural Network for Dynamical System Rating // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2013. Issue 74. Pp. 719–723.
13. Bengio Y., Goodfellow I., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) // The MIT Press. 2016. 800 p.
14. Caudell T.P. Genetic algorithms as a tool for the analysis of adaptive resonance theory neural network sets // Proceedings of International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, COGANN-92. 1992. Pp. 184–200.
15. Igel C., Toussaint M., Weishui W.R. Using the Natural Gradient. Trends and Applications in Constructive Approximation // ISNM International Series of Numerical Mathematics book series. 2005. Vol. 151. Pp. 259–272.
16. Gerget O.M. Bionic models for identification of biological systems // Journal of Physics. 2017. Vol. 803. Pp. 1–6.
17. Koza J.R., Rice J.P. Genetic generation of both the weights and architecture for a neural network // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Seatle, WA. 1993. Pp. 397–404.
18. Rusiecki A., Kordos M. Effectiveness of Unsupervised Training in Deep Learning Neural Networks // Schedae Informaticae. 24. 2016. Pp. 41–51.
19. Mandic D., Chambers J. Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability. Wiley. 2001.

20. Schizas C.N., Pattichis C.S., Middleton L.T. Neural networks, genetic algorithms and к-means algorithm: In search of data classification // Proceedings of International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, COGANN-92. 1992.
21. Zhang S., Choromanska A., LeCun Y. Deep learning with Elastic Averaging SGD // Neural Information Processing Systems Conference (NIPS 2015). Pp. 1–24.

УДК 004.85 : 621.31

THE USE OF MACHINE LEARNING IN SITUATIONAL MANAGEMENT IN RELATION TO THE TASKS OF THE POWER INDUSTRY

Lyudmila V. Massel
Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, e-mail: massel@isem.irk.ru
Head of Laboratory "Information Technologies in Energy Sector",
Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, 664130 Irkutsk, st. Lermontov 130
Olga M. Gerget
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: gerget@tpu.ru
Department of Information Technologies,
Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, 30 Lenin Ave.
Alexey G. Massel
PhD., Senior Researcher, e-mail: amassel@isem.irk.ru
Laboratory "Information Technologies in Energy Sector",
Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS
Timur G. Mamedov
Engineer of the Laboratory "Information Technologies in Energy",
e-mail: 4312786590435@mail.ru
Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, 664130 Irkutsk, st. Lermontov 130

Abstract. The article discusses the application possibilities of machine learning methods (artificial neural networks (ANN) and genetic algorithms (GA) to form management actions when applying the concept of situational management for intelligent support of strategic decision-making on the development of energy. At the first stage, the application of ANN to classify extreme situations in the energy sector, to select the most effective management actions (preventive measures) in order to prevent a critical situation from developing into an emergency. Genetic algorithms are proposed to be used to determine the weighting coefficients for training ANN. An algorithm for constructing a classifier based on a neural network and a demonstration task using data on generation and consumption of the United Electric Power System of Siberia are presented.

Keywords: situational management, machine learning, artificial neural networks, genetic algorithms, extreme situations in the energy sector, management actions (preventive measures).

References

1. Vasil'ev V.I., Il'jasov B.G. Intellektual'nye sistemy upravlenija. Teorija i praktika [Intelligent management systems. Theory and practice]. Moscow. Radiotekhnika = Publishing house Radioteknika. 2009. 392 p. (in Russian).
2. Voropay N.I., Stennikov V.A. Integrirovannye intellektual'nye jenergeticheskie sistemy [Integrated Intelligent Energy Systems] // Izvestija RAN. Jenergetika = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2014. no 1. Pp. 64–78 (in Russian)
3. Galushkin A.I. Neyronnyye seti: osnovy teorii [Neural networks: the basics of theory]. Moscow. Goryachaya liniya-Telekom = Hotline-Telecom. 2012. 496 p. (in Russian)
4. Gerget O.M., Devjatykh D.V. Bionicheskiye modeli analiza funktsionirovaniya dinamicheskikh sistem [Bionic models of the analysis of the functioning of dynamic systems] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii: trudy XIX Baykal'skoy Vserossiyskoy konferentsii = Information and mathematical technologies in science and management: proceedings of the XIX Baikal All-Russian Conference. 2014. Volume 3. Pp. 17–21. (in Russian)
5. Gerget O.M., Devjatykh D.V. Bionicheskaja model' dlja identifikacii biologicheskih sistem [Bionic model for identification of biological systems] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2017. no 2 (6). Pp. 21–29. (in Russian)
6. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic Algorithms]. Pod redakciej V.M. Kurejchika. 2-e izd = Edited by V.M. Kureichik. 2nd ed. Moscow. Fizmatlit. 2006. 320 p. ISBN 5-9221-0510-8. (in Russian)
7. Massel' L.V., Massel' A.G. Metody i sredstva situacionnogo upravlenija v jenergetike na osnove semanticheskogo modelirovanija [Methods and tools for situational management in the energy sector based on the semantic modeling] // V Mezhdunarodnaja konferencija OSTIS-2015: trudy. = IV International Conference OSTIS-2015: Proceedings. Minsk. BGUIR. = Belarus' State University of Informatics and Radiotechnics. 2015. Pp. 199–204 (in Russian)
8. Massel L.V. Problemy sozdanija intellektual'nyh sistem semioticheskogo tipa dlja strategicheskogo situacionnogo upravlenija v kriticheskih infrastrukturah [Problems of creating intelligent systems of the semiotic type for strategic situational management in critical infrastructures] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2016. no 1. Pp. 7–27. (in Russian)
9. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie. Teorija i praktika [Contingency management. Theory and practice]. Moscow. Nauka = Science. 1986. 284p. (in Russian)
10. Pyatkova N.I., Massel L.V., Massel A.G. Metody situacionnogo upravlenija v issledovanijah problem jenergeticheskoj bezopasnosti [Methods of situational management in studies of energy security problems] // Izvestija RAN. Jenergetika = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2016. no 4. Pp. 156-163. (in Russian)
11. Federal'nyj proekt «Cifrovaja jenergetika» [Federal project “Digital Energy”]. Available at: http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf (accessed 08.08.2018) (in Russian)

12. Amirov A.Z., Gerget O.M., Bisenbay M.A., Baymuldin M.M. Applying Neural Network for Dynamical System Rating // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2013. Issue 74. Pp. 719–723.
13. Bengio Y., Goodfellow I., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) // The MIT Press. 2016. 800 p.
14. Caudell T.P. Genetic algorithms as a tool for the analysis of adaptive resonance theory neural network sets // Proceedings of International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, COGANN-92. 1992. Pp. 184–200.
15. Igel C., Toussaint M., Weishui W.R. Using the Natural Gradient. Trends and Applications in Constructive Approximation // ISNM International Series of Numerical Mathematics book series. 2005. Vol. 151. Pp. 259–272.
16. Gerget O.M. Bionic models for identification of biological systems // Journal of Physics. 2017. Vol. 803. Pp. 1–6.
17. Koza J.R., Rice J.P. Genetic generation of both the weights and architecture for a neural network // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Seatle, WA. 1993. Pp. 397–404.
18. Rusiecki A., Kordos M. Effectiveness of Unsupervised Training in Deep Learning Neural Networks // Schedae Informaticae. 24. 2016. Pp. 41–51.
19. Mandic D., Chambers J. Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability. Wiley. 2001.
20. Schizas C.N., Pattichis C.S., Middleton L.T. Neural networks, genetic algorithms and κ-means algorithm: In search of data classification // Proceedings of International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, COGANN-92. 1992.
21. Zhang S., Choromanska A., LeCun Y. Deep learning with Elastic Averaging SGD // Neural Information Processing Systems Conference (NIPS 2015). Pp. 1–24.

УДК 004.94:004.89

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Черняховская Лилия Рашитовна
Д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: lr_chern@yandex.ru
Никулина Наталья Олеговна
К.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: nikulinano@outlook.com
Малахова Анна Ивановна
К.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: aimalakhova@gmail.com
Гарайшин Шамиль Гилемшинович
К.т.н., директор Учебно-научного центра «Геофизика»,
450095, г. Уфа, ул. Майкопская, 57, e-mail: gsg@bngf.ru
Нагимов Тимур Ришатович
Магистрант кафедры автоматизированных систем управления
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: t.nagimo2013@yandex.ru

Аннотация. В статье предлагается методика проектирования системы управления бизнес-процессами производственного предприятия на основе предварительного онтологического и имитационного моделирования предметной области. Целью проводимых исследований является организация поддержки принятия решений для участников проектов разработки и внедрения автоматизированных систем управления бизнес-процессами на предприятиях с преимущественно проектной организацией основной деятельности. Исследования поддержаны грантом РФФИ № 19-08-00937 «Методы и модели интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении программными проектами, реализуемыми в среде производственных предприятий».

Ключевые слова: имитационное моделирование, онтологическая модель, динамическая модель, база знаний, система управления бизнес-процессами, проектное управление, ресурсы.

Цитирование: Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Малахова А.И., Гарайшин Ш.Г., Нагимов Т.Р. Проектирование системы управления бизнес-процессами на основе онтологического анализа и имитационного моделирования предметной области // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 18–30. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-02

Введение. В сложных экономических условиях руководство любого предприятия заинтересовано в максимально возможной эффективности его деятельности, которая во многом зависит от результативности выполнения бизнес-процессов. В этой связи наметилась тенденция повсеместного перехода от позадачной модели деятельности, когда управление предприятием осуществляется в рамках жесткой организационной структуры, к процессной модели с применением гибких адаптивных структур управления сквозными процессами. Концепция процессного управления, активно развивающаяся в последние годы, зарекомендовала себя как одна из наиболее перспективных с точки зрения повышения эффективности деятельности современных предприятий. Согласно этой концепции, «цели предприятия достигаются через описание, проектирование, контроль процессов и их непрерывное совершенствование, которое необходимо для достижения нового уровня конкурентоспособности и взаимоотношений с поставщиками, клиентами и сотрудниками» [8]. В ее основе лежит принцип перехода от управления отдельными структурными подразделениями предприятия к управлению бизнес-процессами, непосредственно влияющими на получение конечного результата деятельности [7]. Однако организация такого перехода представляет собой довольно сложную задачу, успех решения которой зависит от множества факторов, и в первую очередь – от особенностей предметной области, в которой функционирует предприятие [1].

Сложность поставленной задачи и, как следствие, успешность ее решения зависят от:

– степени формализации бизнес-процессов, наличия хорошо структурированных регламентов, регулирующих деятельность сотрудников;

– степени использования информационных технологий, обеспечивающих взаимодействие при выполнении бизнес-процессов;

– степени заинтересованности как руководителей различных рангов, так и рядовых сотрудников предприятия в повышении прозрачности выполнения бизнес-процессов.

В связи со сложностью внедрения процессного подхода авторы предлагают разработать методику перехода к процессному управлению, основанную на детальном изучении особенностей функционирования конкретного предприятия, применении методов и моделей представления знаний, а также методов и средств моделирования процессов при выборе системы управления бизнес-процессами (СУБП).

1. Постановка задачи. Необходимость повышения эффективности выполнения бизнес-процессов привела к появлению целого класса программных средств, автоматизирующих деятельность сотрудников предприятия, а также оказывающих им информационную поддержку. Современный рынок программного обеспечения и информационных услуг предлагает большое количество разнообразных решений, предназначенных для обеспечения эффективного функционирования предприятий различных сфер деятельности [6].

В связи с интенсивным развитием информационных технологий, постоянным обновлением и расширением рынка средств автоматизации бизнес-процессов руководство предприятия может быть поставлено в затруднительное положение, обусловленное сложностью выбора программного обеспечения для решения различных проблем, возникающих при управлении деятельностью предприятия. Каждый из существующих видов прикладного программного обеспечения (системы управления проектами, системы

управления бизнес-процессами, системы электронного документооборота и т.д.) имеет свое назначение, а также свои достоинства и недостатки. Сравнительный анализ программного обеспечения достаточно сложен ввиду необходимости учета большого количества критериев и возможных альтернатив. Выбор любой системы управления бизнес-процессами сопряжен с необходимостью ее адаптации к складывавшейся годами модели взаимодействия сотрудников при выполнении своих задач, учета накопленного опыта решения различных проблем, использования предлагаемых технологий обработки информации с максимально возможной эффективностью.

Во многих областях деятельности бизнес-процессы выполняются в составе проектов, следовательно, необходимо учитывать факт влияния внешней и внутренней среды проекта на различные параметры бизнес-процессов. Система управления бизнес-процессами должна обеспечивать быстрое реагирование лиц, принимающих решения (ЛПР), в условиях высокой изменчивости внешней и внутренней среды реализации проектов.

Целью проводимых исследований является организация поддержки принятия решений для участников проектов разработки и внедрения автоматизированных систем управления бизнес-процессами на предприятиях. Исследования проводились на базе геофизического предприятия, одним из основных видов деятельности которого является выполнение проектов по сейсмической разведке газовых и нефтяных месторождений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать онтологическую модель поддержки принятия решений при планировании и выполнении проекта сейсморазведочных работ, включающую основные классы объектов, входящих в процессы проекта, и отношения между ними;

2) разработать имитационные модели процессов выполнения сейсморазведочных работ с учетом выявленных зависимостей между классами объектов, полученных из онтологической модели;

3) на основе результатов имитационного моделирования разработать динамические модели производственных и организационных процессов для исполнения их в автоматизированной системе управления бизнес-процессами.

2. Онтологический инжиниринг проекта выполнения сейсморазведочных работ. Для выполнения полевых сейсморазведочных работ в составе геофизической компании действуют сейсморазведочные партии, выполняющие работы в нефтегазоносных районах на территории нашей страны – в Поволжье и на Урале, в Западной Сибири и Приполярье. Сейсморазведочная партия – это коллектив не менее 300 человек, тяжелая техника и сложнейшее геофизическое, топогеодезическое и буровзрывное оборудование, десятки рабочих и жилых вагончиков, а также инструменты, материалы и другие ресурсы, необходимые для обеспечения жизнедеятельности людей в сложных природно-климатических условиях.

Уникальность условий реализации процессов, связанных с сейсморазведкой, ограниченность ресурсов, необходимость комплексного подхода к организации деятельности для получения конкретного результата позволяют считать этот вид деятельности проектным. Это означает, что в геофизической компании актуально внедрение процессного управления для координации проектной деятельности в сейсморазведочных партиях.

Развитие современных технологий позволяет крупным промышленным предприятиям получать и хранить огромные массивы данных, описывающие технологические,

логистические и организационные задачи предприятия. Эти данные могут быть использованы для решения различных задач, в том числе, для моделирования различных аспектов проектной деятельности и ситуационного управления [3]. Проект сейсморазведочных работ (СРР), как и любой другой проект [12], проходит следующие стадии жизненного цикла:

1) инициирование (стадия предварительного обсуждения геологического задания с заказчиком, проведение рекогносцировки места проведения работ);

2) планирование (получение различных разрешений, подбор необходимых ресурсов и расчет их количества, формирование сейсморазведочной партии и ее мобилизация (доставка) к месту проведения работ);

3) выполнение сейсморазведочных работ и сбор геологической информации;

4) завершение (демобилизация партии, подготовка геологического отчета и сдача его заказчику).

На каждой из стадий жизненного цикла участники проекта должны взаимодействовать друг с другом, принимая решения, как в процессе выполнения повседневных задач, так и в случае возникновения проблемных ситуаций. Следует заметить, что для проекта СРР разрешение проблемных ситуаций имеет особое значение. Это связано с тем, что работы ведутся преимущественно в тяжелых климатических условиях в труднодоступных местностях. Ошибки и просчеты в принятии решений в ходе реализации проекта могут повлечь за собой не только огромные финансовые и репутационные потери для компании, но и угрозу жизни и здоровью персонала. Поэтому предлагаемая онтология проекта сейсморазведочных работ включает описание не только предметной области, но и связанных с выполнением проекта возможных проблемных ситуаций. Фрагмент предлагаемой онтологии представлен на рисунке 1.

Также следует заметить, что в структуре геофизической компании находится несколько сейсморазведочных партий (СРП). При этом разными партиями одновременно могут выполняться несколько проектов СРР, что на стадии планирования влечет неизбежный ресурсный конфликт в связи с тем, что оборудование и персонал закрепляются за партиями только на период проекта. Учитывая тот факт, что СРП находятся друг от друга и от центрального офиса за сотни километров, бывает очень сложно исправить ошибки планирования на стадии выполнения. Поэтому стадия планирования была выбрана в качестве предмета исследований, как наиболее важная для успешной реализации всего проекта, так и наиболее интересная с точки зрения количества и разнообразия возникающих проблемных ситуаций.

Онтологическая база знаний предназначена для выработки правил принятия решений на этой стадии жизненного цикла проекта. Онтологический анализ интересен в данной области исследований и на данной стадии жизненного цикла проекта в связи с тем, что он направлен на исследование и интерпретацию системных связей в сложных предметных областях с применением методов и средств компьютерного моделирования, к которым, несомненно, может быть отнесено ведение проектов сейсморазведочных работ. В работах [4, 9-11] приведены примеры построения онтологических баз знаний и в других предметных областях, также характеризующихся большой степенью неопределенности при принятии решений в проблемных ситуациях.

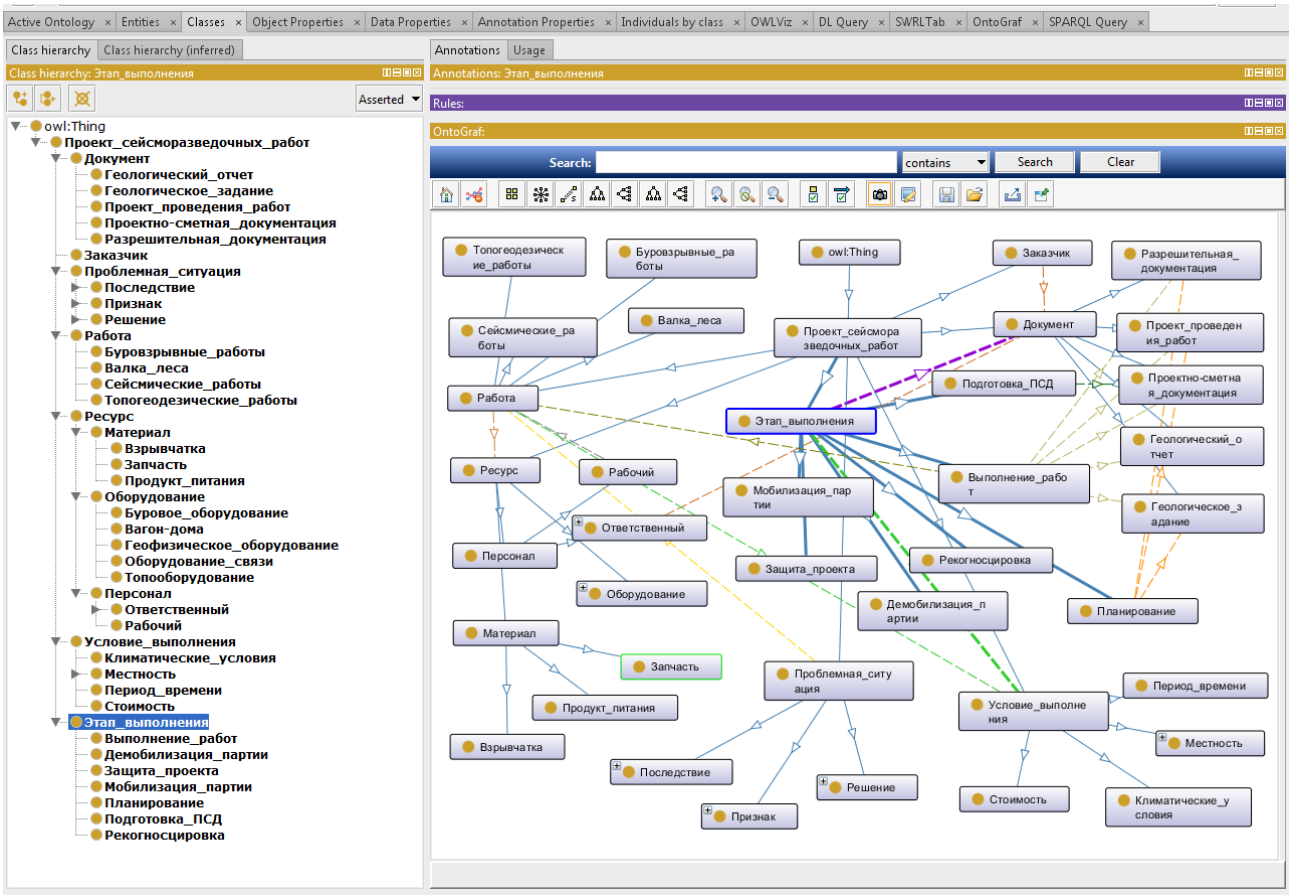


Рис. 1. Фрагмент онтологии проекта сейсморазведочных работ

Онтология, формализованная как семантическая сеть понятий, относящихся к методологическим и предметным (прикладным) знаниям, представляет декларативные знания в форме классов сущностей (концептов) и экземпляров классов с указанием отношений между ними [2]. Для разработки онтологии применяется язык OWL (Web Ontology Language), логической основой которого является дескриптивная логика. Дескриптивная логика сочетает в себе, с одной стороны, богатые выразительные возможности, а с другой – хорошие вычислительные свойства, такие, как разрешимость и относительно невысокая вычислительная сложность основных логических проблем, что делает возможным их применение на практике. В качестве редактора разрабатываемой онтологии используется средство построения онтологии Stanford's Protégé 5.2 с OWL-дополнением для кодирования онтологии и базы знаний [13]. Таким образом, разрабатываемая онтология поддержки принятия решений выполняет две основные функции: определяет общую терминологическую базу для участников проекта СРР и составляет основу для построения базы знаний, содержащую правила поддержки принятия решений в исследуемой области.

3. Имитационное и динамическое моделирование проекта выполнения сейсморазведочных работ. Одной из главных задач, стоящих перед геофизической компанией, является повышение эффективности выполнения проектов в условиях жесткой конкуренции. Эта задача может быть решена при переходе к процессному управлению с использованием современных автоматизированных систем управления бизнес-процессами (СУБП). Основа работы СУБП – использование динамических моделей в нотации BPMN 2.0,

отражающих логику взаимодействия сотрудников при решении различных производственных и управленческих задач, составляющих бизнес-процессы. Для того, чтобы внедряемая СУБП действительно оказала влияние на повышение эффективности деятельности предприятия, эти модели должны адекватно отражать предметную область. Поэтому при моделировании процессов необходимо учитывать риск возникновения проблемных ситуаций, опираясь при этом на сведения о разрешении ранее случавшихся аналогичных проблем. Особенность геофизической компании заключается в том, что бизнес-процессы неразрывно связаны с проектами СРР. Безошибочное выполнение бизнес-процессов кардинально влияет на успешность выполнения таких сложных проектов, как сейсморазведка.

Управление сложными масштабными проектами подразумевает необходимость прогнозирования различных сценариев его выполнения при возникновении проблемных ситуаций. Неоценимую помощь может оказать имитационное моделирование, учитывающее множество факторов, влияющих на результат как отдельных процессов, так и проекта в целом. Онтологическая база знаний, содержащая информацию о взаимосвязях различных объектов предметной области, способах и результатах разрешения проблемных ситуаций, позволяет использовать ее для настройки параметров имитационных моделей.

Имитационное моделирование выполнялось для бизнес-процессов, входящих в состав проекта СРР. Учитывались такие параметры, как ландшафт местности, степень износа применяемого топогеодезического и буровзрывного оборудования, наличие запасных частей и материалов. Наиболее часто встречающимися проблемными ситуациями являются поломка оборудования и нехватка запчастей и материалов. В зависимости от масштаба проблемы решение о ликвидации проблемной ситуации принимается на уровне начальника партии, либо вышестоящих уровнях организационной структуры – начальником экспедиции или в дирекции разведочной геофизики. При принятии решений руководители разных уровней руководствуются установленными ограничениями проекта – в первую очередь, сроками и бюджетом. На принятие решений влияет информация о климатических и географических характеристиках местности, где выполняются работы, а также о показателях освоенного объема работ на текущую дату.

Информация о проблемных ситуациях, возникавших при выполнении аналогичных проектов в прошлом, очень важна при планировании текущего проекта, и обязательно принимается во внимание при расчете необходимого количества ресурсов, в том числе различного оборудования, запасных частей и материалов. Поэтому начальникам сейсморазведочных партий, разрабатывающим планы проведения работ, целесообразно провести имитационное моделирование с целью определения оптимального количества ресурсов для работы в заданной местности еще до мобилизации партии к месту проведения работ. Разработанные планы проведения работ, включая заявленные потребности в ресурсах каждой партии, обсуждаются в ходе процедуры защиты проектов с участием руководства экспедиции и дирекции разведочной геофизики. Только после утверждения планов можно приступать к распределению ресурсов по партиям. Имитационное моделирование позволит существенно сократить срок разработки планов и исключить многократные итерации при их согласовании. Фрагмент модели планирования проекта сейсморазведочных работ представлен на рисунке 2.

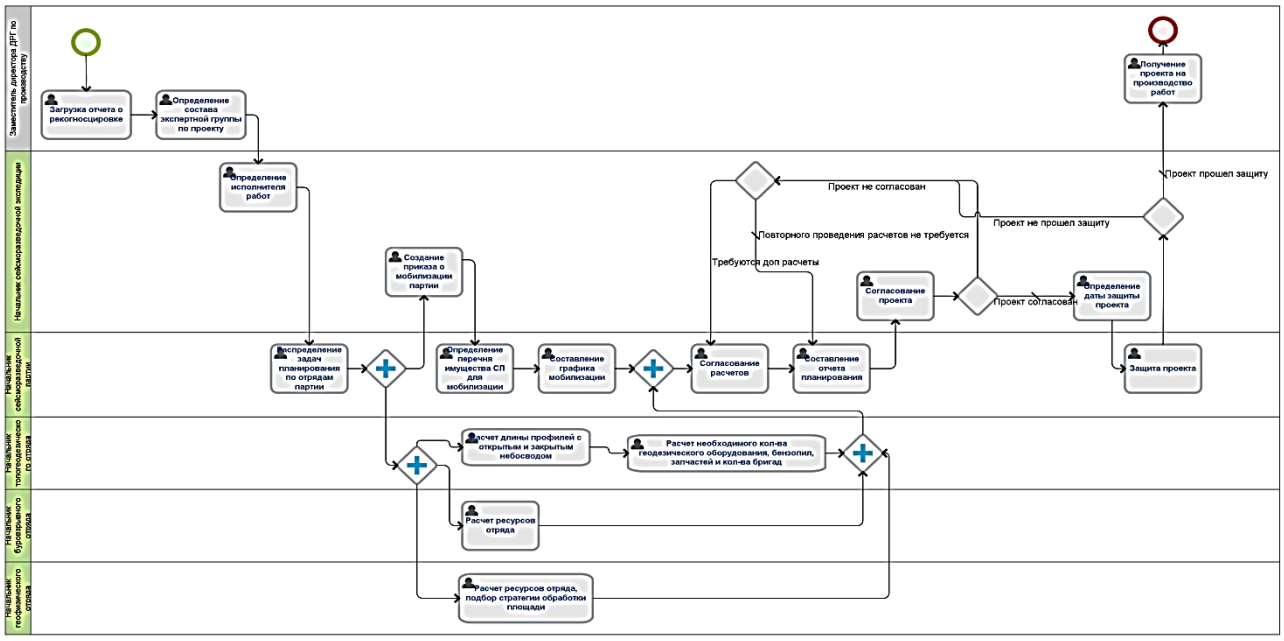


Рис. 2. Фрагмент модели планирования проекта проведения сейсморазведочных работ

Для разработки имитационных моделей было использовано программное средство AnyLogic [5]. При этом разработанная онтология экспортируется в OBO Format (на основе XML), допускающий ее дальнейшее преобразование в удобный для представления в AnyLogic вид и последующее использование.

На рисунке 3 представлен фрагмент настройки имитационной модели (слева) и результаты моделирования проблемной ситуации, связанной с отказом оборудования при выполнении топогеодезических работ на одном из участков (справа).

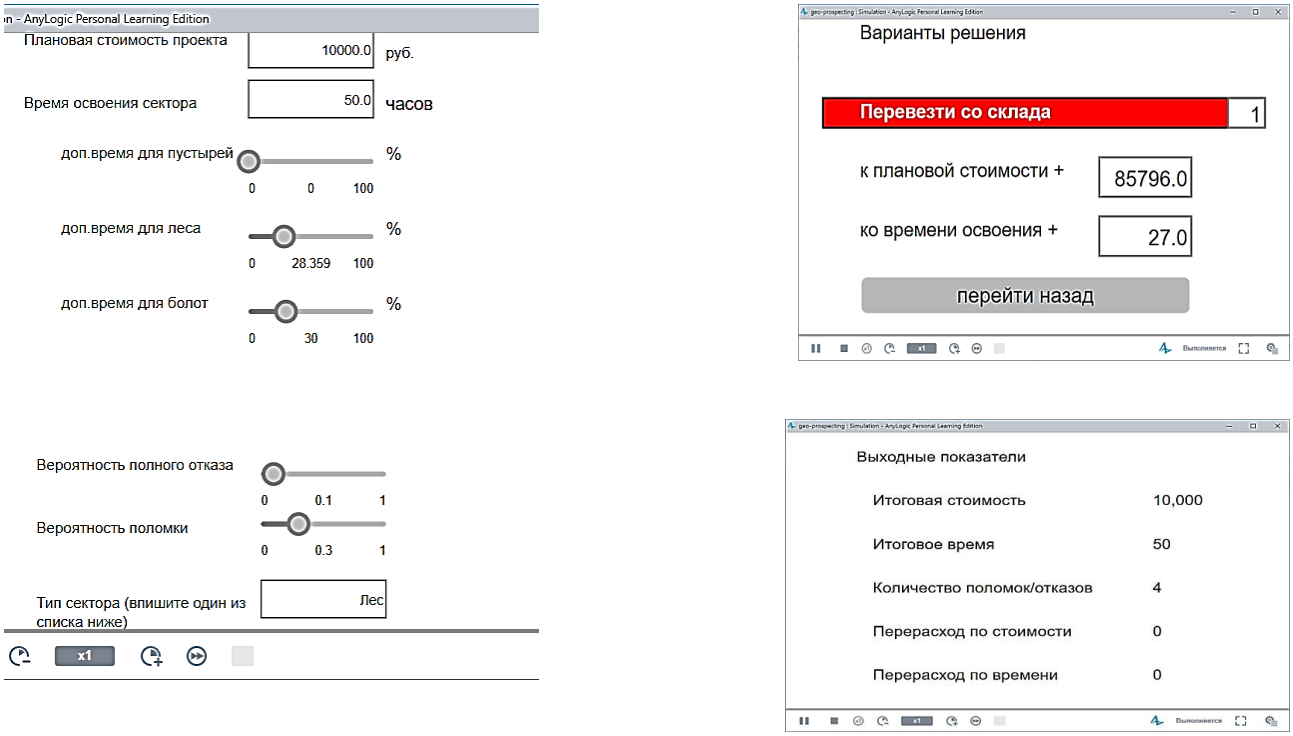


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели сейсморазведочных работ в AnyLogic

Имитационные модели, построенные с учетом разработанной онтологии, включающей основные классы и понятия предметной области, позволяют тестировать различные сценарии перед принятием ответственного решения. Сценарии, соответствующие различным проблемным ситуациям, оформляются в виде динамических моделей в нотации BPMN, после чего могут запускаться в автоматизированной системе управления бизнес-процессами в ходе выполнения реальных задач. На рисунке 4 представлен фрагмент динамической модели взаимодействия участников проекта в проблемной ситуации отказа оборудования в случае принятия решения о необходимости его ремонта.

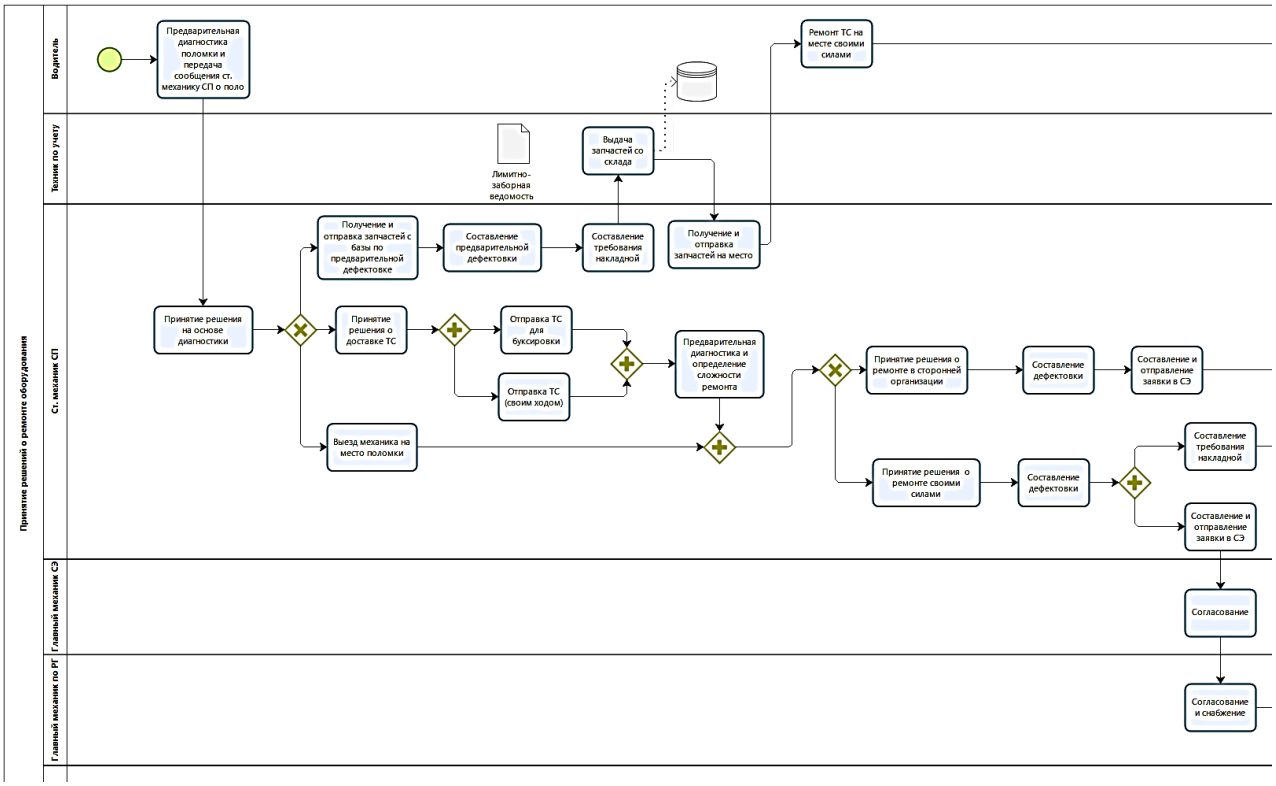


Рис. 4. Фрагмент динамической модели взаимодействия участников проекта при ликвидации проблемной ситуации

СУБП геофизической компании должна предусматривать возможные проблемные ситуации и их последствия, которые могут встретиться при выполнении бизнес-процессов на проекте СРР. Содержащаяся в онтологической базе знаний информация об уровне возникшей проблемы запускает в СУБП соответствующий сценарий ее ликвидации с учетом уровня ЛПР. Использование имитационного моделирования проблемных ситуаций в ходе планирования проекта сейсморазведочных работ предоставляет возможность обойтись без дорогостоящих натурных экспериментов и рассчитать наиболее оптимальный исход при выборе различных вариантов решений.

4. Методика внедрения системы управления бизнес-процессами на основе онтологического и имитационного моделирования предметной области. Процессное управление предполагает использование современных средств вычислительной техники и информационных технологий для обеспечения эффективного взаимодействия всех участников бизнес-процессов. Рынок ПО предлагает широкий выбор альтернативных решений, но необходимо помнить:

1) внедрение любой автоматизированной системы обязательно предваряет этап анализа предметной области и разработки проектных решений, в ходе которого осуществляется моделирование предметной области;

2) модели бизнес-процессов, являющиеся основой функционирования автоматизированной системы управления, являются инвариантными к средствам их реализации.

Поэтому предлагаемая авторами методика проектирования СУБП может быть использована на предприятиях любой сферы деятельности. Методика применяется на начальных стадиях жизненного цикла автоматизированной системы управления бизнес-процессами и предполагает выполнение следующих шагов.

1. Онтологический инжиниринг предметной области – определение границ моделирования (в описываемом в статье случае онтология ограничена рамками проекта сейсморазведочных работ), описание классов объектов, экземпляров классов и отношений между ними.

2. Интеграция онтологии предметной области и онтологии управления проектом для отображения, имевших место проблемных ситуаций, в виде прецедентов [4]. Подробное описание построения интегрированной онтологии приводится в [11].

3. Экспорт онтологии в формат на основе XML (OBO Format), допускающий ее дальнейшее использование и преобразование, необходимое для выбора метода и средства имитационного моделирования. На данном этапе решаются вопросы синхронизации компонентов модели, задания начальных условий, обработки результатов и сбора статистики.

4. Разработка имитационных моделей различных фрагментов онтологии – выбор средства моделирования, программирование и тестирование имитационной модели, проверка ее адекватности и соответствия требованиям пользователей.

5. Интерпретация результатов имитационного моделирования – выявление участников бизнес-процесса и возможных сценариев их взаимодействия, определение вероятности запуска различных сценариев.

6. Разработка динамических моделей бизнес-процессов в нотации BPMN 2.0 на основе результатов имитационного моделирования и онтологического инжиниринга.

7. Тестирование и отладка динамических моделей в выбранной автоматизированной системе управления бизнес-процессами (ELMA, Bizagi Studio, Bitrix и др.)

Заключение. Результатом онтологического анализа предметной области является база знаний, основанная на прецедентах принятия решений при возникавших неблагоприятных ситуациях в ходе выполнения проектов сейсморазведочных работ. Использование онтологической базы знаний для поддержки принятия решений ответственными лицами на различных стадиях проекта СРР в геофизической компании в настоящее время вряд ли возможно ввиду отсутствия соответствующих компетенций. Тем не менее, исследования в этой области чрезвычайно полезны для создания имитационных моделей на основе прецедентов принятия решений в проблемных ситуациях. Имитационные модели, учитывающие множество факторов, влияющих на результат как отдельных бизнес-процессов, так и проекта СРР в целом, позволят еще на этапе планирования прогнозировать различные сценарии его выполнения при возникновении проблемных ситуаций. В свою очередь, имитационная модель становится основой для разработки динамических моделей

предметной области, отражающих логику взаимодействия сотрудников при решении различных задач и являющихся основой функционирования автоматизированной системы управления бизнес-процессами. Таким образом, имитационные модели имеют практическое применение не только в составе методики проектирования системы управления бизнес-процессами геофизического предприятия, но и в проекте СРР на стадии его планирования.

Практическая ценность результатов исследования состоит в возможности существенного сокращения сроков разработки и внедрения автоматизированной системы управления бизнес-процессами за счет уменьшения количества итераций при ее тестировании, связанных с отладкой динамических моделей бизнес-процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадамшин Р.А., Ильясов Б.Г., Черняховская Л.Р. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний. М.: Машиностроение. 2003. 239 с.
2. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы: Учебник. СПб. Издательство «Лань». 2016. 324 с.
3. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. 2017. Т.7. №1(23). С. 66−76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
4. Никулина Н.О., Малахова А.И., Иванова И.Ф. Применение интеллектуальных технологий в решении проблем инновационных проектов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной научной конференции (3-6 сентября 2019 г., Самара): в 2-х т. Самара. ООО «Офорт». 2019. Т.2. С. 483–488.
5. Официальный сайт компании AnyLogic. Режим доступа: https://www.anylogic.ru (дата обращения 10.03.2019)
6. Панель ИТ-проектов России TAdviser. Режим доступа: http://www.tadviser.ru (дата обращения 05.04.2019).
7. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: Манн, Иванов и Фербер. 2013.
8. Свод знаний по управлению бизнес-процессами: BPM CBOK 3.0 / Под ред. А.А. Белайчука, В.Г. Елифёрова; Пер. с англ. 2 изд. М.: Альпина Паблишер. 2018. 480 с.
9. Черняховская Л.Р., Малахова А.И. Разработка моделей и методов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе онтологии организационного управления программными проектами // Онтология проектирования. 2013. №4 (10). С. 42–52.
10. Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Бармина О.В. Применение онтологического анализа и обработки знаний для принятия решений в проблемных ситуациях // Управление экономикой: методы, модели, технологии: Труды XV Международной научной конференции 22-24 октября 2015. Уфа. 2015. Т. 2. С. 181–186.
11. Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Ширяев О.В. Интеллектуальное управление сложными деловыми процессами на основе онтологических баз знаний: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ. 2018. 186 с.

12. A Gide to the Project Management Body of Knowledge (PMBoK), Sixth ed. / Project Management Institute, Inc., 14 Campus Boulevard, Newton Square, Pennsylvania 19073-3299 USA. 2017. 756 pages.
13. Official documentation on Protégé. Available at: http://protrgrwiki.stanfotd.edu/index.php/ ProtegeUserDocs (accessed 28.03.2019).

UDK 004.94:004.89

BUSINESS PROCESS MANAGEMENT SYSTEM DESIGN BASED ON ONTOLOGICAL ANALYSIS AND SIMULATION OF SUBJECT AREA

Liliya R. Chernyakhovskaya
Doctor of technical sciences, professor of technical cybernetics department
Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450008, Ufa, Russia,
e-mail: lr_chern@yandex.ru
Nataliya O. Nikulina
Candidate of technical sciences, docent of automated management systems department
Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450008, Ufa, Russia,
e-mail: nikulinano@outlook.com
Anna I. Malakhova
Candidate of technical sciences, docent of automated management systems department
Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450008, Ufa, Russia,
e-mail: aimalakhova@gmail.com
Shamil G. Garaishin
Candidate of technical sciences, Director of Educational and research center «Geophysics»,
57, Maikopskaya Str., 450095, Ufa, Russia, e-mail: gsg@bngf.ru
Timur R. Nagimov
2nd course master of automated management systems department
Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450008, Ufa, Russia,
e-mail: t.nagimo2013@yandex.ru

Abstract. The article proposes a method of business process management system design on the manufacturing enterprise based on preliminary ontological and simulation modeling of subject area. A purpose of the research is to organize a decision making support for the project participants directed on developing and implementation of automated business process management systems for enterprises with mostly project organization of its main activity. The research is supported by RFBR grant № 19-08-00937 "Models and methods of intellectual decision making support in software project management realized on manufacturing enterprises".

Keywords: simulation modeling, ontological model, dynamic model, knowledge base, business process management system, project management, resources.

References

1. Badamshin R.A., Ilyasov B.G., Chernyakhovskaya L.R. Problemy upravleniya slozhnymi dinamicheskimi ob"yektami v kriticheskikh situatsiyakh na osnove znaniy [Problems of complex dynamic objects management in critical situations on the basis of knowledge] Moscow. Mashinostroyeniye = Mechanical engineering. 2003. 239 p. (in Russian)
2. Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. Inzheneriya znaniy. Modeli i metody: Uchebnik [Knowledge engineering. Models and methods: Tutorial]. SPb = St. Petersburg. Izdatel'stvo «Lan'» = Publishing House “Lan”. 2016. 324 p. (in Russian)
3. Massel L.V., Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskiy inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh resheniy v energetike [Ontology engineering to support strategic decision making in the energy sector] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of Designing. 2017. Vol. 7. No 1(23). Pp. 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76. (in Russian)
4. Nikulina N.O. Malakhova A.I., Ivanova I.F. Primeneniye intellektual'nykh tekhnologiy v reshenii problem innovatsionnykh proyektov [Application of intelligent technologies in solving the innovative projects problems] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: Trudy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (3-6 sentyabrya 2019 g., Samara): v 2-kh t.= Proceedings of the XXI International Scientific Conference "Control and Modelling Problems in Complex Systems" (CMPCS-2019, September 3-6, 2019, Samara). Samara. OOO «Ofort» = LLC «Ofort». 2019. V. 2. Pp. 483–488. (in Russian)
5. Ofitsial'nyy sayt kompanii AnyLogic [Official website of “AnyLogic“]. Available at: https://www.anylogic.ru (accessed 10.03.2019). (in Russian)
6. Panel' IT-proyektov Rossii TAdviser [A panel of IT-projects in Russia, TAdviser]. Available at: http://www.tadviser.ru (accessed: 05.04.2019). (in Russian)
7. Repin V.V., Eliferov V.G. Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovaniye biznes-protsessov [Process approach to management. Business process modeling]. Moscow. Mann, Ivanov i Farber = Publishing House "Mann, Ivanov and Farber". 2013. (in Russian)
8. Svod znaniy po upravleniyu biznes-protsessami: BPM CBOK 3.0 / Pod red. A.A. Belaychuka, V.G. Yeliforova; Per. s angl. 2 izd. [A body of knowledge on business processes management: BPM CBOK 3.0 / edited by A.A. Belaichuk, V.G. Eliferov; translated from English. – 2nd ed.]. Moscow. Al'pina Pablisher = Alpina Publisher Publishing House. 2018. 480 p. (in Russian)
9. Chernyakhovskaya L.R., Malakhova A.I. Razrabotka modeley i metodov intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove ontologii organizatsionnogo upravleniya programmnymi proyektami [Development of intelligent decision support models and methods based on the software projects organization management ontology] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of Designing. 2013. No 4(10). Pp. 42–52. (in Russian)
10. Chernyakhovskaya L.R., Nikulina N.O., Barmina O.V. Primeneniye ontologicheskogo analiza i obrabotki znaniy dlya prinyatiya resheniy v problemnykh situatsiyakh [Application of ontological analysis and knowledge processing for decision making in problem situations] // Upravleniye ekonomikoy: metody, modeli, tekhnologii: Trudy XV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii 22-24 oktyabrya 2015. Ufa. 2015. T. 2 = Economic management: methods, models, techniques: Proceedings of the XV International scientific conference, 22-24 October 2015. Ufa. 2015. Vol. 2. Pp. 181–186. (in Russian)

11. Chernyakhovskaya L.R., Nikulina N.O., Shiryaev O.V. Intellektual'noye upravleniye slozhnymi delovymi protsessami na osnove ontologicheskikh baz znaniy: uchebnoye posobiye [Intelligent management for the complex business processes on the basis of ontological knowledge bases: textbook]. Ufa. Redaktsionno-izdatel'skiy kompleks UGATU = The publishing complex of Ufa state aviation technical university. 2018. 186 p. (in Russian)
12. A Gide to the Project Management Body of Knowledge (PMBoK), Sixth ed. / Project Management Institute, Inc., 14 Campus Boulevard, Newton Square, Pennsylvania 19073-3299 USA. 2017. 756 pages.
13. Official documentation on Protégé. Available at: http://protrgrwiki.stanfotd.edu/index.php/ ProtegeUserDocs (accessed 28.03.2019).

УДК 004.8

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Ворожцова Татьяна Николаевна
К.т.н., вед. инженер, e-mail: tnn@isem.irk.ru
Макагонова Надежда Николаевна
К.т.н., гл. специалист, e-mail: mak@isem.irk.ru
Массель Людмила Васильевна
Д.т.н., заведующий лабораторией, e-mail: massel@isem.irk.ru
Лаборатория информационных технологий в энергетике
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. В настоящее время очевидной является проблема влияния энергетики на окружающую среду как одного из антропогенных факторов. В рамках исследований по оценке влияния энергетики на геоэкологию региона предполагается разработка Web-ориентированной информационной системы, интегрирующей математические и семантические методы, инструментальные средства, базу данных и базу знаний рассматриваемой предметной области. В статье рассматривается предлагаемый онтологический подход к структурированию и интеграции информации, необходимой для исследований. Онтологии предлагается рассматривать как прообраз инфологической модели данных при проектировании базы данных и базы знаний.

Ключевые слова: геоэкология, антропогенный фактор, инфологическая модель, семантическое моделирование, онтология, метаонтология, база данных.

Цитирование: Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н., Массель Л.В. Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 31–41. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03

Введение. В ИСЭМ СО РАН совместно с коллективами ученых Беларуси и Армении при поддержке фондов ЕАПИ[1] и РФФИ[2] в рамках международного проекта «Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона» [7] выполняются исследования по оценке влияния объектов энергетики на экологию региона. Основной задачей геоэкологии является изучение изменений геосферных оболочек под влиянием природных и антропогенных факторов. Влияние энергетики на природную среду, как одного из антропогенных факторов, очевидно, но сложно выявить вклад той или иной отрасли промышленности в формирование загрязнений элементов природной среды. В настоящее время оценка влияния энергетики на экологию производится путем постоянного мониторинга эмиссии загрязняющих веществ, проведения замеров, а также расчета

[1] ЕАПИ – Евразийская Ассоциация поддержки научных исследований, учрежденная в июле 2016 г. по инициативе РФФИ совместно с партнерскими организациями Беларуси, Армении, Киргизии и Монголии.

[2]Результаты получены в рамках выполнения проекта по госзаданию №АААА-А17-117030310444-2, отдельные аспекты прорабатывались в рамках проектов, поддержанных грантами РФФИ № 18-57-81001 и № 19-07-00351

выбросов, сбросов загрязняющих веществ, образования отходов. Для оценки влияния энергетических объектов на природную среду рассматриваются характерные загрязняющие вещества, поступающие при функционировании этих объектов – водяной пар, сажа (углерод), взвешенные вещества, пыль неорганическая, золошлаковые отходы, диоксид серы, оксид углерода, оксиды серы и другие, замеряемые при обследовании объектов. Кроме замеров и расчетов, используются статистическая информация, отчетные данные конкретных предприятий, государственные доклады «О состоянии и об охране окружающей среды» [1].

1. Задачи проекта. Задачами выполняемых исследований по оценке влияния объектов энергетики на экологию региона являются, в частности, анализ существующих методов оценки выбросов загрязняющих веществ от энергетических объектов и моделей распространения загрязнений, а также определение состава информации, необходимой для использования рекомендуемых методов.

Одной из задач проекта является разработка Web-ориентированной информационной системы (WIS), которая интегрирует математические, семантические методы, инструментальные средства, базу знаний, базу данных и геоинформационную систему.

Архитектура WIS представлена на рис. 1 и включает четыре уровня:

- уровень семантического моделирования,
- уровень представления знаний,
- уровень представления данных,
- уровень математического моделирования.

База данных проектируется и реализуется на уровне представления данных, с использованием онтологий, реализуемых на уровне представления знаний.

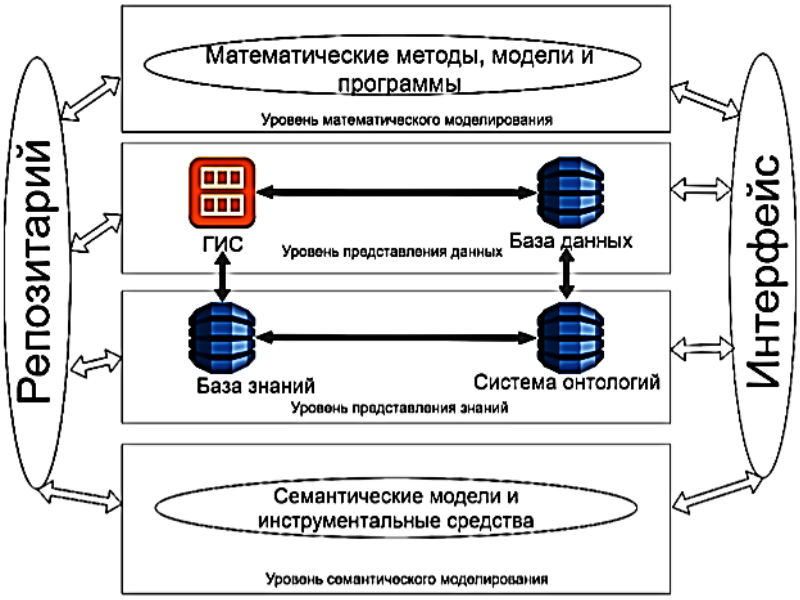


Рис. 1. Архитектура Web-ориентированной информационной системы

2. Состав необходимой информации. Исследователи ИСЭМ СО РАН, специалисты в области экологии, давно занимаются экологическими проблемами Байкальского региона и оценками негативного влияния объектов энергетики на окружающую среду, изучая выбросы загрязняющих веществ (сера, азот, сажа и др.) предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [в частности, 5]. Методической основой оценки такого воздействия является системный подход, в котором учитываются все взаимосвязанные процессы

производства – добыча топливно-энергетических ресурсов, их преобразование в конечный продукт (тепловую или электроэнергию, продукты переработки углеводородного топлива) и передача его конечному потребителю. При этом используются как непосредственные натурные наблюдения и данные мониторинга текущего состояния природной среды, так и статистическая и отчетная информация предприятий.

Для выполнения расчетов требуется широкий перечень сведений об энергоисточниках, функционирующих в Байкальском регионе, их составе, типах оборудования, мощности, производстве тепло- и электроэнергии, выбросах загрязняющих веществ и т.д. Энергоисточники подразделены на три группы объектов, сжигающих различные виды органического топлива, характерные для исследуемого региона:

- тепловые электрические станции,
- дизельные электростанции,
- котельные.

В таблице 1 в качестве примера приведены основные показатели по тепловым электрическим станциям с указанием наименования, принятого обозначения единицы измерения, источника информации и примечания. Значения некоторых показателей можно получить из статистических отчетов, но большая часть показателей обычно собирается специалистами во время проведения экспедиций при обследовании энергопредприятий, изучении годовых технических отчетов, паспортов предприятий, справочных книжек энергетика.

Таблица 1. Основные показатели тепловой электрической станции

Показатель	Принятое обозначение	Единица измерения	Источник информации	Примечание
Мощность электрическая	N	МВт	Формы статистической отчетности 6-ТП	
Мощность тепловая	Nт	Гкал/ч	Официальные сайты, годовые отчеты генерирующих компаний	
Тип и марка котлоагрегатов			Паспорта энергопредприятий, справочная книжка энергетика	
Паро-, тепло-производитель-ность котлов		т/ч, или ГДж/ч	Официальные сайты, годовые отчеты генерирующих компаний, паспорта котельных агрегатов	
Производство электроэнергии	W	млн. кВт·ч/год	Формы статистической отчетности 6-ТП	
Отпуск тепловой энергии	Q	тыс. Гкал/год	Формы статистической отчетности 6-ТП	
Вид и марка топлива			По крупному – формы статистической отчетности 6-ТП. С указанием добывающего предприятия – годовые отчеты энергокомпаний	Необходимо максимально подробно с указанием месторождения или добывающего предприятия
Суммарный расход топлива на выработку энергии	B	тыс. т/год	В условном исчислении – формы статистической отчетности 6-ТП	Перевод в натуральные объемы с использованием теплотворной способности видов топлива конкретных месторождений и добывающих предприятий

Топочное устройство			Обследование, годовые технические отчеты энергоснабжающих организаций, паспорта предприятий, справочная книжка энергетика	
Конструкция горелок				
Тип и марка очистного оборудования				
Тип шлакоудаления				Сухое или мокрое
Высота дымовой трубы	h	м		

Кроме основных технико-производственных показателей предприятий для оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферу необходима подробная информация о технических характеристиках топлива, способе его сжигания, конструкции и характеристиках топочного и очистного оборудования, составе загрязняющих веществ.

Для использования такого разнородного набора данных необходимо выполнить их структуризацию и спроектировать базу данных (БД) для хранения данных и их использования в моделях для оценки влияния энергопредприятий на геоэкологию Байкальского региона.

3. Семантическое описание предметной области. Семантическое описание предметной области является начальным этапом представления знаний, позволяющим выявить основные понятия и их взаимосвязи. Одним из способов описания семантических аспектов предметной области является онтология – «формализованная спецификация концептуализации» [14 - 16], т.е. формализованное описание терминов (концептов) предметной области и отношений между ними. Формализация позволяет применять программные средства для работы с онтологиями.

Онтологии используются в различных областях информатики и искусственного интеллекта, так как дают возможность представления и структурирования знаний. Существуют разные направления и технологии использования онтологий при разработке баз данных и информационных систем [10 - 13], такие, как:

- OBDI (Ontology Based Data Integration) – интеграция данных, базирующаяся на онтологиях;
- OBDA (Ontology Based Data Access) – доступ к данным, базирующийся на онтологиях;
- OBIS (Ontology Based Information Systems) – информационные системы, базирующиеся на онтологиях.

Как правило, при разработке баз данных онтологии используются в качестве концептуальных схем [2 - 4].

Проведенный онтологический инжиниринг предметной области данных исследований позволил выявить основные взаимосвязи базовых понятий [6] и разработать систему онтологий, включающую несколько уровней. При этом использовался авторский фрактальный подход [8] к структурированию знаний, который предполагает построение взаимосвязанных разномасштабных информационных объектов с использованием общих принципов и методов. На первом, верхнем уровне представлена метаонтология, отражающая взаимосвязи энергетики и геоэкологии.

Онтологии следующих, более детальных уровней, отражают этапы производственного процесса в энергетике и связанные с ними антропогенные факторы влияния на природную среду. На рис. 2 показана онтология процесса преобразования топлива, которая показывает зависимость выделенных антропогенных факторов (отходов и выбросов) от вида и качества топлива, технологии его сжигания и применяемой технологии очистки.

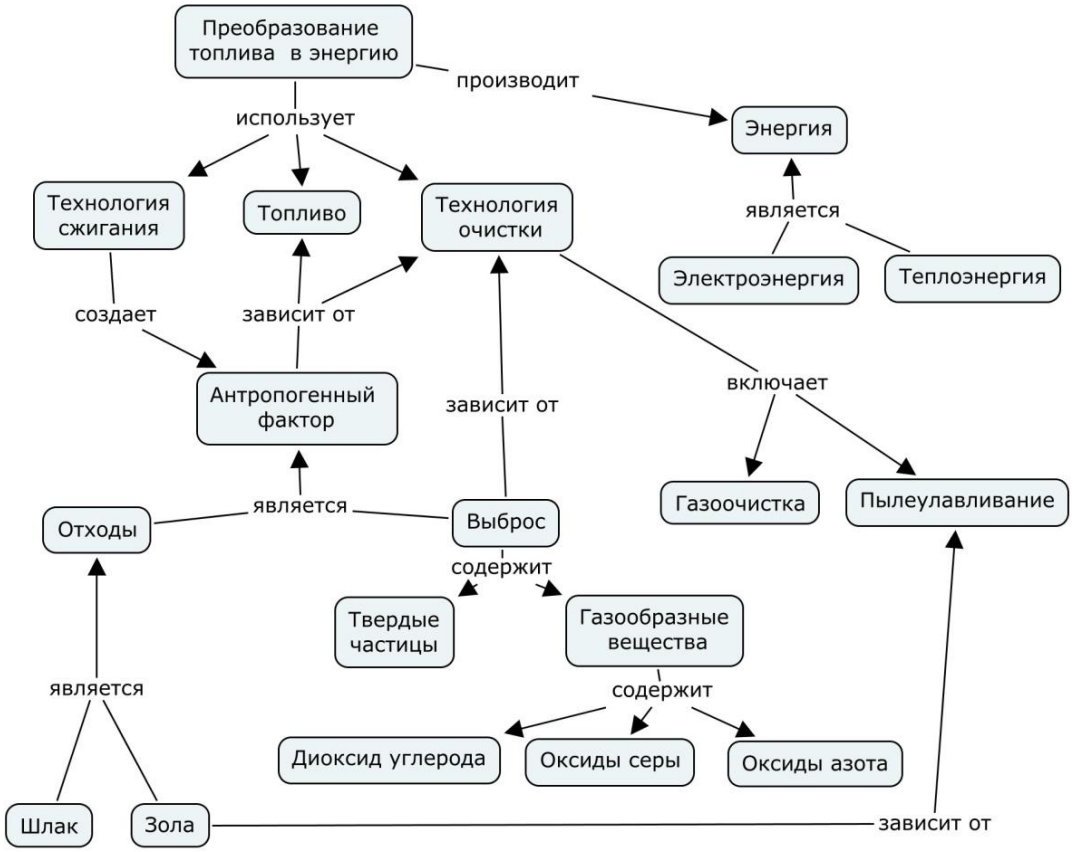


Рис. 2. Онтология этапа преобразования топлива

На уровне описания типовых энергетических объектов онтологии отражают свойства объекта, тип объекта (тепловая электростанция, дизельная электростанция, котельная), а также взаимосвязи с видом производимой энергии, типом топлива и характеристиками используемого оборудования (рис. 3).

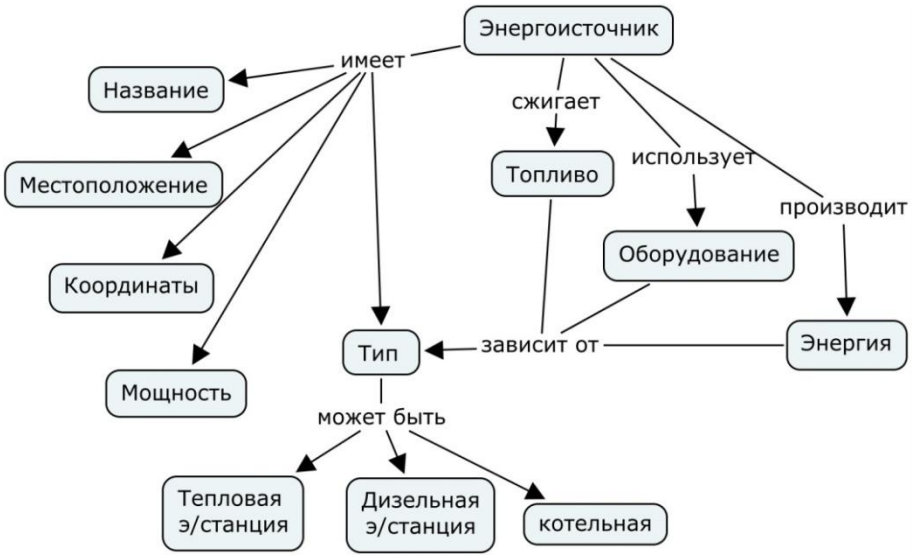


Рис. 3. Онтология типового энергетического объекта

На следующем, еще более детальном уровне онтологической модели энергообъекта, отражены основные технические характеристики и производственные показатели конкретных типов энергообъектов, численные значения которых хранятся в базе данных. Онтология показателей тепловой электростанции представлена на рис. 4.

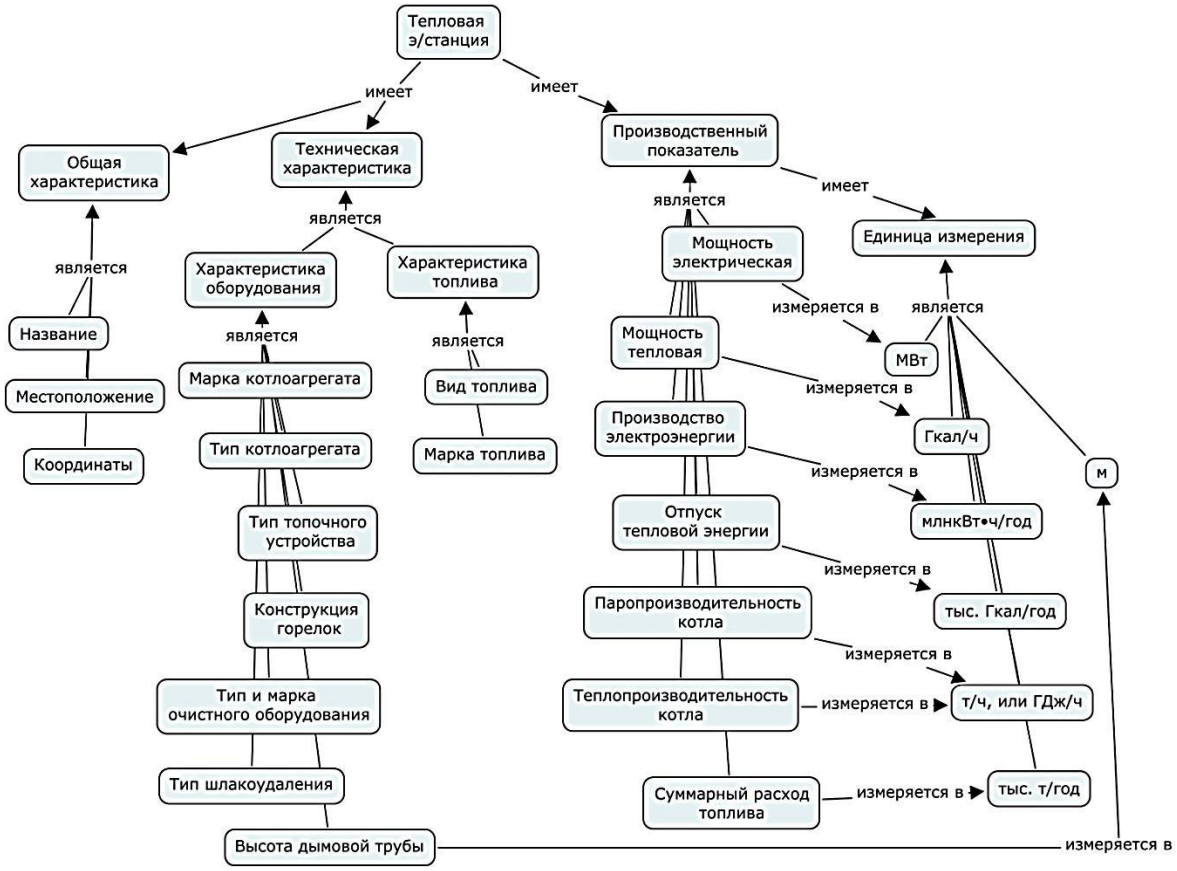


Рис. 4. Онтология тепловой электростанции

Разработанную систему онтологий предлагается использовать для формирования баз данных и знаний. Онтологические модели рассматриваются как прообраз инфологических моделей данных, на основе которых проектируются базы данных и базы знаний.

4. Построение инфологической модели данных на основе онтологий. Процесс разработки баз данных обычно начинается со стадии построения инфологической модели предметной области. Инфологическое моделирование также является способом построения семантической модели предметной области, то есть информационной модели наиболее высокого уровня абстракции. Инфологическая модель предметной области, предложена Петером Пин-ШенЧеном (PeterPin-ShanChen) в 1976 году [9, 17].

Основные элементы инфологической модели – это сущности и связи между ними:

- Сущность (Entity) – предмет, который может быть идентифицирован некоторым способом, отличающим его от других предметов. Сущность соответствует некоторому классу однотипных объектов и предполагается, что в системе существует множество экземпляров данной сущности. Объект, которому соответствует понятие сущности, имеет набор характеристик, определяющих свойства данного представителя класса, называемых атрибутами.
- Связь (Relationship) – ассоциация, устанавливаемая между сущностями. Связь может существовать между двумя разными сущностями или между сущностью и

ею же самой (рекурсивная связь). Она показывает, как связаны экземпляры сущностей между собой.

Диаграмма «сущность-связь» позволяет в графическом виде представить инфологическую модель предметной области. Такая модель разрабатывается без ориентации на какую-либо конкретную СУБД.

Инфологическая модель создается по результатам проведения исследований предметной области и используется для построения логической и физической моделей данных. Физическая модель данных непосредственно используется для построения базы данных.

Для разработки требуемой базы данных предлагается следующая методика построения инфологической модели, базирующаяся на анализе онтологий:

1. Анализ онтологий и выбор терминов, описывающих объекты предметной области, т.е. сущностей на языке инфологической модели.
2. Анализ отношений между выбранными терминами, выбор иерархических и структурных отношений, таких, как «состоит из», «входит», «является частью», «включает», «делится на» и др.
3. Анализ отношений между выбранными терминами и выбор таких, которые связывают сущность с ее свойствами, например, «описывает», «характеризует».
4. Выбор концептов в онтологиях, описывающих свойства объекта, т.е. являющихся признаками или атрибутами соответствующих сущностей.
5. Анализ свойств объекта и выбор таких, которые однозначно идентифицируют сущности, т.е. ключевых атрибутов.

На рис. 5 представлен фрагмент инфологической модели, основанной на анализе онтологий, описывающих энергообъекты трех типов (тепловые электрические станции, дизельные электростанции и котельные).

Заключение. В статье рассмотрен онтологический подход к построению базы данных для оценки влияния энергетики на геоэкологию региона. Проектируемая база данных является частью разрабатываемой Web-ориентированной информационной системы, которая интегрирует математические, семантические методы, инструментальные средства. Используемый системный подход предполагает учет всех взаимосвязанных процессов производства от добычи топливно-энергетических ресурсов до передачи тепловой и/или электрической энергии конечному потребителю. Примененный в рамках системного подхода семантический анализ предметной области и построенная система онтологий позволили структурировать имеющуюся информацию, построить инфологическую модель предметной области и спроектировать соответствующую базу данных.

Результаты получены в рамках выполнения проекта по госзаданию №АААА-А17-117030310444-2, отдельные аспекты прорабатывались в рамках проектов, поддержанных грантами РФФИ № 18-57-81001 и № 19-07-00351.

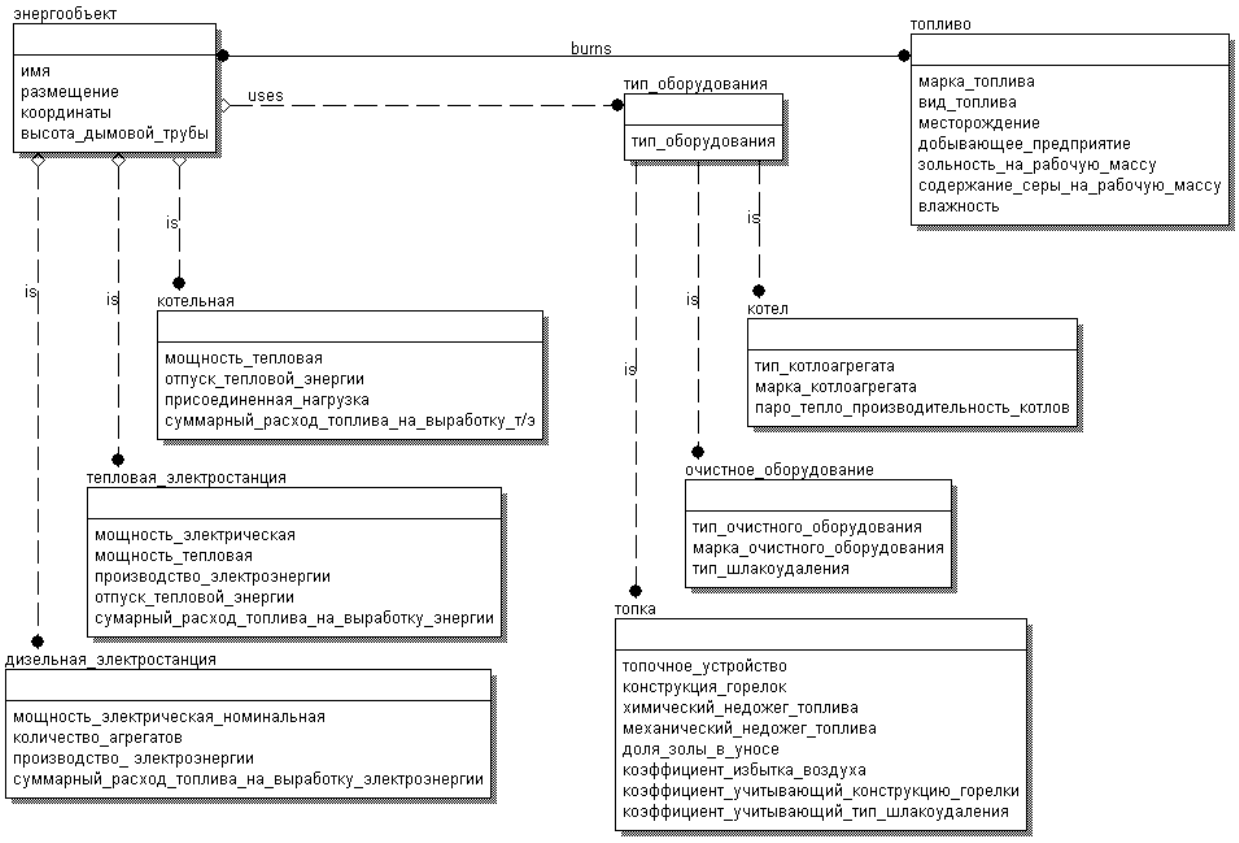


Рис. 5. Инфологическая модель описания энергообъектов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017_/ (дата обращения: 10.04.2019)
2. Калиниченко Л.А. Эффективная поддержка баз данных с онтологическими зависимостями: реляционные языки вместо дескриптивных логик // Программирование. 2012. № 6. С. 45–62.
3. Когаловский М.П. Метаданные в компьютерных системах // Программирование. 2013. № 4. С. 23–46.
4. Когаловский М.П. Системы доступа к данным, основанные на онтологиях // Программирование. 2012. № 4. С. 55−77.
5. Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Анализ существующих методов оценки воздействия энергетических объектов на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №4 (12). С. 113−127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12.
6. 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.

7. Массель Л.В. Проблема оценки влияния энергетики на геоэкологию региона: постановка и пути решения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 5–21. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-01.
8. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. №2(20). С. 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
9. Петер Пин-Шен Чен. Модель «сущность-связь» — шаг к единому представлению о данных / пер. с англ. М.Р. Когаловский // Системы управления базами данных. 1995. № 03.
10. A Direct Mapping of Relational Data to RDF / W3C Working Draft 24 March 2011. Available at: http://www.w3.org/TR/rdb-direct-mapping (accessed 10.04.2019)
11. A. Poggi, M. Ruzzi. Ontology-based data access with MASTRO. Available at: http://www.webont.org/owled/2007/PapersPDF/submission_33.pdf (accessed 11.04.2019)
12. Dejing Dou, Han Qin, Paea Lependu. Ontograte: towards automatic integration for relational databases and the semantic web through an ontology-based framework // International Jornal of Semantic Computing. Vol. 4, № 1 (2010). Pp. 123–151.
13. D. Calvanese, G. De Giacomo, D. Lembo, M. Lenzerini, A. Poggi, and R. Rosati. Ontology-based database access // Proc. of SEBD 2007. 2007. Pp. 324–331.
14. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. № 2. Pp. 199-220.
15. Gruber T.R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal Human-Computer Studies. Vol. 43. Pp. 907–948.
16. Guarino N. Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the 1st International Conference, Trento, Italy. FOIS. 1998. Vol. 46.
17. Peter Pin-Shan Chen. The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data // ACM Transactions on Database Systems. Volume 1. Number 1. 1976.

UDK 004.8

AN ONTOLOGICAL APPROACH TO THE DESIGN OF DATABASE FOR ASSESSING THE IMPACT OF ENERGY SECTOR ON THE ENVIRONMENT

Tatiana N. Vorozhtsova
PhD., main engineer, e-mail: tnn@isem.irk.ru
Nadezhda N. Makagonova
PhD., main specialist, e-mail: mak@isem.irk.ru
Liudmila V. Massel
Dr., Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory, e-mail: massel@isem.irk.ru
The laboratory of information technologies in power engineering
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Currently, the problem of the energy sector influence on the environment as one of the anthropogenic factors is obvious. As part of studies to assess the impact of energy sector on the geoecology of the region, it is proposed to develop a Web-based information system integrating mathematical and semantic methods, instrumental tools, a database and a knowledge base of the subject area under consideration. The article discusses the proposed ontological approach to the structuring and integration of data and knowledge necessary for research. Ontologies are proposed to be considered as a prototype of an infological data model when designing a database and knowledge base.
Keywords: geoecology, anthropogenic factor, infological model, semantic modeling, ontology, metaontology, database.

References

1. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2017 godu» [State report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2017"]. Available at: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017_/ (accessed 10.04.2019) (in Russian)
2. Kalinichenko L.A. Effektivnaya podderzhka baz dannykh s ontologicheskimi zavisimostyami: relyatsionnyye yazyki vmesto deskriptivnykh logik [Effective support of databases with ontological dependencies: relational languages instead of descriptive logics.] // Programmirovaniye = Programming. 2012. № 6. Pp. 45–62. (in Russian)
3. Kogalovsky M.P. Metadannyye v komp'yuternykh sistemakh [Metadata in computer systems] // Programmirovaniye = Programming. 2013. № 4. Pp. 23–46. (in Russian)
4. Kogalovskiy M.P. Sistemy dostupa k dannym, osnovannyye na ontologiyakh [Ontology-based data access systems] // Programmirovaniye = Programming. 2012. No. 4. Pp. 55–77. (in Russian)
5. Maysyuk Ye.P., Ivanova I.YU. Analiz sushchestvuyushchikh metodov otsenki vozdeystviya energeticheskikh ob"yektov na okruzhayushchuyu sredu [Analysis of existing methods for assessing the impact of energy facilities on the environment] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №4 (12). Pp. 113–127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12 (in Russian)
6. Massel' L.V., Ivanova I.YU., Vorozhtsova T.N., Maysyuk Ye.P., Izhbuldin A.K., Zorina T.G., Barsegyan A.R. Ontologicheskiye aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii [Ontological aspects of the study of the interaction of energy and geoecology] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of Designing. 2018. V.8. №4 (30). Pp. 550–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4. (in Russian)
7. Massel' L.V. Problema otsenki vliyaniya energetiki na geoekologiyu regiona: posta-novka i puti resheniya [The problem of assessing the impact of energy on the regional geo-ecology: formulation and solutions] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №2 (10). Pp. 5–21. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-01 (in Russian)

8. Massel' L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery yego pri-meneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of Designing. 2016. №2(20). Pp. 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161. (in Russian)
9. Peter Pin-Shen Chen. Model' «sushchnost'-svyaz'» – shag k yedinomu predstavleniyu o dannykh / per. s angl. M.R. Kogalovskiy [Model "entity-relationship" - a step to a single view of the data] // Sistemy upravleniya bazami dannykh = Database management systems. 1995. № 03. (in Russian)
10. A Direct Mapping of Relational Data to RDF / W3C Working Draft 24 March 2011. Available at: http://www.w3.org/TR/rdb-direct-mapping (accessed 10.04.2019)
11. A. Poggi, M. Ruzzi. Ontology-based data access with MASTRO. Available at: http://www.webont.org/owled/2007/PapersPDF/submission_33.pdf (accessed 11.04.2019)
12. Dejing Dou, Han Qin, Paea Lependu. Ontograte: towards automatic integration for relational databases and the semantic web through an ontology-based framework // International Jornal of Semantic Computing. Vol. 4. № 1 (2010). Pp. 123–151.
13. D. Calvanese, G. De Giacomo, D. Lembo, M. Lenzerini, A. Poggi, and R. Rosati. Ontology-based database access // Proc. of SEBD 2007. 2007. Pp. 324–331.
14. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. № 2. Pp. 199–220.
15. Gruber T.R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal Human-Computer Studies. Vol. 43. Pp. 907–948.
16. Guarino N. Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the 1st International Conference, Trento, Italy. FOIS. 1998. Vol. 46.
17. Peter Pin-Shan Chen. The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data // ACM Transactions on Database Systems. Volume 1. Number 1. 1976.

УДК 004.822:519.81:613.25-053.4

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ТРАЕКТОРИИ ЛЕЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С ИЗБЫТОЧНЫМ ВЕСОМ

Марухина Ольга Владимировна
К.т.н., доцент, e-mail: Marukhina@tpu.ru
Берестнева Ольга Григорьевна
Д.т.н., профессор, e-mail: ogb6@yandex.ru
Отделение информационных технологий,
Инженерная школа информационных технологий и робототехники
ФГАОУ ВО НИ Томский политехнический университет, 634050 г. Томск, пр. Ленина 30

Аннотация. Предложен подход к разработке алгоритмической базы системы поддержки принятия врачебных решений при выборе траектории лечения детей с избыточным весом. Проведено исследование структуры пропущенных данных клинико-лабораторных показателей, осуществлено восстановление пропущенных значений методом множественного восстановления и проведено сокращение размерности с использованием пакетов языка R. На основе полученных результатов построена модель принятия решений и определен набор правил для выбора траектории лечения. В результате, сформирован алгоритм обработки данных для принятия решения о выборе группы лечения детей с избыточным весом.

Ключевые слова: многомерные данные, анализ данных, система поддержки принятия врачебных решений, восстановление данных, снижение размерности, логические правила.

Цитирование: Марухина О.В., Берестнева О.Г. Разработка системы поддержки принятия решения для выбора траектории лечения детей с избыточным весом // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 42–52. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-04

Введение. В настоящее время многие учреждения здравоохранения разного масштаба и профилей во всем мире широко применяют автоматизацию медицинских технологий и соответствующих бизнес-процессов. Для этого используются медицинские информационные системы. Одним из важных направлений является разработка систем поддержки принятия решений (СППР). СППР используют для диагностики и прогнозирования заболеваний. Подобные системы не могут нести ответственность за принятые с ее помощью решения, но способны существенно упростить и облегчить работу врача. Цель СППР заключается в осуществлении кооперации системы и человека в процессе принятия решений.

Анализ научных публикаций по данной тематике показал, что исследования и разработки в области СППР ведутся по всему миру и в различных направлениях. Так, например, авторами [1] представлена система поддержки принятия врачебных решений (СППВР) для использования в области кардиологии. Система предназначена для выбора клинических решений по восьми основным заболеваниям сердечно-сосудистой системы. Позднее на основе использования системы был проведен анализ проблем, возникающих при внедрении технологий персональной телемедицины [6]. Предложены пути преодоления

существующих препятствий и повышения эффективности телемедицинских технологий для управления здоровьем, профилактики и реабилитации кардиоваскулярных заболеваний. В исследовании на базе Башкирского государственного медицинского университета [2, 3] были проанализированы возможности современных СППР в практике врача-хирурга. Исследования группы авторов [5] направлены на разработку архитектуры базы знаний СППР для инструментальной диагностики стенокардии, в основе которой лежит онтологический подход с использованием графовой базы данных. Ведутся разработки врачебных систем для выбора тактики лечения пациентов с ишемической болезнью сердца, а также в области дерматовенерологии [6, 8-11].

Актуальность разработки систем поддержки принятия решений обусловлена возникновением врачебных ошибок, которые могут возникать по разным причинам. Среди них ограниченность временных ресурсов, недостаточность знаний, отсутствие возможности привлечения компетентных экспертов, неполнота информации о состоянии пациента. Указанные факторы могут привести к серьезным проблемам со здоровьем в будущем. В связи с этим, общей задачей для всех СППР становится принятие «персонализированного» решения о траектории лечения каждого пациента. Новизна исследования заключается в создании нового алгоритма определения индивидуальной траектории лечения пациентов на основе анализа клинико-лабораторных показателей.

1. Постановка задачи. Избыточный вес и ожирение у детей и подростков является одной из самых серьезных проблем общественного здравоохранения в XXI веке. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения в 2016 году около 41 миллиона детей в возрасте до 5 лет имели избыточный вес или ожирение. С 1975 по 2016 гг. доля избыточного веса и ожирения среди детей и подростков в возрасте от 5 до 19 лет возросла с 4% до 18% и составило 124 миллионов человек. От последствий избыточного веса и ожирения умирает больше людей, чем от последствий аномально низкой массы тела. Ежегодно в результате избыточного веса или ожирения умирает в среднем 2,6 миллиона человек [15].

В рамках сотрудничества с научно-исследовательским институтом курортологии и физиотерапии г. Томска (ТНИИКиФ) был получен набор данных клинического исследования, проведенного на базе детского отделения. Данные представлены в виде многомерной таблицы и содержат значения групп клинико-лабораторных показателей пациентов. Пациентами являются дети и подростки в возрасте от 7 до 18 лет с избыточным весом. Набор данных содержит 345 объектов (пациентов), 160 показателей (значения до и после лечения) и 5 групп (траекторий лечения). Помимо вышеперечисленных групп показателей, массив данных содержит информацию о принадлежности пациента к группе лечения (1-5).

Разрабатываемая система предназначена для поддержки принятия врачебного решения о назначении пациенту наиболее подходящей для него траектории лечения на основе анализа значений его первичных клинико-лабораторных показателей.

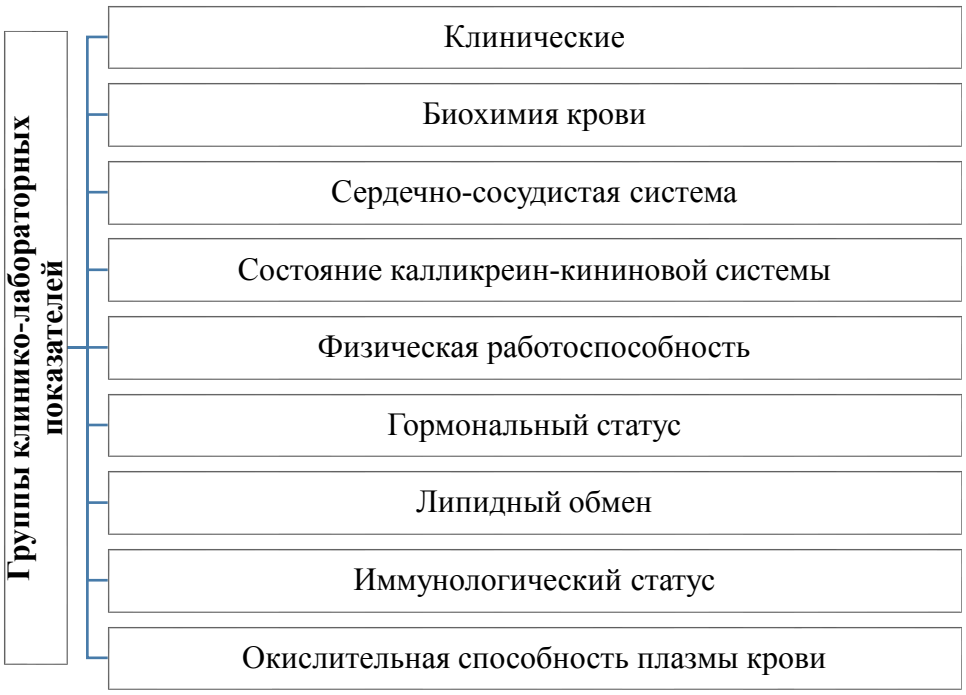


Рис. 1. Группы клинико-лабораторных показателей

2. Первичная обработка данных. Первичная обработка данных направлена на упорядочивание информации об исследуемом объекте: упорядочивание исходных данных; обнаружение и устранение ошибок, некорректно введенных данных, выбросов, пробелов в сведениях; выявление скрытых закономерностей и связей.

Данные исходного набора очень разрежены, в частности, некоторые «признаки» (столбцы таблицы данных) являются полностью пустыми. Подобные признаки были исключены из рабочей выборки.

Для определения выбросов по каждому показателю были использованы диаграммы размахов (ящики «с усами»), пример такой диаграммы представлен на рис. 2.

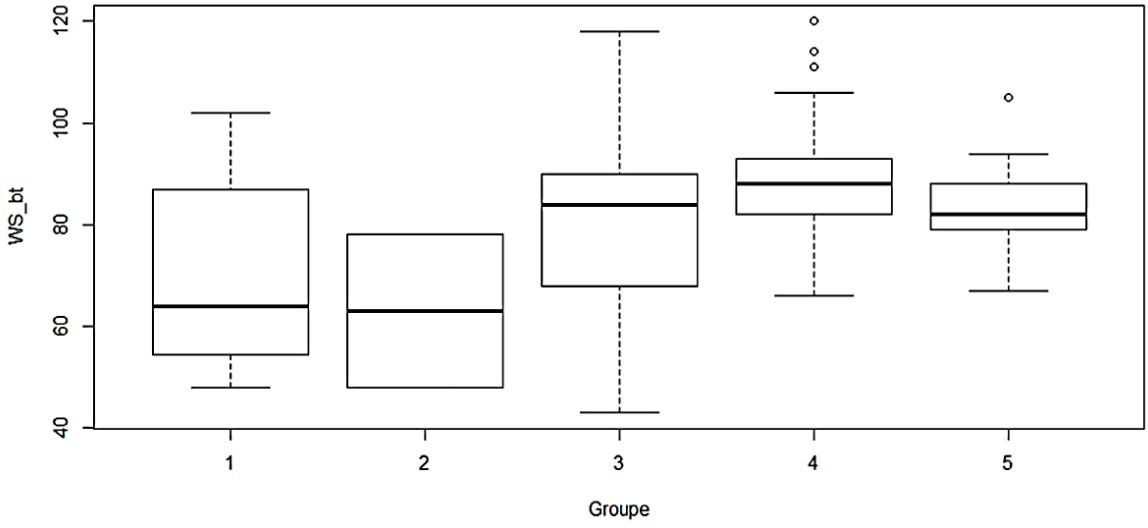


Рис. 2. Диаграмма размаха для показателя *Объем талии до лечения*

Как видно из рисунка, выбросы наблюдаются в четвертой и пятой группах, но существенным выбросом будем считать только максимальное значение 120, остальные

значения выбросов лежат в пределах значений других групп, поэтому могут быть допустимыми. При первичной обработке данных были проанализированы различные случаи наличия и обработки выбросов. Попадались показатели без выбросов, с множеством выбросов, с одним или двумя выбросами. Среди показателей набора данных были и такие, выбросы в которых были удалены полностью, т.к. не попадали в предел допустимых значений в каждой из рассматриваемых групп лечения.

2.1. Исследование и восстановление пропущенных значений. Большое количество статистических методов предполагает, что в ходе наблюдений были получены полностью укомплектованные наборы данных, но на практике пропуски в данных все же являются повсеместным явлением. Прежде чем перейти к анализу данных и построению визуальных образов, необходимо привести обрабатываемый набор данных к "каноническому" виду, т.е. либо удалить фрагменты объектов с недостающими элементами, либо заменить имеющиеся пропуски на некоторые разумные значения. Процедура "борьбы с пропусками" обычно включает следующие шаги:

1. Идентификация недостающих данных.
2. Исследование закономерностей появления отсутствующих значений.
3. Формирование наборов данных, не содержащих пропуски (в результате удаления или замены соответствующих фрагментов).

Идентификация недостающих данных является единственным однозначным шагом. Анализ пропущенных данных зависит от понимания процессов, которые воспроизводят экспериментальную информацию. Решение о способе устранения пропущенных значений также будет зависеть от оценки того, какие процедуры приведут к самым надежным и точным результатам. Идентификация пропущенных значений в пакете языка R обычно производится с использованием функций *is.na()* и *complete.cases()*. В исходном наборе данных было 0 полностью укомплектованных строк и 276 строк, имеющих хотя бы одно пропущенное значение.

Функция *aggr()* графически отображает число наблюдений для каждой отдельной переменной и для каждой комбинации переменных (рис. 3).

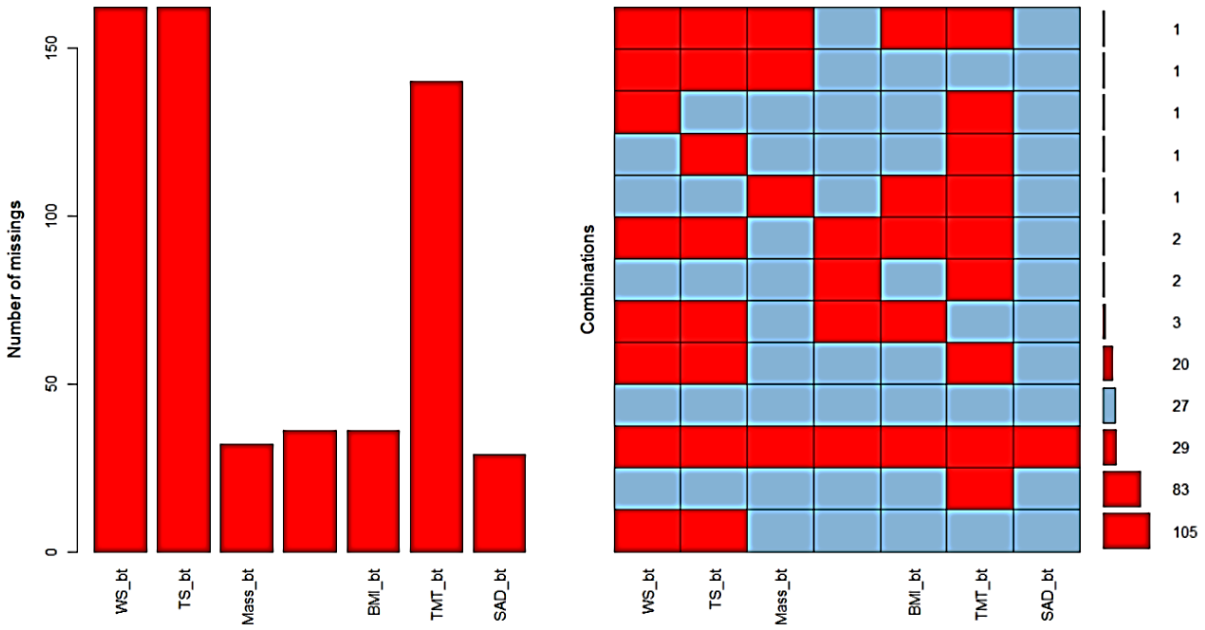


Рис. 3. Визуализация пропущенных значений

На диаграмме слева представлено количество пропущенных значений для каждого показателя до лечения в отдельности (*WS* – объем талии, *TS* – объем бедер, *Mass* – масса тела, *BMI* – индекс массы тела, *TMT* – тощая масса тела, *CAD* – систолическое артериальное давление), а справа – для комбинации показателей (цифры справа обозначают количество пациентов, у которых пропущены значения по комбинациям из указанных показателей).

Для анализа закономерностей появления отсутствующих значений можно заменить данные условными значениями: 1 – обозначает пропущенное значение, 0 – имеющееся. Вычисление корреляций по методу Пирсона между этими преобразованными переменными и между исходными переменными поможет узнать, значения каких переменных имеют тенденцию отсутствовать согласованно, а также выявить связи между отсутствием значений в одной переменной и значениями других переменных. В полученной корреляционной матрице строки являются наблюдаемыми переменными, а столбцы – преобразованными переменными, несущими информацию о наличии пропущенных значений. На рис. 4 приведен фрагмент этой матрицы.

	ОТ_дл	ОТ_пл	ОБ_дл	ОБ_пл	Масса_дл	Масса_пл	Избыток_дл	Избыток_пл	ИМТ_дл	ИМТ_пл
ОТ_дл	1.0000	0.9606	0.8527	0.8594	0.2691	0.2457	0.2195	0.2088	0.2873	0.2574
ОТ_пл	0.9606	1.0000	0.8742	0.8964	0.2756	0.2756	0.2274	0.2380	0.2943	0.2864
ОБ_дл	0.8527	0.8742	1.0000	0.9775	0.3045	0.2818	0.2622	0.2533	0.3252	0.2983
ОБ_пл	0.8594	0.8964	0.9775	1.0000	0.3023	0.3023	0.2595	0.2709	0.3227	0.3167
Масса_дл	0.2691	0.2756	0.3045	0.3023	1.0000	0.9656	0.8195	0.7962	0.8710	0.8317
Масса_пл	0.2457	0.2756	0.2818	0.3023	0.9656	1.0000	0.8195	0.8270	0.8710	0.8634
Избыток_дл	0.2195	0.2274	0.2622	0.2595	0.8195	0.8195	1.0000	0.9723	0.9121	0.8699
Избыток_пл	0.2088	0.2380	0.2533	0.2709	0.7962	0.8270	0.9723	1.0000	0.8866	0.8732
ИМТ_дл	0.2873	0.2943	0.3252	0.3227	0.8710	0.8710	0.9121	0.8866	1.0000	0.9557
ИМТ_пл	0.2574	0.2864	0.2983	0.3167	0.8317	0.8634	0.8699	0.8732	0.9557	1.0000

Рис. 4. Фрагмент корреляционной матрицы (наличие связи между признаками)

Как видно из таблицы, появление недостающих значений для признаков *ОТ_дл* (объем талии до лечения) и *ОТ_пл* (объем талии после лечения) взаимосвязано (r = 0.9606). Если коэффициенты корреляции в матрице не слишком велики, можно предположить, что пропуски не сильно отклоняются от полностью случайных величин и могут считаться случайными.

Для восстановления пропущенных значений воспользуемся методом множественного восстановления [4], при котором заполнение пропусков происходит при помощи повторного моделирования. Из существующего набора данных с пропущенными значениями создается несколько полных наборов данных, к каждому из которых применяются стандартные статистические методы для формирования окончательных результатов. Идея множественного восстановления пропущенных данных хорошо реализована такой функцией пакета языка R, как mice.

В mice многомерное восстановление данных реализуется при помощи связанных уравнений. Пропущенные значения замещаются при помощи выборок Гиббса, который представляет собой способ формирования выборок (x_1; …; x_n) из заданных распределений $p(x)$ m-мерных переменных путем многократного извлечения имитируемых значений. По умолчанию, каждая переменная, содержащая недостающие величины, моделируется в зависимости от всех других переменных в наборе данных. Полученные уравнения предсказания используются, чтобы приписать наиболее вероятные значения для пропущенных данных. Процесс повторяется, пока не будет достигнут определенный

критерий сходимости. Для каждой переменной пользователь может выбрать форму модели предсказания, называемую элементарным методом присвоения. Полученные уравнения используются для замещения пропущенных данных подходящими значениями. Этот процесс повторяется, пока значения для пропущенных данных не сойдутся. Процесс заполнения пропусков реализуется в несколько этапов (рис. 4).

Результатом работы функции mice() стала база данных с восстановленными значениями. Для оценки точности восстановленных данных были построены графики плотности распределения исходных и заполненных данных, пример представлен на рис. 5. Плотность исходных данных для каждого набора показана темным (синим) цветом, а плотность заполненных показателей – светлым (красным) цветом. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что распределения восстановленных данных близки к исходным [12].

- Функция mice() обрабатывает матрицу, содержащую недостающие значения, и возвращает объект, содержащий несколько полных наборов данных, отличающихся между собой значениями пропусков, заполненных в ходе процедуры Гиббса
- Функция with() используется, чтобы применить статистическую модель к каждому набору данных; это может быть линейная или обобщенная линейная модели, аддитивная модель или любая иная, задаваемая пользователем
- Функция pool() комбинирует результаты и объединяет их в заключительную модель, в которой стандартные ошибки и *p*-значения сбалансированы относительно неопределенности, порожденной пропусками
- Функция complete() создает набор данных с заполненными пропусками

Рис. 4. Этапы заполнения пропусков с использованием метода множественного восстановления

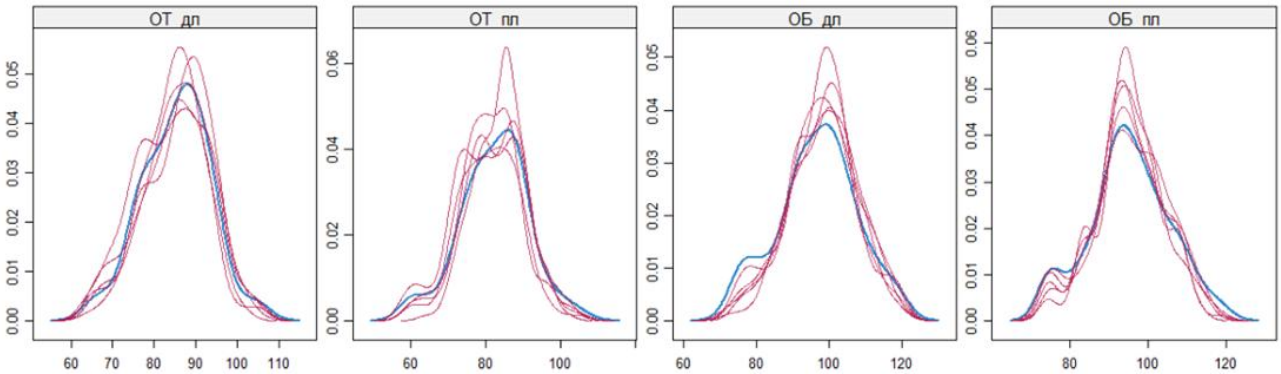


Рис. 5. Графики плотности распределения исходных (синий цвет) и заполненных (красный цвет) данных

3. Сокращение размерности данных. Рассмотрим методы выбора параметров для уменьшения размерности нашего набора данных. Высокая корреляция между двумя переменными означает, что они имеют сходные тенденции и, вероятно, несут схожую информацию. Это может резко снизить производительность некоторых моделей. Возможно рассчитать корреляцию между независимыми числовыми переменными, если коэффициент корреляции пересекает определенное пороговое значение, можно отбросить одну из

переменных. Отбрасывание переменной очень субъективно и всегда должно выполняться с учетом предметной области.

Некоторые методы, такие, как деревья решений, имеют встроенный механизм для сообщения о важности переменной. Для других алгоритмов важность может быть оценена с использованием анализа кривой ROC, проведенного для каждого атрибута. Случайный лес является одним из наиболее широко используемых алгоритмов выбора объектов. В него уже встроена функция важности, поэтому нет необходимости рассчитывать ее отдельно. Случайный лес может помочь выбрать меньшее подмножество функций.

Переменные с высокой важностью являются движущими факторами результата, и их значения оказывают значительное влияние на итоговые значения. Напротив, переменные с низкой важностью могут быть опущены в модели, что упрощает и ускоряет процесс подбора и прогнозирования.

Для выявления информативных признаков были использованы: дисперсионный анализ, классификация показателей по степени важности с использованием пакета Caret, случайный лес (Random Forest). Сравнительный анализ результатов этих методов позволили выделить 35 информативных признаков, сократив, таким образом, пространство исходных признаков: случайный лес дал наиболее полный набор (30 признаков) и еще 5 признаков были добавлены из результатов реализации дисперсионного анализа.

4. Построение прогностической модели. Для решения задачи формирования базы знаний был выбран метод построения дерева решений, как один из наиболее популярных и дающих хороший результат [12-14]. Исходными данными для построения дерева решений является набор данных, полученный в результате сокращения размерности. Данные были поделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20. Для построения дерева решений были использованы пакет RapidMiner и скриптовый язык R. Графическое представление дерева решения (модель для 35 информативных признаков) в R выглядит, как представлено на рис. 7.

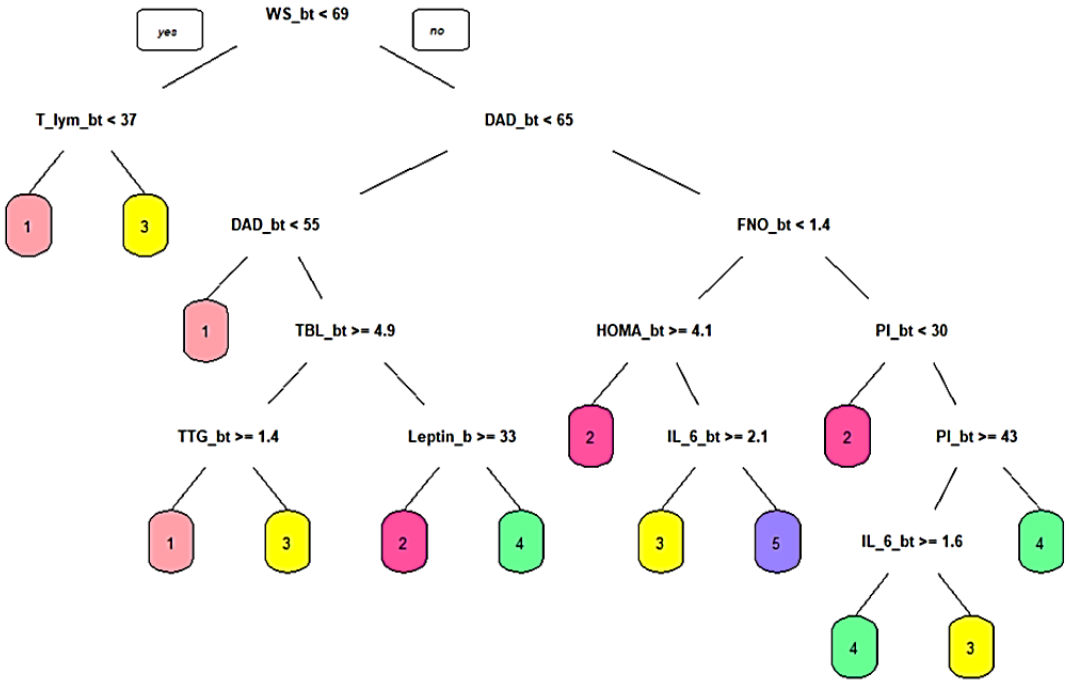


Рис. 7. Дерево решений (прогностическая модель)

Оценка точности построенной модели составляет 0.8284906. Для проверки качества построенной модели было проведено самостоятельное визуальное тестирование модели с исходными данными пациентов. Результат работы модели и априорное отнесение пациента к одной из 5 групп лечения совпали в 95% случаев.

Заключение. В результате проведенного исследования был разработан алгоритм поддержки принятия решения о выборе траектории лечений детей с избыточным весом на основе построения дерева решения. Для этого были реализованы следующие этапы: 1) получены результаты клинического исследования, проведенного на базе детского отделения Томского НИИ курортологии и физиотерапии; 2) проведена первичная обработка данных с помощью методов языка R, был проведен анализ выбросов и восстановление пропущенных значений методом множественного восстановления; 3) сокращена размерность признакового пространства средствами анализа уровня корреляции, линейной зависимости, дисперсии и степени важности признаков; 4) сформирована итоговая выборка для построения и поиска модели дерева решения, которая была разделена на обучающую и тестовую; 5) построено несколько моделей деревьев решений и выбрана модель с наилучшими значениями точности; 6) на основе полученной модели разработан модуль принятия решения в прототипе СППВР.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научного проекта № 18-07-00543.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атьков О.Ю., Кудряшов Ю.Ю., Прохоров А.А., Касимов О.В. Система поддержки принятия врачебных решений // Врач и информационные технологии. 2013. №6. С. 67–75.
2. Богданова Ю.А., Зарипова Г.Р., др. Современные модели экспертных медицинских систем в прогнозировании операционного риска при наиболее распространенных интраабдоминальных вмешательствах // Медицинский альманах. 2017. С. 9–12.
3. Зарипова Г.Р., Богданова Ю.А., др. Современные модели систем поддержки принятия врачебных решений в хирургической практике. Состояние проблемы // Медицинский вестник Башкортостана. 2016. С. 96–101.
4. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R / пер. с англ. Полины А. Волковой. М.: ДМК Пресс. 2014. 588 с.
5. Киселев К.В., Ноева Е.А., др. Разработка архитектуры базы знаний системы поддержки принятия врачебных решений, основанной на графовой базе данных // Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2018. С.42-48.
6. Кнышов Г.В., Руденко А.В., др. Особенности проектирования медицинской информационной системы поддержки принятия решений, основанной на интеллектуальном анализе данных // Кибернетика и вычислительная техника. 2014. Вып. 177. С. 79–87.
7. Кудряшов Ю.Ю., Атьков О.Ю., Касимов О.В. Телемедицинская профилактика, реабилитация и управление здоровьем: проблемы и решения // Врач и информационные технологии. 2016. №2. С.73–80.

8. Купеева И.А., Разнатовский К.И., др. Оценка эффективности интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений // Вестник СПбГУ. 2016. сер.10, вып.2. С. 62–68.
9. Мокина Е.Е., Марухина О.В., Шагарова М.Д., Дубинина И.А. Использование методов Data Mining при принятии медицинских диагностических решений. // Фундаментальные исследования. 2016. № 5-2. С. 269–274.
10. Раводин Р.А. Интеллектуальная система поддержки принятия врачебных решений в дерматовенерологии // Проблемы медицинской микологии. 2014. №3. С.59–65.
11. Спирячин А.А., Бурковский В.Л. Интеллектуальная система принятия решений в условиях выбора тактики лечения хронических заболеваний на основе облачных технологий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. №5-1.
12. Berestneva, O.G., Marukhina, O.V., Romanchukov, S.V., Berestneva, E.V. Visualization and Cognitive Graphics in Medical Scientific Research // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 11466 LNBI. 2019. Pp. 433–444.
13. Brett Lantz. Machine Learning with R. Packt Publishing, Birmingham – Mumbai. 2013. 396 c.
14. Gerget, O.M., Marukhina, O.V., Cherkashina, Yu.A. System for visualizing and analyzing multivariate data of medico-social research // Key Engineering Materials. 685. 2016. Pp. 957–961.
15. Obesity and overweight [Electronic resource] World Health Organization. Available at: https://www.who.int/topics/obesity/en/ (accessed 11.07.2019).

UDK 004.822:519.81:613.25-053.4

DEVELOPMENT THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SELECTING THE TREATMENT TRAJECTORY FOR CHILDREN WITH OVERWEIGHT

Olga V. Marukhina
Ass. Professor, e-mail: Marukhina@tpu.ru
Olga G. Berestneva
Dr., Professor, e-mail: ogb6@yandex.ru
Department of Information Technology, School of Information Technology and Robotics,
Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina Str., 634050, Tomsk, Russia

Abstract. An approach to the development of the algorithmic base of the medical decision support system when choosing the trajectory of treatment for children with an excessive weight is proposed. The structure of the missing data of clinical and laboratory indicators was studied, the missing values were restored using the multiple recovery method, and the size was reduced using the R language packages. Based on the results, a decision-making model was constructed and a set of rules for selecting the treatment trajectory was formed. As a result, a data processing algorithm was formed to decide on the choice of treatment group for overweight children.

Keywords: multidimensional data, data analysis, medical decision support system, medical research, data recovery, dimension reduction, logical rules.

Funding: The study was carried out with the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) within scientific project No. 18-07-00543.

References

1. At'kov O.Yu., Kudryashov Yu.Yu., Prohorov A.A., Kasimov O.V. Sistema podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij [Medical Decision Support System] // Vrach i informacionnye tekhnologii = Physician and Information Technology. 2013. no 6. Pp. 67–75. (in Russian)
2. Bogdanova YU.A., Zaripova G.R. et al. Sovremennye modeli ekspertnyh medicinskih sistem v prognozirovanii operacionnogo riska pri naibolee rasprostranennyh intraabdominal'nyh vmeshatel'stvah [Modern models of expert medical systems in predicting operational risk with the most common intra-abdominal interventions] // Medicinskij al'manah = Medical Almanac. 2017. Pp. 9–12. (in Russian)
3. Zaripova G.R., Bogdanova YU.A. et al. Sovremennye modeli sistem podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij v hirurgicheskoj praktike [Modern models of medical decision support systems in surgical practice. Problem state] // Medicinskij vestnik Bashkortostana = Medical Bulletin of Bashkortostan. 2016. Pp. 96–101. (in Russian)
4. Kabakov R.I. R v dejstvii. Analiz i vizualizaciya dannyh v programme R [R in action. Analysis and visualization of data in the program R] / translation to Russian by. Polina A. Volkova. Moscow. Izdatel'stvo "DMK Press" = publishing house "DMK Press". 2014. 588 p. (in Russian)
5. Kiselev K.V., Noeva E.A. et al. Razrabotka arhitektury bazy znanij sistemy podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij, osnovannoj na grafovoj baze dannyh [Development of the architecture of the knowledge base of the decision support system based on a graph database] // Medicinskie tekhnologii. Ocenka i vybor = Medical technology. Evaluation and selection. 2018. Pp. 42–48. (in Russian)
6. Knyshov G.V., Rudenko A.V. et al. Osobennosti proektirovaniya medicinskoj informacionnoj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij, osnovannoj na intellektual'nom analize dannyh [Features of designing a medical information decision-making system based on data mining] // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika = Cybernetics and Computer Engineering. 2014. no 177. Pp.79–87. (in Russian)
7. Kudryashov YU.YU., At'kov O.YU., Kasimov O.V. Telemedicinskaya profilaktika, reabilitaciya i upravlenie zdorov'em: problemy i resheniya [Telemedicine prevention, rehabilitation and health management: problems and solutions] // Vrach i informacionnye tekhnologii = Physician and Information Technology. 2016. no 2. Pp. 73–80. (in Russian)
8. Kupeeva I.A., Raznatovskij K.I. et al. Ocenka effektivnosti intellektual'noj sistemy podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij [Evaluating the effectiveness of an intelligent medical decision support system] // Vestnik SPbGU = SPbSU Bulletin. 2016. no 10-2. Pp. 62–68. (in Russian)

9. Mokina E.E., Marukhina O.V., Shagarova M.D., Dubinina I.A. Ispol'zovanie metodov Data Mining pri prinyatii medicinskih diagnosticheskih reshenij [Using Data Mining methods in making medical diagnostic decisions] // Fundamental'nye issledovaniya = Basic research. 2016. no 5-2. Pp. 269–274. (in Russian)
10. Ravodin R.A. Intellektual'naya sistema podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij v dermatovenerologii [Intellectual system for supporting the adoption of medical decisions in dermatology and venereology] // Problemy medicinskoj mikologii = Medical Mycology Problems. 2014. no 3. Pp. 59–65. (in Russian)
11. Spiryachin A.A., Burkovskij V.L. Intellektual'naya sistema prinyatiya reshenij v usloviyah vybora taktiki lecheniya hronicheskih zabolevanij na osnove oblachnyh tekhnologij [Intellectual decision-making system in terms of the choice of tactics for the treatment of chronic diseases based on cloud technologies] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2014. no 5-1. (in Russian)
12. Berestneva, O.G., Marukhina, O.V., Romanchukov, S.V., Berestneva, E.V. Visualization and Cognitive Graphics in Medical Scientific Research // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), volume 11466 LNBI, 2019. Pp. 433–444.
13. Brett Lantz. Machine Learning with R. Packt Publishing, Birmingham - Mumbai, 2013, 396 p.
14. Gerget, O.M., Marukhina, O.V., Cherkashina, Yu.A. System for visualizing and analyzing multivariate data of medico-social research // Key Engineering Materials, 685, 2016. Pp. 957–961.
15. Obesity and overweight [Electronic resource] World Health Organization. Available at: https://www.who.int/topics/obesity/en/ (accessed 11.07.2019)

УДК 004.415.2

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Барахтенко Евгений Алексеевич,
К.т.н., с.н.с., e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru
Соколов Дмитрий Витальевич,
К.т.н., с.н.с., e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

Аннотация. В статье представлен новый методический подход к автоматизированному построению программного обеспечения для решения задач проектирования систем теплоснабжения. Методический подход основан на парадигме Model-Driven Engineering. Суть этой парадигмы заключается в том, что программное обеспечение создается на основе моделей. Знания о системах теплоснабжения, прикладных задачах и прикладном программном обеспечении сохраняются для многократного использования в виде онтологий. Автоматизированное построение программного комплекса осуществляется на основе компьютерной модели системы теплоснабжения, онтологий и современных технологий метапрограммирования. Предложенный подход позволяет успешно решить проблему разделения методов решения прикладных задач и математических моделей элементов системы теплоснабжения. С этой целью методы реализуются в виде программных компонентов, которые не связаны со свойствами и моделями конкретного оборудования. А модели элементов системы теплоснабжения автоматически компилируются в программные компоненты. В процессе построения программной системы программные компоненты, реализующие модели и методы, динамически интегрируются в создаваемую систему. В результате программная система, ориентированная на решение конкретной прикладной задачи, создается в автоматизированном режиме. Разработанный подход использован для реализации программного комплекса СОСНА, который применяется для проектирования городских систем теплоснабжения.

Ключевые слова: методический подход, Model-Driven Engineering, онтология, метапрограммирование, проектирование систем теплоснабжени.

Цитирование: Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Методический подход к разработке программного обеспечения для проектирования систем теплоснабжения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 53–65. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-05

Введение. В ИСЭМ СО РАН в качестве теоретической основы для решения задач проектирования и управления функционированием трубопроводных систем предложена теория гидравлических цепей (ТГЦ). Она служит базой для моделирования, расчета, оценивания и оптимизации трубопроводных и гидравлических систем различного типа и

назначения [4]. В рамках ТГЦ выделяется проблема оптимального проектирования систем теплоснабжения (ТСС), которая охватывает широкий круг задач и состоит в поиске оптимального направления изменения структуры и параметров систем, определения и устранения «узких» мест, замены устаревших технологий и оборудования на новые энергоэффективные решения, обеспечения требований надежности теплоснабжения и управляемости систем при удовлетворении физико-технических условий их функционирования и выполнении ограничений на режимные параметры [7]. Особенность решения проблемы оптимального проектирования ТСС состоит в том, что она предполагает формирование своего алгоритма из различного состава подзадач (выбор структуры, определение оптимальных параметров, анализ надежности системы, тепловые и гидравлические расчеты, расчет параметров источников тепла и др.), индивидуального для множества рассматриваемых ТСС, с учетом их особенностей. Как правило, это сложный итерационный вычислительный процесс, в ходе которого подзадачи для различных ТСС могут решаться в разной последовательности и различными методами в зависимости от поставленной цели. Один из возможных алгоритмов решения задачи представлен на рис. 1 [7].

Рис. 1. Алгоритм решения задачи проектирования систем теплоснабжения

Методические подходы, традиционно применяемые при разработке программного обеспечения для проектирования ТСС, не позволяют реализовать разработанную в рамках ТГЦ методику решения этих задач, которая требует применения гибких схем организации

вычислительного процесса, замены элементов программной системы, учета особенностей развития конкретной ТСС и используемого для ее построения широкого спектра энергетического оборудования, многократного использования реализованного программного обеспечения и его настройки на особенности конкретного набора используемого оборудования.

Существующие подходы к разработке программного обеспечения представлены в [8, 10, 25]. Принципы разработки универсальных программных компонентов рассмотрены в [25]. В [16, 17] основное внимание уделяется общим принципам разработки сложных программных систем. Авторы [13, 18, 28, 29, 35, 36] предлагают парадигму модельно-ориентированного проектирования (MDE) для автоматизации этапов разработки программного обеспечения. Парадигма MDE представляет собой набор методических подходов к автоматизированному проектированию сложных программных систем на основе предварительно разработанных моделей. В [11, 12, 24] язык UML предлагается в качестве универсального инструмента для описания предметных областей. В настоящее время существуют подходы, которые предполагают использование онтологий в качестве инструмента для описания предметной области [19, 20, 26, 27]. Также онтологии используются для разработки программного обеспечения [1 - 3, 9, 14, 23]. Авторы [15, 22, 35] рассматривают подходы, предназначенные для автоматизации этапов разработки программного обеспечения на основе метапрограммирования. Рефлексивное программирование является одним из типов метапрограммирования. Он представляет собой расширение парадигмы объектно-ориентированного программирования [15, 22, 30]. Рефлексивное программирование позволяет проверять структуру программной системы и динамически изменять набор программных компонентов в процессе ее работы.

В настоящей статье излагается разработанный авторами методический подход к автоматизированному построению программного обеспечения для решения задач проектирования ТСС. Этот подход основан на применении парадигмы MDE. При автоматизированном построении программного обеспечения применяются современные технологии метапрограммирования и онтологии, которые позволяют формализовано описать объекты предметной области, их свойства и взаимосвязи между этими объектами [21, 31, 32].

1. Постановка задач исследования. Одна из особенностей предметной области проектирования ТСС состоит в том, что реализация программного обеспечения, предназначенного для решения этих задач, является завершающим этапом разработки методов, математических моделей элементов ТСС, методик и алгоритмов. Применение этого программного обеспечения при решении научных и практических инженерных задач приводит к накоплению опыта, который позволяет разрабатывать более точные математические модели, уточнять справочную информацию, повышать быстродействие алгоритмов, улучшать сходимость методов, получать оригинальное решение какой-либо практической задачи. Как правило, накопленный опыт фиксируется путем внесения изменений в программное обеспечение, что повышает его качество и соответствие реальным инженерным системам. Описанный подход к разработке приводит к тому, что программное обеспечение становится единственным средством хранения всего накопленного опыта. В результате этот опыт недоступен для изучения и использования широкому кругу специалистов.

В методических подходах, традиционно применяемых при построении программного обеспечения, отсутствует четкое разделение на методы (алгоритмы, методики) решения прикладных задач и математические модели элементов ТСС. В результате программные модули, реализующие алгоритмы, становятся ориентированными на конкретные классы задач и набор оборудования, что значительно затрудняет их настройку под конкретную решаемую задачу и многократное использование при построении различных программных систем. Отсутствует возможность для исследователя создавать свои модели элементов и интегрировать их в программное обеспечение при проведении научных или инженерных расчетов. Происходит многократное дублирование программной реализации одной и той же модели элемента ТСС в различных вычислительных модулях, поэтому в случае корректировки модели необходимо вносить изменения во все программные модули.

Схема взаимодействия между вычислительными модулями скрыта в программном коде управляющего модуля программной системы, что значительно затрудняет понимание и развитие алгоритма решения задачи. При возникновении необходимости любого преобразования управляющего алгоритма программной системы требуется внесение изменений в существующий управляющий модуль или создание нового. Наличие перечисленных недостатков обусловливает невозможность гибкой организации управления вычислительным процессом, необходимой при реализации методик решения задач оптимального проектирования ТСС.

Для преодоления перечисленных трудностей необходимо разработать новый методический подход к построению программного обеспечения, который позволит в автоматизированном режиме создавать сложные программные системы, ориентированные на решение прикладных задач с учетом индивидуальных особенностей моделируемых ТСС. В рамках этого подхода знания о предметной области должны быть формализованы в виде онтологий, что позволит многократно использовать их при автоматическом построении прикладных программных систем.

2. Предложенный методический подход. В результате проведенных авторами исследований предложен новый методический подход к разработке программного обеспечения на базе парадигмы MDE, который позволяет успешно преодолевать перечисленные ранее проблемы. В рамках этого подхода MDE адаптирована к особенностям методического и программного обеспечения, применяемого при решении задач проектирования ТСС: программная система строится в автоматизированном режиме на основе компьютерной модели конкретной ТСС, предварительно разработанных моделей элементов ТСС, программных компонентов, реализующих методы и алгоритмы решения прикладных задач, и знаний, формализованных в виде системы онтологий.

Предложенный подход позволяет успешно решить задачу разделения методов решения прикладных задач и моделей элементов ТСС. Для этого методы реализуются в виде программных компонентов, которые не привязаны к свойствам и моделям конкретного оборудования. Модели элементов ТСС автоматически компилируются в программные компоненты. В процессе построения программной системы выполняется динамическая интеграция программных компонентов, реализующих модели элементов ТСС и методы решения задач, что позволяет создать программную систему, ориентированную на решение конкретной прикладной задачи.

Разработанный методический подход включает:

- Методику автоматизированного построения сложных программных систем на основе применения парадигмы MDE, современных методов метапрограммирования и онтологий.
- Принципы построения системы онтологий для хранения знаний о ТСС, связанных с этими системами задачах и используемом программном обеспечении.
- Принципы построения расширяемой архитектуры программного обеспечения, ориентированного на особенности решаемой прикладной задачи.

Основные особенности разработанного методического подхода:

- методический подход ориентирован на разработку программного обеспечения для решения задач оптимального проектирования ТСС;
- модель программной системы строится автоматически на основе компьютерной модели ТСС, описания прикладной задачи и знаний, хранение которых организовано в виде системы онтологий;
- алгоритм верхнего уровня, определяющий схему взаимодействия программных компонентов и ход вычислительного процесса, строится автоматически во время построения программной системы на основе описания прикладной задачи и методики ее решения;
- привлечение современных технологий метапрограммирования предоставляет возможность автоматизированного формирования программной системы и гибкой настройки ее на особенности развития и состав оборудования конкретной ТСС.

Для автоматизированного построения программного обеспечения и информационного наполнения его пользовательского интерфейса используется система онтологий [6]. Эта система состоит из следующих онтологий.

Метаонтология. Содержит базовые понятия, которые используются при построении прикладных онтологий.

Онтология ТСС. Содержит описание элементов системы и их свойств.

Онтология задач. Содержит описание прикладных задач, методов и алгоритмов их решения, параметров, являющихся исходными данными, и параметров, получаемых в результате решения задачи.

Онтология ПО. Содержит описание программных компонентов и их свойств, метаданные (входные и выходные параметры, описание форматов данных) и описание технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам.

В качестве средства формального описания онтологий в рамках предложенного методического подхода используется предметно-ориентированный язык на базе XML. Для представления графических и математических моделей используются соответственно языки SVG и MathML, являющиеся подмножествами языка XML.

Предложенный методический подход позволяет в автоматизированном режиме создавать сложные программные системы для решения задач проектирования ТСС и решать прикладные задачи, используя разработанные в рамках ТГЦ методики, методы и алгоритмы.

3. Методика автоматизированного построения программной системы. Предложенная авторами методика автоматизированного построения программной системы состоит из следующих этапов [5].

Этап 1. Построение компьютерной модели конкретной ТСС.

На этом этапе инженером создается компьютерная модель конкретной ТСС, отражающая свойства сети: структуру, набор используемого оборудования и его свойства, параметры элементов системы (технические, гидравлические, граничные условия) [4]. Эта модель сохраняется в базе данных для многократного использования.

Этап 2. Формализация прикладной задачи.

На этом этапе происходит формальное описание прикладной задачи: задаются параметры задачи математического моделирования и оптимизации ТСС, задается набор допустимого к установке оборудования, задаются ограничения и условия решения прикладной задачи.

Этап 3. Автоматическое построение модели программной системы

На этом этапе автоматически создается модель программной системы, ориентированной на решение прикладной задачи (рис. 2). Эта модель представляет собой совокупность структур данных, описывающих свойства и структуру создаваемой прикладной системы.

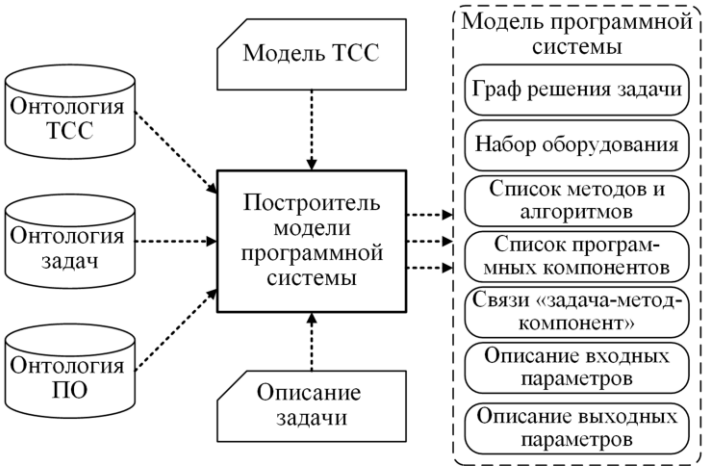


Рис. 2. Схема построения модели программной системы

Этап 4. Автоматическое построение программной системы на основе ее модели при помощи применения технологий метапрограммирования. В рамках методики используются следующие технологии: 1) автоматическая генерация программного кода; 2) динамическая компиляция программного кода; 3) рефлексивное программирование. Путем генерации программного кода и его компиляции создаются программные реализации моделей элементов ТСС. При помощи технологий рефлексивного программирования компоненты подключаются к программной системе и настраиваются на решение прикладной задачи.

Этап 5. Применение программной системы при решении прикладных задач. В результате выполнения этапов 1–4 создается программная система, представленная на рис. 3.

Программная система состоит из трех архитектурных слоев: 1) подсистема управления вычислением, которая содержит компонент супервизор, управляющий ходом вычисленного процесса на основе графа решения задачи; 2) подсистема доступа к данным, которая обеспечивает обмен информацией между базами данных (БД) и структурами данных локальной памяти при помощи загрузчика данных и рефлексивного компонента; 3) вычислительная подсистема, которая решает прикладную задачу путем использования

программных компонентов, реализующих методы и модели. Предложенная архитектура обеспечивает необходимую гибкость и адаптацию к различному составу оборудования.

4. Программный комплекс СОСНА. Предлагаемый авторами методический подход успешно применяется в ИСЭМ СО РАН при разработке программного обеспечения для решения задач проектирования ТСС. На основе этого подхода реализован программный комплекс (ПК) нового поколения СОСНА (Синтез Оптимальных Систем с учетом НАдежности) [7], предназначенный для решения сложной инженерной задачи выбора оптимальных параметров ТСС, многократно решаемой при их проектировании [4, 33, 34].

ПК СОСНА представляет собой сложную прикладную программную систему, генерируемую в автоматизированном режиме в контексте решения прикладной задачи на основе компьютерной модели исследуемой ТСС, описания решаемой задачи и знаний о предметной области. Хранение знаний о предметной области организовано в виде системы онтологий. В процессе автоматизированного построения программной системы средствами метапрограммирования используется разработанная авторами библиотека программных компонентов. Получаемая в результате система имеет архитектуру, представленную на рис. 3.

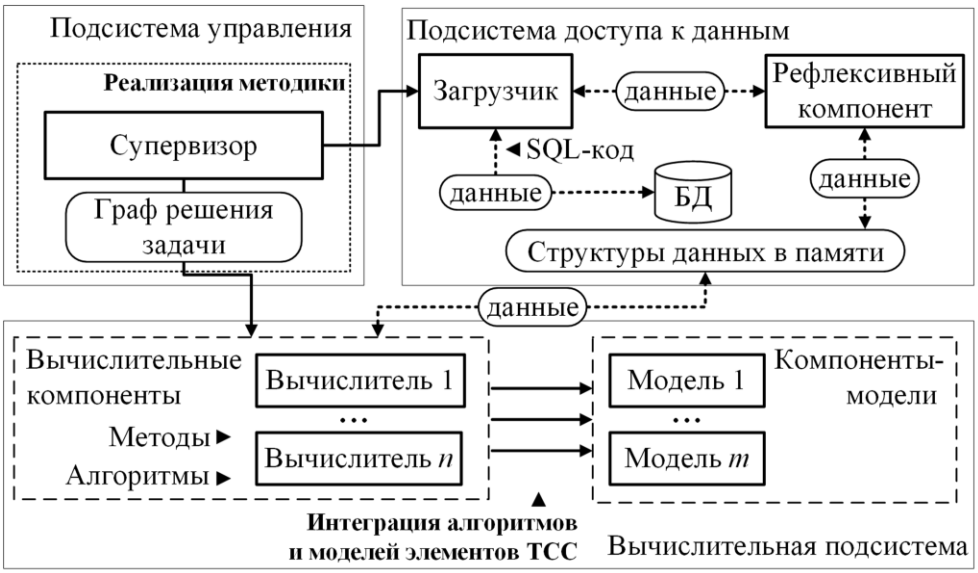


Рис. 3. Архитектура программной системы, получаемой в результате автоматического построения

С помощью ПК СОСНА проводились многовариантные расчеты достаточно сложных ТСС для решения задач их проектирования, а также выполнены научные исследования разработанных методов и алгоритмов. С помощью ПК выполнены расчеты ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга, города Братска и поселка Магистральный. На рис. 4 приведены полученные по результатам расчетов целесообразные мероприятия по реконструкции ТСС г. Братска.

Результаты проведенных расчетов были использованы при подготовке рекомендаций по оптимальной реконструкции перечисленных выше и других ТСС.

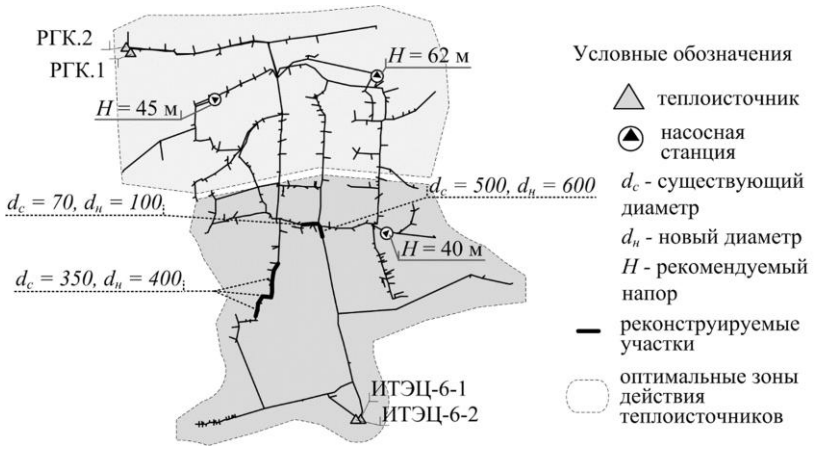


Рис. 4. Схема теплоснабжающей системы г. Братска, с обозначенными рекомендованными мероприятиями по ее реконструкции

Заключение. Предложен методический подход к разработке программного обеспечения, основанный на применении парадигмы MDE, который позволяет в автоматизированном режиме создавать сложные программные системы для решения научных и прикладных задач оптимального проектирования сложных технических систем. Применение разработанного методического подхода при реализации ПК СОСНА обеспечило создание открытой программной системы, приспособленной для развития и сопровождения. Этот подход может применяться в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся вопросами разработки программного обеспечения для проектирования ТСС. Практическое применение разработанного методического и программного обеспечения позволяет получать рекомендации по преобразованию ТСС, повышающие эффективность их работы и качество снабжения потребителей тепловой энергией.

Исследование выполнено в ИСЭМ СО РАН при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01209).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Использование онтологий при моделировании программного комплекса // Вычислительные технологии. 2008. т.13. ч.I. С. 376–381.
2. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Онтологический подход к моделированию программного комплекса // Вестник ИрГТУ. 2006. №2(26). С. 72–78.
3. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б. Онтологический подход к разработке системы поддержки принятия решении на нефтегазодобывающем предприятии // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2012. Т. 10. № 1. С. 121−128.
4. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука. 1985. 280 с.
5. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Применение концепции Model-Driven Engineering в программном комплексе для определения оптимальных параметров теплоснабжающих систем // Программная инженерия. 2016. Т. 7. № 3. С. 108−116.
6. 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. №4(14). 2014. С. 54–68.
7. Стенников В.А., Сеннова Е.В., Ощепкова Т.Б. Методы комплексной оптимизации развития теплоснабжающих систем // Энергетика. М.: Изв. РАН. 2006. №3. С. 44–54.
8. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley. 1999.
9. 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.
10. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley. 2007.
11. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 1999.
12. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide, 2nd edn. Boston: Addison-Wesley. 2005.
13. Brambilla M., Cabot J., Wimmer M. Model Driven Software Engineering in Practice. Synthesis Lectures on Software Engineering. San Rafael: Morgan & Claypool. 2012.
14. Chungoora N., Young R.I., Gunendran G., Palmer C., Usman Z., Anium N.A., Cutting-Decellec A-F., Harding J.A., Case K. A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing // Computers in Industry. 2013. Vol. 64. no 4. Pp. 392–401.
15. Forman I., Forman N. Java computection in Action. Greenwich: Manning Publications. 2005.
16. Fowler M., Parsons R. Domain-Specific Languages. Boston: Addison-Wesley. 2010.
17. Fowler M., Rice D., Foemmel M., Hieatt E., Mee R., Stafford R. Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston: Addison-Wesley. 2002.
18. Gascuena J.M., Navarro E., Fernandez-Caballero A. Model-driven engineering techniques for the development of multi-agent systems // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25. no 1. Pp. 159–173.
19. Gavrilova T., Leshcheva I. The interplay of knowledge engineering and cognitive psychology: learning ontologies creating // International Journal of Knowledge and Learning. 2015. Vol. 10. no 2. Pp. 182–197.
20. Goldman N.M. Ontology-Oriented Programming: Static Typing for the Inconsistent Programmer // The Semantic Web - ISWC 2003. ISWC 2003. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2870.
21. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. no 2. Pp. 199–220.
22. Hazzard K., Bock J. Metaprogramming in .NET. Greenwich: Manning Publications. 2012.
23. Katasonov A. Ontology-driven software engineering: beyond model checking and transformations // International Journal of Semantic Computing. 2012. Vol. 6. no 2. Pp. 205–242.
24. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, 3rd edn. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 2004.

25. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. New York: Pearson Education. 2002.
26. Pan J.Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development. Berlin: Springer-Verlag. 2013.
27. Paulheim H. Ontology-based Application Integration. New York: Springer-Verlag. 2011.
28. Schmidt D.C. Guest Editor's Introduction: Model-Driven Engineering // Computer. 2006. Vol. 39. no 2. Pp. 25–31.
29. Silva A.R. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // Computer Languages, Systems & Structures. 2015. Vol. 43. Pp. 139–155.
30. Smith B.C. Procedural Reflection in Programming Languages, PhD Thesis. Massachusetts: MIT. 1982.
31. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies, 2nd edn. Heidelberg: Springer-Verlag. 2009.
32. Staab S., Walter T., Gröner G., Parreiras F.S. Model Driven Engineering with Ontology Technologies // Reasoning Web. Semantic Technologies for Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 6325. Pp. 62–98.
33. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. Pp. 518–525.
34. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
35. Štuikys V., Damaševičius R. Meta-Programming and Model-Driven Meta-Program Development. London: Springer-Verlag. 2013.
36. Volter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S. Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management. New York: Wiley. 2006.

UDK 004.415.2

AN APPROACH TO THE SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE DESIGN OF HEAT SUPPLY SYSTEMS

Evgeny A. Barakhtenko
PhD., Senior Researcher, e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru
Dmitry V. Sokolov
PhD., Senior Researcher, e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents a new approach to the automated construction of software for solving design problems of heating systems. The approach is based on the Model-Driven Engineering paradigm. The essence of this paradigm lies in the fact that software is generated on the basis of a formal description presented by models. Knowledge of heat supply systems, applied tasks and applied software is formalized in the form of

ontologies. The automated construction of a software is carried out on the basis of a computer model of a heat supply system, ontologies and metaprogramming technologies. The proposed approach allows us to successfully solve the problem of separation of methods for solving applied tasks and models of heat supply system elements. To this end, the methods are implemented in the form of software components that are not related to the properties and models of specific equipment. And the models of heat supply system elements are automatically compiled into software components. In the process of building a software system, software components that implement models and methods are dynamically integrated. As a result, a software system oriented to the solution of a specific applied task is created in an automated mode. The developed approach was applied for the implementation of the SOSNA software. SOSNA is used to design urban heat supply systems.

Keywords: approach to the software development, Model-Driven Engineering, ontology, metaprogramming, design of heat supply systems.

References

1. Vorozhtsova T.N., Skripkin S.K. Ispol'zovanie ontologii pri modelirovanii programmnogo kompleksa [The use of ontologies in modeling software] // Vychislitel'nye tekhnologii = Computing Technology. 2008. vol. 13. part I. Pp. 376-381. (in Russian)
2. Vorozhtsova T.N., Skripkin S.K. Ontologicheskii podkhod k modelirovaniyu programmnogo kompleksa [The ontological approach to software modeling] // Vestnik IrGTU = ISTU Bulletin. 2006. No. 2(26). Pp. 72-78. (in Russian)
3. Zagorul'ko Yu.A., Zagorul'ko G.B. Ontologicheskii podkhod k razrabotke sistemy podderzhki prinyatiya reshenii na neftegazodobyvayushchem predpriyatii [Ontological approach to the development of a decision support system at an oil and gas company] // Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology. 2012. vol. 10. no. 1. Pp. 121-128. (in Russian)
4. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. Teoriya gidravlicheskikh tsepey [The theory of hydraulic circuits]. Moscow. Nauka = Science, 1985. 280 p. (in Russian)
5. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Primenenie kontseptsii Model-Driven Engineering v programmnom komplekse dlya opredeleniya optimal'nykh parametrov teplosnabzhayushchikh sistem [Model-Driven Engineering in the software for parameter optimization of heat supply systems] // Programmnaya inzheneriya = Software engineering. 2016. vol. 7. no 3. Pp. 108-116. (in Russian)
6. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Primenenie ontologii pri realizatsii kontseptsii model'no-upravlyaemoi razrabotki programmnogo obespecheniya dlya proektirovaniya teplosnabzhayushchikh sistem [Using model-driven engineering and ontologies for the development of a software for heat supply system design] // Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing. 2014. no. 4(14). Pp. 54-68. (in Russian).
7. Stennikov V.A., Sennova E.V., Oshchepkova T.B. Metody kompleksnoi optimizatsii razvitiya teplosnabzhayushchikh sistem [Methods of complex optimization for heat supply system development] // Energetika = Energy. 2006. no. 3. Pp. 44-54. (in Russian)
8. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley. 1999.

9. 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.
10. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley. 2007.
11. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 1999.
12. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide, 2nd edn. Boston: Addison-Wesley. 2005.
13. Brambilla M., Cabot J., Wimmer M. Model Driven Software Engineering in Practice. Synthesis Lectures on Software Engineering. San Rafael: Morgan & Claypool. 2012.
14. Chungoora N., Young R.I., Gunendran G., Palmer C., Usman Z., Anium N.A., Cutting-Decellec A-F., Harding J.A., Case K. A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing // Computers in Industry. 2013. Vol. 64. no 4. Pp. 392–401.
15. Forman I., Forman N. Java computection in Action. Greenwich: Manning Publications. 2005.
16. Fowler M., Parsons R. Domain-Specific Languages. Boston: Addison-Wesley. 2010.
17. Fowler M., Rice D., Foemmel M., Hieatt E., Mee R., Stafford R. Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston: Addison-Wesley. 2002.
18. Gascuena J.M., Navarro E., Fernandez-Caballero A. Model-driven engineering techniques for the development of multi-agent systems // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25. no 1. Pp. 159–173.
19. Gavrilova T., Leshcheva I. The interplay of knowledge engineering and cognitive psychology: learning ontologies creating // International Journal of Knowledge and Learning. 2015. Vol. 10. no 2. Pp. 182–197.
20. Goldman N.M. Ontology-Oriented Programming: Static Typing for the Inconsistent Programmer // The Semantic Web - ISWC 2003. ISWC 2003. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2870.
21. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. no 2. Pp. 199–220.
22. Hazzard K., Bock J. Metaprogramming in .NET. Greenwich: Manning Publications. 2012.
23. Katasonov A. Ontology-driven software engineering: beyond model checking and transformations // International Journal of Semantic Computing. 2012. Vol. 6. no 2. Pp. 205–242.
24. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, 3rd edn. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 2004.
25. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. New York: Pearson Education. 2002.
26. Pan J.Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development. Berlin: Springer-Verlag. 2013.
27. Paulheim H. Ontology-based Application Integration. New York: Springer-Verlag. 2011.

28. Schmidt D.C. Guest Editor's Introduction: Model-Driven Engineering // Computer. 2006. Vol. 39. no 2. Pp. 25–31.
29. Silva A.R. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // Computer Languages, Systems & Structures. 2015. Vol. 43. Pp. 139–155.
30. Smith B.C. Procedural Reflection in Programming Languages, PhD Thesis. Massachusetts: MIT. 1982.
31. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies, 2nd edn. Heidelberg: Springer-Verlag. 2009.
32. Staab S., Walter T., Gröner G., Parreiras F.S. Model Driven Engineering with Ontology Technologies // Reasoning Web. Semantic Technologies for Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 6325. Pp. 62–98.
33. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. Pp. 518–525.
34. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
35. Štuikys V., Damaševičius R. Meta-Programming and Model-Driven Meta-Program Development. London: Springer-Verlag. 2013.
36. Volter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S. Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management. New York: Wiley. 2006.

УДК 004.942

АЛГОРИТМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Соколов Дмитрий Витальевич
К.т.н., с.н.с., e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru
Барахтенко Евгений Алексеевич
К.т.н., с.н.с., e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

Аннотация. Определение оптимальных параметров систем теплоснабжения предполагает поиск решения, обеспечивающего наилучшую пропускную способность сети, путем замены трубопроводов и установки (модернизации) насосных станций. В этом случае мы обычно решаем сложную задачу нелинейного программирования с дискретными и непрерывными переменными. В ИСЭМ СО РАН разработаны эффективные методы ее решения. Метод, основанный на динамическом программировании, был разработан для древовидной сети. Для кольцевых сетей существует метод многоконтурной оптимизации, основанный на принципе последовательного улучшения решения. Важная особенность этих методов заключается в том, что они позволяют в полной мере учитывать свойства сложных математических моделей, определяющих особенности применяемого оборудования, способы его установки и эксплуатации. В статье представлены результаты дальнейшего развития методов решения комплексной задачи определения оптимальных параметров систем теплоснабжения. Предложены модифицированный метод и алгоритмы определения оптимальных параметров систем теплоснабжения. Предложенные метод и алгоритмы, реализованные в программном комплексе СОСНА, применяются для решения задач оптимальной реконструкции систем теплоснабжения городов и населенных пунктов.

Ключевые слова: динамическое программирование, метод многоконтурной оптимизации, многоуровневое моделирование, оптимальные параметры системы теплоснабжения, иерархическая модель системы теплоснабжения, программное обеспечение

Цитирование: Соколов Д.В., Барахтенко Е.А. Алгоритмы нового поколения для определения оптимальных параметров систем теплоснабжения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 66–78. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-06

Введение. Теплоснабжающие системы (ТСС) современных городов и промышленных центров представляют собой сложные по своей структуре и параметрам системы, снабжающие теплом множество потребителей, имеющие в своем составе разнообразное оборудование и работающие с несколькими источниками тепла различного типа. Для таких систем все актуальнее становится своевременное решение вопросов обеспечения

эффективной работоспособности ТСС, что обусловлено старением теплопроводов, оборудования и ежегодным ростом присоединенной нагрузки потребителей. Важное значение для обеспечения эффективной работоспособности ТСС имеет задача определения ее оптимальных параметров.

Определение оптимальных параметры ТСС сводится к задаче обеспечения необходимой пропускной способности этой системы. Общим подходом к решению этой задачи является ее сведение к задачам линейного программирования [4, 5, 9, 12]. Появление динамического программирования (ДП) [6] привело к значительному развитию методов решения задач, связанных с подбором оптимальных параметров [2, 5, 10]. Некоторые исследователи пытаются использовать комбинаторные методы для решения задачи оптимального проектирования трубопроводных систем [11]. В [7] авторы предлагают метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла, чтобы найти решение. Авторы [13] применяют обобщенный алгоритм приведенного градиента.

В настоящее время эвристические алгоритмы используются для разработки различных подходов к оптимальному проектированию трубопроводных систем [14, 15, 17]. Авторы [8] для решения задачи предлагают метод имитации отжига.

В России метод многоконтурной оптимизации (МКО) используется для определения оптимальных параметров кольцевых ТСС. Этот метод основан на принципе последовательного улучшения решения [3, 2], он получил дальнейшее развитие в [19, 21, 22]. Проектирование ТСС предполагает применение методов гидравлических и тепловых расчетов, которые рассмотрены в [16, 18, 20, 23].

Важная особенность перечисленных методов ДП и МКО состоит в том, что они позволяют:

- учесть все особенности используемого оборудования, способов его сооружения и эксплуатации;
- использовать сложные нелинейные математические модели;
- гибко настраивать вычислительную процедуру к конкретным особенностям моделируемой системы.

Решение задачи определения оптимальных параметров предполагает рассмотрение сетей реальных размеров и сложности, которая связана с их замкнутыми двухлинейными схемами, многокольцевой структурой, наличием множества теплоисточников, управляющих элементов (насосных и дроссельных станций, регуляторов, тепловых пунктов) и большим количеством трубопроводов. В результате расчет реальных сетей становится невыполнимым за приемлемое время.

Средством преодоления перечисленных трудностей является применение подходов, основанных на декомпозиции расчетных схем ТСС. Декомпозиция является частью методологии многоуровневого моделирования, которая предлагает при решении задач большой размерности перейти от исходной сложной задачи к иерархически связанному набору задач меньшей размерности и сложности. Эта методология успешно применяется при решении задач развития систем газоснабжения [1] и расчета теплогидравлических режимов в ТСС [24].

Для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС необходимо разработать новый методический подход и выполнить развитие существующих методов и алгоритмов, которые позволят решать задачи реальной размерности при помощи

многоуровневой декомпозиции расчетной схемы ТСС и обеспечат получение работоспособного решения в двухлинейных тепловых сетях.

В настоящей статье представлены новые наиболее значимые результаты в развитии методического и программного обеспечения для определения оптимальных параметров сложных ТСС:

1) модифицированный метод МКО, позволяющий путем декомпозиции модели тепловой сети значительно снизить продолжительность итерационного вычислительного процесса;

2) методический подход к решению задачи определения оптимальных параметров ТСС, в котором на основе многоуровневого моделирования исходная задача сводится к связанному набору задач меньшей размерности и сложности;

3) программный комплекс нового поколения СОСНА, предназначенный для определения оптимальных параметров сложных ТСС.

1. Постановка задачи определения оптимальных параметров. Заданной является расчетная (проектная) схема ТСС, состоящая из m узлов и n ветвей и представляемая в виде ориентированного графа $G_{\text{DHS}} = (J, I)$, где $J = J_{\text{C}} \cup J_{\text{S}} \cup J_{\text{B}}$ – множество вершин (узлов), включающее множество потребителей J_{C}, источников J_{S} и точек разветвления на схеме J_{B}; $I = I_{\text{N}} \cup I_{\text{E}}$ – множество дуг (ветвей), состоящее из множеств существующих I_{E} и новых (проектируемых) I_{N} ветвей; $I_{\text{PS}} \subset I$ – ветви, на которых установлены или разрешаются насосные станции. Для всех ветвей заданными являются длины L_i ($i \in I$).

В процессе решения задачи требуется минимизировать функцию общих затрат в ТСС, имеющую следующий вид:

$$F(\mathbf{d}, \mathbf{H}, \mathbf{x}, \mathbf{P}) = \sum_{i \in I} F_i^{\text{P}}(d_i) + \sum_{i \in I_{\text{PS}}} F_i^{\text{PS}}(H_i, x_i) + \\ + \sum_{i \in I} F_i^{\text{E}}(x_i, d_i) + \sum_{j \in J_{\text{C}}} F_j^{\text{C}}(P_j), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \quad \mathbf{P} \in \mathbf{R}^m, \tag{1}$$

где F_i^{P} – затраты на сооружение и эксплуатацию трубопровода; F_i^{PS} – затраты на сооружение и эксплуатацию насосной станции; F_i^{E} и F_j^{C} – затраты соответственно на электроэнергию, расходуемую на перекачку транспортируемой среды и на ее подачу потребителю; $\mathbf{d}$ – n-мерный вектор диаметров трубопроводов; $\mathbf{H}$ – n-мерный вектор напоров на насосных станциях; $\mathbf{x}$ – вектор расходов транспортируемой среды на ветвях сети; $\mathbf{P}$ – вектор давлений в узлах сети.

Модель потокораспределения в ТСС имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{G}, \quad \mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}, \quad \mathbf{G} \in \mathbf{R}^m, \tag{2}$$

$$\mathbf{A}^{\text{T}}\mathbf{P} + \mathbf{H} = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{x}), \tag{3}$$

где $\mathbf{A}$ – матрица инцидентности расчетной схемы; $\mathbf{G}$ – вектор узловых отборов и притоков транспортируемой среды; $\mathbf{f}$ – n-мерная вектор-функция с элементами $f_i(s_i(d_i), x_i) = s_i(d_i) x_i |x_i|$, $i \in I$, отражающими закон падения давления на ветви сети, $s_i(d_i)$ – гидравлическое сопротивление трубопровода.

Система ограничений включает следующие составляющие:

$$P_j^{\min} \le P_j \le P_j^{\max},\ j \in J;\tag{4}$$

$$d_i \in D,\ i \in I;\tag{5}$$

$$H_i \in H_{\mathrm{S}},\ i \in I_{\mathrm{PS}};\tag{6}$$

$$v_i^{\min} \le v_i \le v_i^{\max},\ i \in I;\tag{7}$$

где $P_j^{\min}$ и $P_j^{\max}$ – нижнее и верхнее ограничения на давление; D – множество диаметров стандартных трубопроводов; H_{S} – множество напоров доступных к установке насосных станций; $v_i^{\min}$ и $v_i^{\max}$ – нижнее и верхнее ограничения на скорость течения теплоносителя v_i, определяемой по формуле:

$$v_i = v_i(x_i, d_i) = \frac{4x_i}{3600\rho\pi d_i^2},\quad i \in I_{\mathrm{p}},$$

где ρ – плотность теплоносителя.

В результате решения задачи минимизации функции (1) при ограничениях (2) – (7) необходимо определить оптимальные параметры ТСС.

2. Методы решения задачи определения оптимальных параметров теплоснабжающих систем. В работе для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС выбраны методы, разработанные в ИСЭМ СО РАН в рамках теории гидравлических цепей (ТГЦ). Это методы МКО, динамического программирования и расчета потокораспределения. Приведем описание перечисленных методов.

Метод ДП. Идея метода решения задачи определения оптимальных параметров ТСС на основе динамического программирования состоит в многошаговом процессе определения параметров элементов сети (участков и узлов) путем их последовательного подбора для каждого элемента сети при движении от потребителей к источнику. В разветвленных ТСС, имеющих в однолинейном рассмотрении конфигурацию в виде дерева, вектор расходов на ветвях **x** однозначно определяется древовидной структурой и вектором узловых отборов и притоков теплоносителя **G**. При древовидной конфигурации сети и фиксированных расходах на ее ветвях целевая функция (1) является аддитивной, что позволяет применять ДП для решения задачи определения оптимальных параметров разветвленных ТСС.

Расчет оптимальных параметров всей тепловой сети методом ДП выполняется в соответствии со следующими этапами.

Этап 1. Организация «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных решений на участках и в узлах сети. Расчет производится в направлении от потребителей к источнику (источникам) путем определения условно-оптимальных параметров.

Этап 2. Определение оптимального в целом для системы решения: а) определение варианта, соответствующего оптимальному решению; б) определение значения целевой функции, соответствующего оптимальному варианту.

Этап 3. Организация «обратного хода» метода ДП для определения составляющих затрат для найденного по системе решения.

На *этапе 1* вычислительного процесса ДП область поиска решения, образуемая между верхними ($P_j^{\max}$, $j=\overline{1,m}$) и нижними ($P_j^{\min}$, $j=\overline{1,m}$) ограничениями на давления в узлах сети, разбивается на n интервалов, каждый из которых соответствует определенному участку сети. Участки сети нумеруются таким образом, чтобы номер шага i ($i=\overline{1,n}$) процесса оптимизации соответствовал номеру i участка. С целью уменьшить количество рассматриваемых комбинаций диаметров d_i и напоров H_i область поиска решения для каждого участка сети разбивается на некоторое количество интервалов μ, которое определяет точность получаемого решения задачи. Таким образом образуется μ ячеек для участка и $n\mu$ ячеек для всей сети.

Затраты на шаге i оптимизации в ячейке z вычисляются с помощью рекуррентного уравнения

$$Z_{iz}(P_{jz}) = \min_{\substack{d_{iz}\in D \\ H_{iz}\in H_S \\ k=1,\ldots,\mu \\ P_{jz}=P_{j+1,k}++h_i(s_i(d_{iz}),x_i)-H_{iz}}} [Z_{iz}^{\text{sum}}(d_{iz}) + Z_{iz}^{\text{PS}}(H_{iz}) + Z_{i-1,k}(P_{j+1,k})], \qquad (8)$$

где Z_{iz} – сумма затрат, состоящая из стоимости трубопровода, насосных станций и затрат предыдущих шагов; P_{jz} – давление в узле j ячейки z; $P_{j+1,k}$ – давление в узле $j+1$ ячейки k; d_{iz} и H_{iz} – диаметр трубопровода и напор насосной станции, которые «запомнятся» в ячейке z; x_i – расход на ветви, определяемый древовидной конфигурацией сети; Z_{iz}^{sum} – суммарные затраты на трубопровод.

В результате в ячейке z запоминается комбинация с минимальной суммой затрат $Z_{iz}(P_{jz})$ в соответствии с (8).

За n шагов работы алгоритма все ячейки области поиска решения последовательно заполняются для всей сети. В результате образуются непрерывные траектории пьезометрических графиков, отражающие изменение давления от источников к потребителям.

Метод МКО. Определение оптимальных параметров кольцевых ТСС осуществляется с помощью метода многоконтурной оптимизации. В основе метода лежит принцип последовательного улучшения решений. При этом в рассматриваемой задаче выделяют две подзадачи:

1. Определение оптимальных параметров (векторов диаметров $\mathbf{d}$, напоров $\mathbf{H}$ и давлений $\mathbf{P}$) методом ДП для вектора фиксированных расходов $\mathbf{x}$.

2. Расчет потокораспределения в сети (векторов расходов $\mathbf{x}$ и давлений $\mathbf{P}$) при фиксированных векторах диаметров $\mathbf{d}$ и напоров $\mathbf{H}$.

Идея метода МКО состоит в организации итерационного вычислительного процесса последовательного улучшения параметров ТСС, в ходе которого попеременно решаются перечисленные подзадачи. Критерием остановки вычислительного процесса является прекращение уменьшения целевой функции.

Метод ДП позволяет находить решение только для сетей, имеющих разветвленную (древовидную) конфигурацию. Для обеспечения возможности применение этого метода схема кольцевой сети «разрезается» в точках схода потоков. В результате схема сети

трансформируется в дерево, для которого корректно может быть выполнена оптимизация методом ДП.

3. Модифицированный метод многоконтурной оптимизации. Реальные крупные ТСС городов и населенных пунктов, как правило, состоят из сетей, имеющих как кольцевую часть, так и древовидные (тупиковые) ответвления. На рис. 1 представлена схема сети, обладающая такой конфигурацией. В соответствии с постановкой задачи определения оптимальных параметров ТСС проектные узловые отборы и притоки являются заданными, что однозначно определяет расходы на ветвях, принадлежащих тупиковым ответвлениям. При решении задачи определения оптимальных параметров методом МКО динамическое программирование на каждой итерации вычислительного процесса МКО в тупиковых ответвлениях подбирает одни и те же условно-оптимальные параметры. Это свойство приводит к идее о том, что в тупиковых ответвлениях условно-оптимальные варианты могут быть определены один раз и многократно использованы в итерационном процессе МКО при определении параметров кольцевой части сети. Для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС разработан модифицированный метод МКО, учитывающий эту особенность вычислительного процесса.

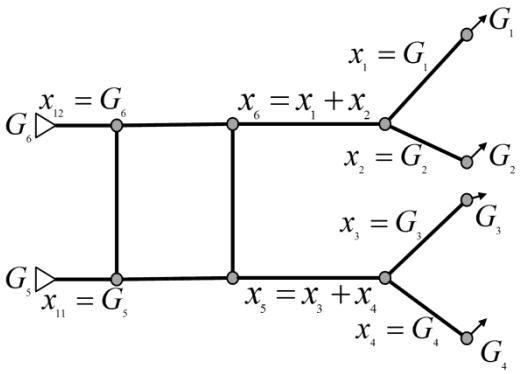


Рис. 1. Схема теплоснабжающей системы с кольцевой частью и тупиковыми ответвлениями

Алгоритм 1 (*Алгоритм модифицированного метода МКО*)

1. Формирование множества J_{L} узлов на схеме, в которых есть инцидентные участки, принадлежащие как кольцевой части сети, так и тупиковым ответвлениям.
2. Расчет начального потокораспределения в кольцевой части сети и в тупиковых ответвлениях.
3. Выполнение «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных вариантов параметров всех тупиковых ответвлений.
4. Перенос давлений и стоимостей условно-оптимальных вариантов, полученных на уровне тупиковых ответвлений, на уровень кольцевых сетей для всех узлов $j \in J_{\text{L}}$.
5. Выполнение «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных вариантов параметров кольцевой части сети, при этом в узлах $j \in J_{\text{L}}$ «увязываются» давления и затраты кольцевой части и тупиковых ответвлений.
6. Выбор в источнике с наибольшей производительностью варианта, соответствующего решению с наименьшей стоимостью затрат.

7. Выполнение «обратного хода» метода ДП для восстановления параметров и составляющих затрат кольцевой и тупиковых частей сети.
8. Расчет потокораспределения в кольцевой части сети и в тупиковых ответвлениях.
9. Если критерии завершения вычислительного процесса не достигнуты, то выполняется переход к шагу 5.

На шаге 5 алгоритма для применения метода ДП кольцевая часть сети трансформируется в дерево в соответствии с изложенными ранее принципами МКО.

Условно-оптимальные решения, полученные в узлах присоединения тупиковых ответвлений к кольцевой части сети, «стыкуются» с результатами кольцевой части во время вычислительного процесса МКО. При этом используется следующий принцип. Если узел j является начальным как для участков кольцевой части, так и для участков тупиковых ответвлений, то в ячейках этого узла происходит «увязка» давлений и суммирование затрат. Обозначим $J^{(i)}$ множество узлов, давления в которых необходимо «увязать» в узле j на шаге i вычислительного процесса. «Увязка» давлений осуществляется в соответствии с выражением

$$P^*_{jz} = \max_{k \in J^{(i)}} P_{kz}, \ z = 1, \ldots, \mu,$$

где P^*_{jz} – значение давления, которое запомнится в узле j ячейки z.

Обозначим $I^{(i)}$ множество всех исходящих из узла j участков, затраты по которым необходимо учесть на шаге i вычислительного процесса. Суммирование затрат происходит в соответствии с выражением

$$Z^*_{iz} = \sum_{r \in I^{(i)}} Z_{rz}, \ z = 1, \ldots, \mu,$$

где Z^*_{iz} – сумма затрат, которая запомнится на шаге i вычислительного процесса в ячейке z.

Основная особенность предложенного алгоритма состоит в том, что для тупиковых ответвлений «прямой ход» ДП выполняется только один раз, а во время итерационного процесса МКО определение параметров выполняется только для кольцевой части сети. При этом решения кольцевой части и тупиковых ответвлений «увязываются» в соответствии с указанными ранее принципами.

4. Результаты практического применения. Предложенные методы и алгоритмы, реализованные в программном комплексе СОСНА, применяются на практике для решения задач оптимальной реконструкции ТСС городов и населенных пунктов. Одной из рассчитанных систем является модель ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга, которая в укрупненном виде представлена на рис. 2. Отпуск тепла осуществляется от пяти централизованных теплоисточников по магистральным и распределительным двухтрубным тепловым сетям. Двухлинейная модель тепловой сети ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга содержит 3238 участков и 3186 узлов подающей и обратной магистралей. В результате применения разработанного авторами методического подхода исходная задача сведена к иерархически связанному набору подзадач определения оптимальных параметров многоконтурных и разветвленных сетей меньшей размерности и сложности. Кольцевые части подающей и обратной магистралей, полученные при многоуровневой декомпозиции модели сети, содержат по 537 участков. Определение оптимальных параметров каждой из этих кольцевых частей

представляет собой подзадачу, размерность которой составляет только 16.6% от исходной задачи.

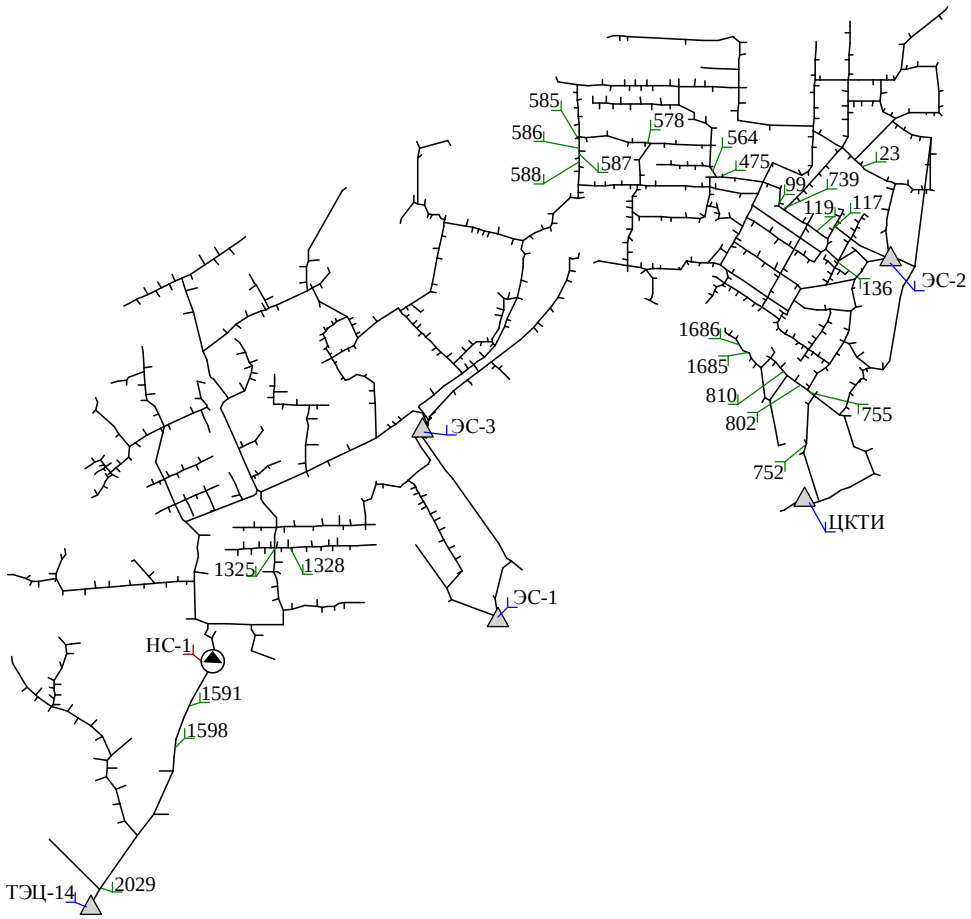


Рис. 2. Схема теплоснабжающей системы Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга

На схеме (рис. 2) отмечены участки сети с недостаточной пропускной способностью, для которых требуется увеличение диаметров трубопроводов. Для этих участков были определены следующие оптимальные параметры: диаметры трубопроводов, расходы теплоносителя, удельные падения давлений и скорости течения теплоносителя.

До реконструкции ТСС в ней работала насосная станция НС-1 (см. рис. 2) с действующими насосами на подающей и обратной магистралях сети. Рекомендации по реконструкции участков ТСС, полученные в результате выполненных расчетов, обеспечили достаточную пропускную способность сети и позволили получить решение без работающего на подающей линии насоса.

Реализованные в программном комплексе СОСНА алгоритмы, использующие многоуровневую декомпозицию модели тепловой сети, обеспечили получение решения задачи за 6 с. Алгоритм, применявшийся ранее в ИСЭМ СО РАН для решения задач определения оптимальных параметров ТСС, нашел решение задачи за 175 с. Результаты расчетов, полученные с помощью этих алгоритмов программных комплексов предыдущей и новой версий, приведены в табл. 1. В ней представлены значения приведенных затрат в ТСС и капиталовложений, необходимых для реконструкции тепловой сети. Значения целевой функции приведенных суммарных затрат в систему для программного комплекса предыдущей и новой версий совпадают. Таким образом, проведенные расчеты показали, что

предлагаемые в статье методы и алгоритмы позволяют получать результаты, аналогичные результатам, получаемым при помощи традиционных методов. При этом время решения задачи существенно меньше.

Таблица 1. Затраты и капиталовложения в тепловую сеть

Магистраль	**Приведенные затраты, млн. руб./год**	**Капиталовложения, млн. руб.**
МКО		
Обратная	793,36	637,55
Подающая	859,51	637,55
Итого	1652,86	1275,09
Модифицированный МКО		
Обратная	793,36	637,55
Подающая	859,51	637,55
Итого	1652,86	1275,09

Заключение. В статье представлены результаты дальнейшего развития методов для решения сложной задачи определения оптимальных параметров ТСС. Предложен модифицированный метод МКО, позволяющий эффективно решать задачи оптимизации кольцевых систем за счет декомпозиции их моделей на кольцевую часть и тупиковые ответвления. Разработан методический подход к решению задачи определения оптимальных параметров ТСС на основе многоуровневого моделирования, который позволяет перейти от исходной сложной задачи к иерархически связанному множеству подзадач, каждая из которых обладает меньшей размерностью и сложностью в сравнении с исходной задачей. Предложенные методические разработки реализованы в программном комплексе СОСНА. Этот программный комплекс может применяться в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях, занимающихся вопросами развития и реконструкции теплоснабжающих систем.

Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет решать практические задачи определения оптимальных параметров многоконтурных ТСС большой (реальной) размерности и применяется при решении практических задач оптимального их развития и реконструкции.

Исследование выполнено в ИСЭМ СО РАН при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01209).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илькевич Н.И., Меренков А.П. Многоуровневое моделирование и согласование задач развития систем газоснабжения // Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях. Новосибирск: Наука. 1995. С. 41–45.
2. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука. 1985. 280 с.
3. Сумароков С.В. Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи // Экономика и мат. методы. 1976. Т.12. №5. С. 1016–1018.
4. Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems, Water Resour. Res., vol. 13. 1977. Pp. 885–900.

5. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // Build. Serv. Eng., vol. 45. 1978. Pp. 191–204.
6. Bellman R.E. Dynamic programming. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1957.
7. Chiplunkar A., Mehndiratta S., Khanna P. Looped water distribution system optimization for single loading // J. Env. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 112. 1986. Pp. 264–279.
8. Cunha M., Sousa J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach // J. Water Res. Plan. Manage. Div. Soc. Civ. Eng., vol. 125. 1999. Pp. 215–221.
9. Eiger G., Shamir U., Ben-Tal A. Optimal design of water distribution networks // Water Resour. Res., vol. 30. 1994. Pp. 2637−2646.
10. Garbai L., Mobnâr L. Optimization of urban public utility networks by discrete dynamic programming // Colloq. math, societatic Janos Bolyai., vol. 12. 1974. Pp. 373–390.
11. Gessler J. Optimization of pipe networks // Proc. of the Ninth International symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Lexington: University of Kentucky, 1982.
12. Goulter I. Systems analysis in water distribution system design: from theory to practice // J. Water. Res. Plan. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol.118. 1992. Pp. 238–248.
13. Lansey K., Mays L. Water distribution system design under uncertainties // J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 115. 1989. Pp. 1401–1418.
14. McClymont K., Keedwell E., Savic D. An analysis of the interface between evolutionary algorithm operators and problem features for water resources problems. A case study in water distribution network design // Environ Modell Softw, vol. 69. 2015. Pp. 414–424.
15. Nicklow J. W., Reed P. M., Savic D., Dessalegne T., Harrell L., Chan-Hilton A., Karamouz M., Minsker B., Ostfeld A., Singh A., Zechman E. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management // J. Water Res. Plan. Man., vol. 136. 2010. Pp. 412–432.
16. Novitskii N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords // Therm. Eng., vol. 60. 2013. Pp. 1051–1060.
17. Savic D., Walters G., Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks // J. Water Resour. Plann. Manag., vol. 123. 1997. Pp. 67–77.
18. Shamir U., Howard C.D.D. Water distribution network analysis // J. Hydraul. Div. ASCE, vol. 94. 1968. Pp. 219–234.
19. Sokolov D., Stennikov V., Oshchepkova T., Barakhtenko E. The new generation of the software system used for the schematic-parametric optimization of multiple-circuit heat supply systems // Therm. Eng., vol. 59. 2012. Pp. 337–343.
20. Martin D.W., Peters G. The application of Newton's method to network analysis by digital computers // IWES J., vol. 17. 1963. Pp. 115–129.
21. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., and Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // Therm. Eng., vol. 64. 2017. Pp. 518–525.

23. Todini E., Pilati S. A gradient method for the solution of looped pipe networks // Computer applications in water supply. vol. 1. 1988. Pp. 1–20.
24. Tokarev V., Shalaginova Z. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages // Therm. Eng., vol. 63. no 1. 2016. Pp. 68–77.

UDK 004.942

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF HEAT SUPPLY SYSTEMS

Dmitry V. Sokolov
PhD., Senior Researcher, e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru
Evgeny A. Barakhtenko
PhD., Senior Researcher, e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Determining the optimal parameters of heat supply systems involves finding a solution that provides the best network capacity by replacing pipelines and installing (upgrading) pumping stations. In this case, we usually solve the complex problem of nonlinear programming with discrete and continuous variables. The ESI SB RAS has developed effective methods for its solution. A method based on dynamic programming was developed for a tree-like network. For ring networks, there is a multi-loop optimization method based on the principle of sequential improvement of the solution. An important feature of these methods is that they allow you to fully take into account the properties of complex mathematical models that determine the features of the equipment used, methods of its installation and operation. The paper presents the results of the further development of algorithms for solving the complex problem of determining the optimal parameters of heat supply systems. A modified method and algorithms for determining the optimal parameters of heating systems are proposed. The proposed method and algorithms implemented in the SOSNA software. SOSNA is used to solve problems of optimal reconstruction of heat supply systems of cities.

Keywords: dynamic programming, multi-loop optimization method, multi-level modeling, optimal parameters of the heat supply system, hierarchical model of the heat supply system, software

References

1. Ilkevich N., Merenkov A. Mnogourovnevoe modelirovanie i soglasovanie zadach razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multilevel modeling and coordination of tasks for the development of gas supply systems] // Metody upravleniya fiziko-tekhnicheskimi sistemami energetiki v novykh usloviyakh [Methods for control of physical-technical energy systems under new conditions]. Novosibirsk. Nauka = Science. 1995. Pp. 41–45. (in Russian)

2. Merenkov A., Khasilev V. Teoriya gidravlicheskikh tsepei [The Theory of Hydraulic Circuits. Moscow], Moscow. Nauka = Science. 1985. 280 p. (in Russian)
3. Sumarokov S. Metod resheniya mnogoekstremal'noi setevoi zadachi [A method of solving the multiextremal network problem] // Ekonomika i matematicheskie metody = Economy and math. methods. 1976. vol. 12. Pp. 1016–1018. (in Russian)
4. Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems, Water Resour. Res., vol. 13. 1977. Pp. 885–900.
5. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // Build. Serv. Eng., vol. 45. 1978. Pp. 191–204.
6. Bellman R.E. Dynamic programming. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1957.
7. Chiplunkar A., Mehndiratta S., Khanna P. Looped water distribution system optimization for single loading // J. Env. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 112. 1986. Pp. 264–279.
8. Cunha M., Sousa J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach // J. Water Res. Plan. Manage. Div. Soc. Civ. Eng., vol. 125. 1999. Pp. 215–221.
9. Eiger G., Shamir U., Ben-Tal A. Optimal design of water distribution networks // Water Resour. Res., vol. 30. 1994. Pp. 2637–2646.
10. Garbai L., Mobnâr L. Optimization of urban public utility networks by discrete dynamic programming // Colloq. math, societatic Janos Bolyai., vol. 12. 1974. Pp. 373–390.
11. Gessler J. Optimization of pipe networks // Proc. of the Ninth International symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Lexington: University of Kentucky, 1982.
12. Goulter I. Systems analysis in water distribution system design: from theory to practice // J. Water. Res. Plan. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol.118. 1992. Pp. 238–248.
13. Lansey K., Mays L. Water distribution system design under uncertainties // J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 115. 1989. Pp. 1401–1418.
14. McClymont K., Keedwell E., Savic D. An analysis of the interface between evolutionary algorithm operators and problem features for water resources problems. A case study in water distribution network design // Environ Modell Softw, vol. 69. 2015. Pp. 414–424.
15. Nicklow J. W., Reed P. M., Savic D., Dessalegne T., Harrell L., Chan-Hilton A., Karamouz M., Minsker B., Ostfeld A., Singh A., Zechman E. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management // J. Water Res. Plan. Man., vol. 136. 2010. Pp. 412–432.
16. Novitskii N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords // Therm. Eng., vol. 60. 2013. Pp. 1051–1060.
17. Savic D., Walters G., Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks // J. Water Resour. Plann. Manag., vol. 123. 1997. Pp. 67–77.
18. Shamir U., Howard C.D.D. Water distribution network analysis // J. Hydraul. Div. ASCE, vol. 94. 1968. Pp. 219–234.
19. Sokolov D., Stennikov V., Oshchepkova T., Barakhtenko E. The new generation of the software system used for the schematic-parametric optimization of multiple-circuit heat supply systems // Therm. Eng., vol. 59. 2012. Pp. 337–343.
20. Martin D.W., Peters G. The application of Newton's method to network analysis by digital computers // IWES J., vol. 17. 1963. Pp. 115–129.

21. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., and Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // Therm. Eng., vol. 64. 2017. Pp. 518–525.
23. Todini E., Pilati S. A gradient method for the solution of looped pipe networks // Computer applications in water supply. vol. 1. 1988. Pp. 1–20.
24. Tokarev V., Shalaginova Z. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages // Therm. Eng., vol. 63. no 1. 2016. Pp. 68–77.

УДК 004.421+004.4’2+004.771

УПРАВЛЕНИЕ КОНВЕЙЕРНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КАЧЕСТВЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДВОИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА БУЛЕВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Опарин Геннадий Анатольевич
Д.т.н., проф., зам. директора, e-mail: prn51@icc.ru
Богданова Вера Геннадьевна
К.т.н., доцент, с.н.с., e-mail: bvg@icc.ru
Пашинин Антон Алексеевич
М.н.с., e-mail: apcrol@gmail.com
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН),
664033 г. Иркутск ул. Лермонтова, 134

Аннотация. Рассматриваются средства управления вычислениями в пакете прикладных микросервисов, ориентированном на применение при решении задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений. Вычислительная модель предметной области и архитектура агента обеспечивают возможность проведения многовариантных, параллельных и конвейерно-параллельных вычислений на выделенных ресурсах. Предложенный подход демонстрируется на примере анализа структуры пространства состояний сдвигового регистра.

Ключевые слова: пакет прикладных микросервисов, микросервис, управление вычислениями, конвейер, двоичные динамические системы.

Цитирование: Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Управление конвейерно-параллельными вычислениями при решении задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 79–90. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-07

Введение. В последние годы большую значимость приобрели вопросы автоматизации расчетных работ в области исследования динамики и структурно-параметрического синтеза систем управления с целью определения как совокупности требований к динамическим показателям функционирования, так и набора требуемых динамических свойств, которым должно отвечать поведение системы [17]. По сути дела, речь идет о формировании динамического облика системы управления и связанного с этой задачей комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на уровне математических моделей, аналитических и численных методов их исследования. Процесс исследования динамики систем управления представляет собой последовательность многовариантных расчетов, на каждом шаге которой варьируются структура и значения параметров модели, методов и методик, выполняются запланированные расчеты, проводится оценка результатов и принимается решение о дальнейшем направлении исследований. Автоматизация высокопроизводительных научных вычислений при проведении исследований в приведенных выше предметных областях выполняется на основе разработанной ранее технологии HPCATAMP (High Performance

Computing Automated Technology for Implementation of Applied Microservices Package) [16], в которой фундаментальную роль играет алгоритмическое знание и сборочное программирование. Под сборочным программированием имеется ввиду стиль программирования, при котором для решения задачи собирается на основе механизмов самоорганизации ансамбль готовых к использованию программных компонентов, запуск которых инициирует возникновение события. Используется децентрализованная дискретно-событийная модель вычислений. Первичным понятием в этой технологии является понятие пакета прикладных программ (ППП). Согласно модульному принципу, функциональное наполнение ППП является набором базисных, сравнительно простых, автономных вычислительных модулей, композицией которых можно получить решение всех задач рассматриваемого класса. Для реализации ППП на основе облачной парадигмы вычислений хорошо подходит технология микросервисов. Распределенная микросервисная модель представлена набором небольших, слабо связанных, заменяемых, взаимодействующих с использованием легковесных механизмов коммуникации автономных микросервисов, реализующих функции компонентов (модулей) приложения [15]. Реализованный на основе микросервисов ППП далее будем называть пакетом прикладных микросервисов (Applied Microservices Package, AMP). Целью исследований является разработка инфраструктуры (системной инструментальной программной среды) автоматизации разработки и применения AMP для исследования динамики и параметрического синтеза динамических систем управления, в частности, двоичных динамических систем (ДДС), на основе метода булевых ограничений [6]. Основное внимание в настоящей работе уделено средствам управления вычислениями в AMP. Развитие исследований, представленных в [1, 2], в направлении повышения отказоустойчивости, а также обработки потока однородных и разнородных задач обеспечило возможность поддержки конвейерно-параллельных вычислений при проведении многовариантных расчетов.

В последнее десятилетие применение конвейерного параллелизма для решения вычислительно сложных задач привлекает значительное внимание [4, 7, 11, 13]. В [14] описан ряд подходов, связанных с распределением ступеней конвейера по потокам многоядерных процессоров и на GPU, отмечается недостаток этих подходов, связанный с плохой балансировкой загрузки. В работе [10] рассматриваются все аспекты разработки бизнес-приложений на основе модели конвейера для многоядерной архитектуры, отмечается хорошая масштабируемость таких приложений и максимизация использования ресурсов. В более современной работе [9] представлена в первом приближении сервис-ориентированная архитектура распределенной интерфейсной системы для автономной обработки конвейера для решения задач биоинформатики. Во всех перечисленных системах требуется явно описать ступени конвейера программным способом. В разработанном авторами AMP BDSQA-BCM (Binary Dynamic System Qualitative Analysis based on Boolean Constraint Method) для решения задач качественного анализа ДДС на основе метода булевых ограничений конвейерные вычисления возникают в процессе решения задачи, поставленной непроцедурным способом. В результате логического вывода по непроцедурной постановке задачи (НПЗ) на распределенной модели предметной области (ПО) формируется активная группа агентов (Active Group, AG) для ее решения, взаимодействие которых определяется отношениями предшествования/следования (по входным/выходным параметрам, *In*/*Out*), заданным в локальных базах знаний. Для ряда задач может самоорганизовываться

асинхронный линейный конвейер [5]. При многовариантных расчетах разные ступени конвейера выполняются параллельно на выделенных ресурсах вычислительного поля (ВП) [1], на котором разворачивается семантическая сеть агентов.

1. Модель предметной области. Основным для интеллектуальных АМР является наличие модели предметной области (ПО), под которой понимается совокупность сведений об объектах ПО и отношениях между ними, а также возможность НПЗ: «по известным значениям объектов с именами a_1, a_2, …, a_k вычислить значения объектов с именами b_1, b_2, …, b_n». Обозначим такую НПЗ как $T = (A^0; B^0; D(A^0))$, или кратко $T = (A^0; B^0)$, где $A^0 = \{a_1, a_2, \ldots, a_k\}$, $B^0 = \{b_1, b_2, \ldots, b_n\}$, $D(A^0)$ – значения параметров из множества A^0. В качестве базы знаний (БЗ) используется модифицированная (расширены состав объектов и множество отношений между объектами ПО в сравнении с ранее разработанной и представленной в [2] моделью КВЕ) вычислительная модель

$$\text{КВМ} = (P, D, M, N, C, O, In, Out, Opm, Opp, Pr, Cmp, Cmo, Com),$$

где P, D, M, N, C, O – конечные множества соответственно параметров, значений параметров, модулей, узлов ВП, процессоров и операций, а отношения $In \subset P \times M$, $Out \subset M \times P$, $Opm \subset O \times M$, $Opp \subset O \times P$, $Pr \subset L \times O$ ($L \times P$), $Cmp \subset C \times P$, $Cmo \subset C \times O$, $Com \subset M \times N$ определяют взаимосвязи между соответствующими множествами и имеют тип “многие-ко-многим”. Отображение приведенных выше объектов в объекты АМР BDSQA-BCM приведено в таблице 1.

Таблица 1. Отображение объектов ПО в объекты BDSQA-BCM

ПО	**BDSQA-BCM**
Формальный параметр	Словарь параметров ПО
Операция простая/условная	Агент DSA Ordinary/Conditional
Модуль	Агент CMA (Computational Module Agent)
Процессор	Объект агента PSA (Problem Statement Agent)
Фрагменты отношений *In*, *Out*, *Fpm*, *Pr* и *Opm*	локальные базы знаний КВМ^{DSA}
Отношения *Com* и *Cmp*	КВМ^{PSA}
Непроцедурная постановка задачи	Web-интерфейс агента PSA
Фактический параметр	Расчетные базы данных

2. Организация управления вычислениями. Управление вычислениями в АМР основано на принципах, которые лежат в основе разработанных авторами распределенных решателей прикладных задач [2]. В соответствии с этими принципами децентрализованное мультиагентное управление основано на прямых взаимодействиях агентов DSA (Distributed Solving Agent) семантической сети, которым делегированы права на запуск вычислительных микросервисов. Правила взаимодействия агентов (фрагменты отношений *In* и *Out*) заносится в их локальные БЗ. Дискретно-событийная модель функционирования агентов описана в [2]. DSA агенты работают асинхронно. Для организации расчетов используются следующие средства:

- Условная управляющая структура модели КВМ (отношение $Pr \subset L \times M$). Семантика этой структуры следующая: если (l^*, m^*) $\in Pr$ ($l^* \in L$, $m^* \in M$), то запуск модуля m^* может быть произведен только при условии, если значение параметра l^* равно TRUE.
- Статические многовариантные расчеты путем постановки задачи $T = (A^0 = \{V, V^{max}, V^{min}, H, \ldots\}; B^0)$, где $V \in A^0$ – варьируемый параметр, V^{max}, V^{min}, H – границы и шаг изменения параметра. DSA агенту делегируются права на запуск модуля-генератора вариантов с этими параметрами.
- Динамические многовариантные расчеты. Генерацией вариантов в этом случае занимается DSA агент типа Variant, в модели которого программные действия однократного обращения к СМА заменены конечным автоматом, повторяющим последовательность действий (обращение к СМА для запуска модуля, получение и передача результатов) до сообщения об исчерпании вариантов.
- В многовариантных расчетах конвейерные вычисления могут выполняться параллельно.

Модель трехуровневого управления вычислениями при непроцедурной постановке задачи приведена на рис. 1. На рис. 2 приведена архитектура агента.

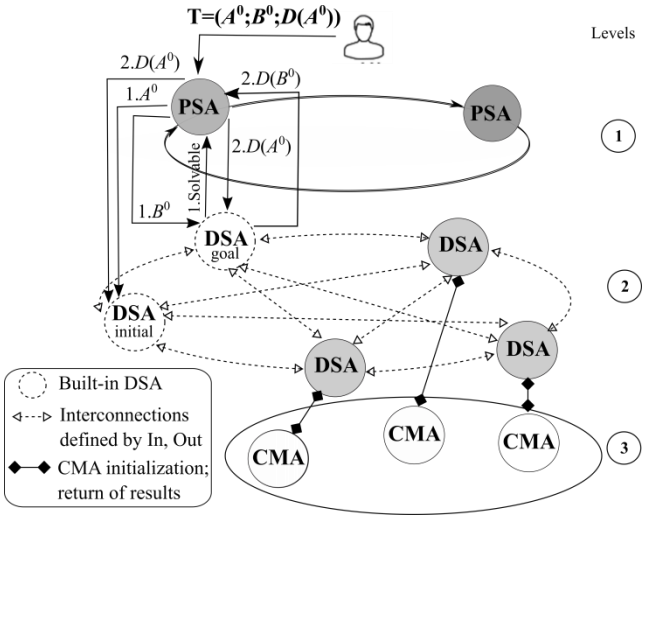


Рис. 1. Мультиагентное управление вычислениями

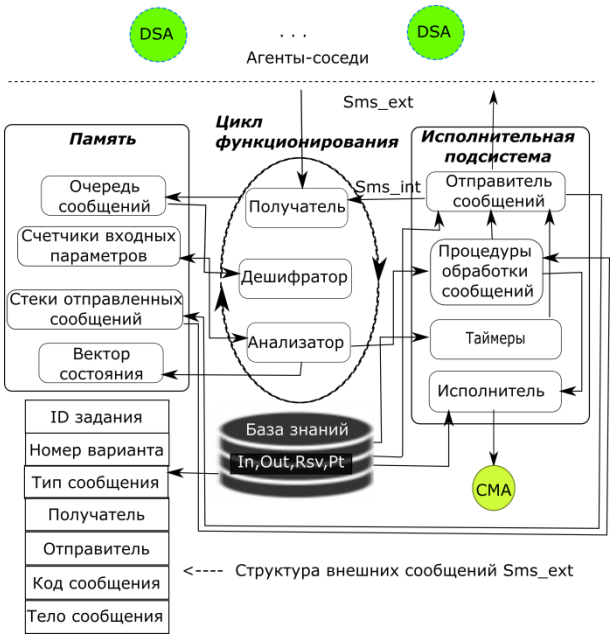


Рис. 2. Архитектура DSA агента

На первом шаге (рис. 1) формируется активная группа DSA агентов (в соответствии с отношениями взаимодействия пересылаются признаки вычислимости – имена параметров). Если задача не может быть решена в данной вычислительной сети, пользователь получает уведомление, и агенты деактивируются. В противном случае на втором шаге пересылаются значения параметров, но в вычислениях участвуют только агенты активной группы. Агент PSA отвечает за очередь непроцедурных постановок задач, DSA – за очередь сообщений, СМА – за очередь заданий. В процессе вычислений в ВП может образоваться несколько активных групп агентов. Один и тот же DSA может входить в разные группы и переключаться между расчетами по готовности данных. В структуре сообщения предусмотрен идентификатор (ID) постановки задачи пользователя и номер варианта. Эти

два значения и дата постановки задачи на агенте PSA составляют уникальный ключ, который используется при отслеживании готовности входных данных модуля в конкретной цепочке вычислений. Стеки отправленных сообщений также доступны по этому ключу. В случае сбоя узла в работу включается резервный агент, для которого по этим стекам восстанавливаются отправленные ранее сообщения с данными, полученными DSA-предшественником.

3. Иллюстративный пример. Продемонстрируем предлагаемый подход на важной с практической точки зрения и трудной в вычислительном плане задаче анализа структуры пространства состояний нелинейной двоичной динамической системы (ДДС), векторно-матричное уравнение которой имеет вид:

$$x^t = F(x^{t-1}, u^{t-1}), \tag{1}$$

где x и u – векторы соответственно состояния и входа, $x \in B^n$, $u \in B^m, B = \{0,1\}$, n и m – соответствующие размерности этих векторов; $t \in T = \{1,2,...,k\}$ – дискретное время (номер такта); $F(x)$ – векторная функция алгебры логики, называемая функцией переходов, ($F : B^n \times B^m \to B^n$).

Для каждого начального состояния $x^0 \in B^n$ и конечной последовательности $u(t) = (u^0, u^1, ..., u^{k-1})$ состояний вектора входа $(u^t \in B^m, t = 0,1,2,...,k-1)$ определим траекторию $x(t, x^0, u(t))$ системы (1) как конечную последовательность состояний x^0, x^1, …, x^k из множества B^n.

Качественный анализ ДДС со входами, основанный на исследовании структуры пространства состояний, предполагает решение следующих базовых задач: вычисление равновесных состояний и замкнутых траекторий (циклов), установление факта их изолированности, определение для заданных состояний их непосредственных предшественников, проверка свойства достижимости целевого множества $X^* \subset B^n$ из множества $X^0 \subset B^n$. Следует отметить, что эти задачи в настоящее время относится к числу важнейших [8] при исследовании динамики поведения генных регуляторных сетей, представленных дискретной по времени и состоянию моделью (1), анализа различных типов устойчивости, применяемых в теории кодирования регистров сдвига с нелинейной обратной связью [12] и ряда других приложений. С теоретической точки зрения модель (1) является существенно нелинейной, и к ней неприменимы существующие методы теории линейных ДДС. В силу этого перечисленные задачи анализа структуры пространства состояний модели (1) сформулируем как задачи булевой выполнимости [6]. Прежде всего отметим, что модель (1) эквивалентна одному булеву уравнению вида

$$\Phi_k(x^0, x^1, ..., x^k, u^0, u^1, ..., u^{k-1}) = \vee_{t=1}^{k} \vee_{i=1}^{n} (x_i^t \oplus F_i(x^{t-1}, u^{t-1})) = 0. \tag{2}$$

где x_i^t – i-тая компонента вектора x^t; $\oplus$ – сложение по модулю 2; F_i – i-тая компонента вектора F. При $k = 1$ (рассматриваются только одношаговые переходы) уравнение (2) приобретает вид

$$\Phi_1(x^0, x^1, u^0) = \vee_{i=1}^{n} (x_i^1 \oplus F_i(x^0, u^0)) = 0. \tag{3}$$

С учетом (3) уравнение (2) запишем

$$\Phi_k(x^0, x^1, ..., x^k, u^0, u^1, ..., u^{k-1}) = \vee_{t=1}^{k} \Phi_1(x^{t-1}, x^t, u^{t-1}) = 0$$

Пусть входная последовательность $u(t)$ является постоянной на всем интервале функционирования системы (1): $u(t)=(u^0,u^1=u^0,...,u^{k-1}=u^0)=u^0(t)$, $u^0\in B^m$. Тогда максимальное количество структур пространства состояний системы (1) будет равно 2^m, каждая из которых представляет автономный характер поведения нелинейной системы (1) при соответствующем постоянном входном воздействии. Используя работу [6], приведем необходимые булевы уравнения для качественного исследования структуры пространства состояний автономной ДДС на конечном интервале времени T:

1. Все непосредственные предшественники x^0 состояния $s\in B^n$ и заданного $u^0\in B^m$ являются нулями булева уравнения
$$\Phi_1(x^0,x^1,u^0(t))\Big|_{x^1=s}=0. \quad (4)$$
Если это уравнение не имеет решений, то предшественники состояния s отсутствуют.
2. Равновесные состояния для заданного $u^0\in B^m$ являются решениями булева уравнения
$$\Phi_1(x^0,x^1,u^0(t))\Big|_{x^1=x^0}=0. \quad (5)$$
3. Проверка свойства достижимости за время $t\le k$ тактов целевого множества X^* из множества X^0 сводится к решению булева уравнения
$$\overline{G^0}(x^0)\vee\Phi_k\left(x^0,x^1,\dots,x^k,u^0(t)\right)\vee\left(\vee_{t=1}^{k}\overline{G^*}(x^t)\right)=0\ , \quad (6)$$

где $\overline{G^0}(x)$ и $\overline{G^*}(x)$ – характеристические функции множеств X^0 и X^* соответственно. Отсутствие решений для уравнения (4) свидетельствует о выполнимости свойства достижимости.

Фрагмент вычислительной модели приведен на рис. 3.

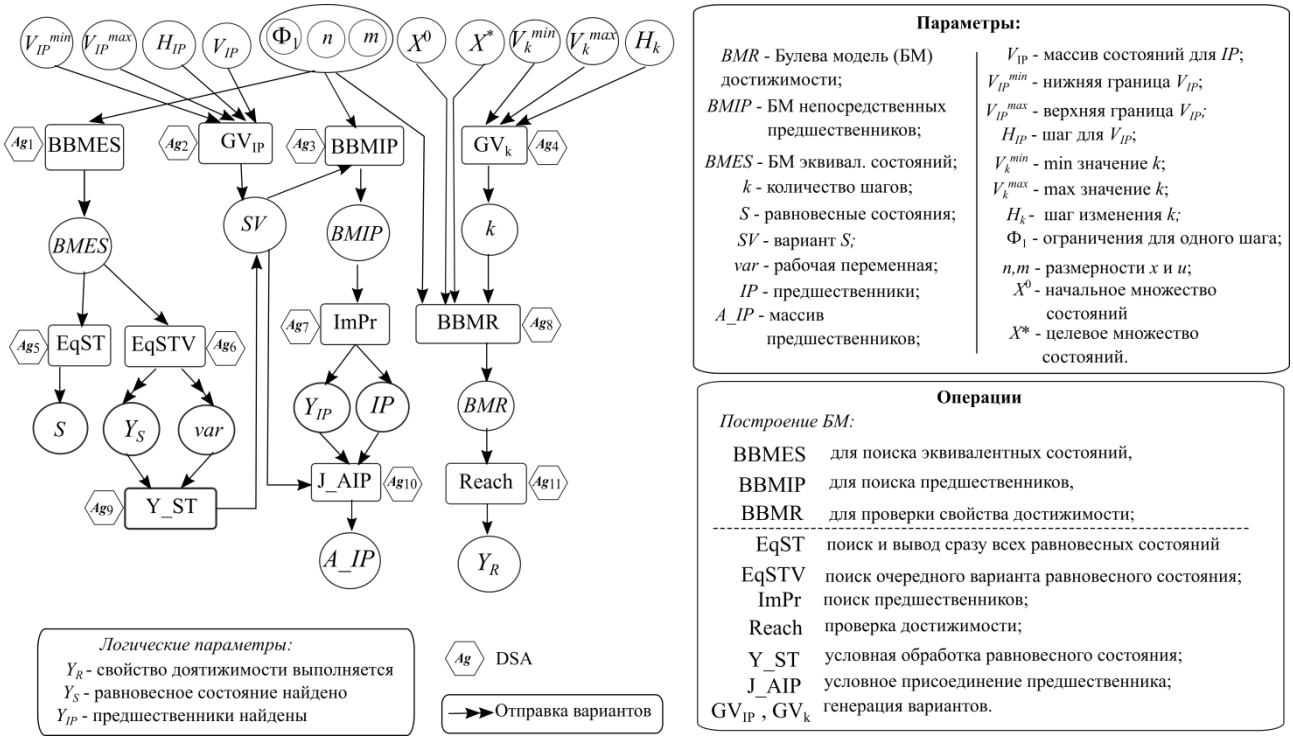


Рис. 3. Фрагмент вычислительной модели ПО

На этой модели можно выполнить следующие НПЗ:

- $T_1 = (A^0 = \{\Phi_1\};\ B^0 = \{A_IP\},\ D(A^0)=\{\ \Phi_1=\text{“F1.cnf”}\})$ - поиск предшественников для равновесных состояний (конвейерно-параллельный динамический многовариантный расчет) (рис. 4);
- $T_2 = (A^0=\{\Phi_1,\ V_{IP}\ ,\ V_{IP}^{\min}\ ,\ V_{IP}^{\max}\ ,\ H_{IP}\ \};\ B^0=\{\text{IP}\};\ D(A^0)=\{V_{IP}=\{14,\ 30\},\ V_{IP}^{\min}=1,\ V_{IP}^{\max}=3,\ H_{IP}=+1,\ \Phi_1=\text{“F1.cnf”}\})$ – статический многовариантный расчет. Поиск предшественников для набора вариантов состояний V_{IP}.
- $T_3 = (A^0 = \{\Phi_1, SV\};\ B^0=\{IP\};\ D(A^0)=\{SV=29,\ \Phi_1=\text{“F2.cnf”}\})$ – поиск предшественников для конкретного состояния, например 29.
- $T_4 = (A^0=\{\Phi_1,\ X^0,\ X^*,\ V_k^{\min}\ ,\ V_k^{\max}\ ,\ H_k\};\ B^0=\{Y_R\};\ D(A^0)=\{\ V_k^{\min}=1,\ V_k^{\max}=8,\ H_k=*2,\ \Phi_1=\text{“F2.cnf”}\},\ X^0=B^5\backslash\{29,\ 14,\ 30,\ 7\},\ X^*=\{0\}\})$ – статический многовариантный расчет, проверка достижимости множества X^* из множества X^0.

Здесь уравнения динамики описаны в файле “F1.cnf” для $u^0\ (t) = 0$, и в файле “F2.cnf” для $u^0\ (t) = 1$. Рассмотрим первую НПЗ. По описанию динамики Φ_1 строится модель равновесного состояния, по этой модели выполняется поиск очередного равновесного состояния микросервисом EqSTV (вариант *var*, в этом случае логическая переменная Y_S устанавливается в TRUE). Микросервис Y_ST при истинном значении Y_S приводит *var* к формату *SV*, который используется микросервисом BBMIP для построения модели поиска непосредственных предшественников *BMIP*, передаваемой далее микросервису ImPr, осуществляющему по этой модели поиск предшественников, передаваемых при нахождении микросервису J_AIP. Получается конвейер BBMES→EqSTV→Y_ST→BBMIP→ImPr→J_IP (рис. 4). На рис. 5 показана загруженность агентов при выполнении нескольких постановок задач. Вычисления проводились с использованием ресурсов [3].

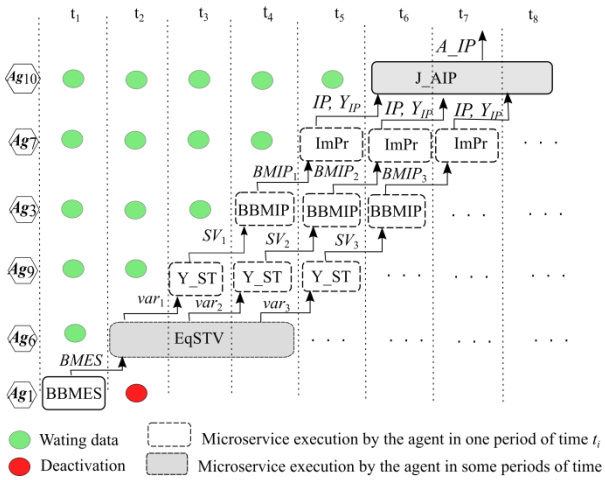


Рис. 4. Конвейерно-параллельный расчет для НПЗ T_1

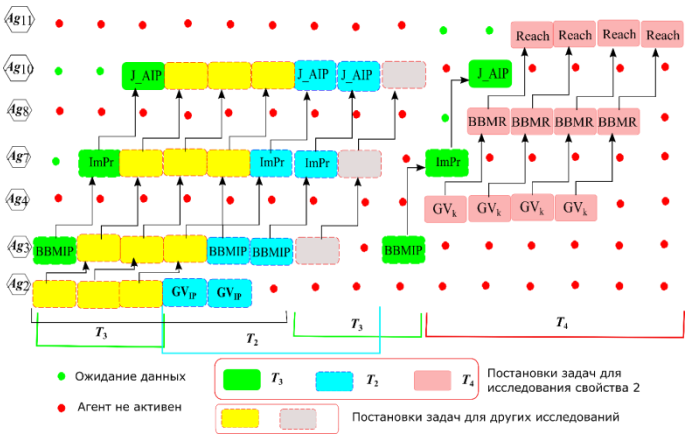


Рис. 5. Одновременное выполнение нескольких НПЗ

Анализ структуры пространства состояний сдвигового регистра. Рассмотрим технологию применения приведенных булевых ограничений и постановок непроцедурных задач для исследования свойства устойчивости регистра сдвига с нелинейной обратной связью [12], уравнения динамики которого имеют вид:

$$x_1^t = \overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1} \vee x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1} \vee x_1^{t-1} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee$$
$$\vee u^{t-1} \cdot (\overline{x_1^{t-1}} \cdot x_4^{t-1} \vee \overline{x_1^{t-1}} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee \overline{x_2^{t-1}} \cdot x_4^{t-1} \vee \overline{x_2^{t-1}} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee x_1^{t-1} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee \overline{x_1^{t-1}} \cdot \overline{x_2^{t-1}}) \vee$$
$$\vee \overline{u^{t-1}} \cdot (x_1^{t-1} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \vee x_1^{t-1} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_5^{t-1} \vee x_1^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1} \vee x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1}),$$
$$x_2^t = x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee u^{t-1} \cdot (x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot x_4^{t-1} \vee x_1^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee \overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \cdot x_5^{t-1}) \vee$$
$$\vee \overline{u^{t-1}} \cdot (x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \vee x_1^{t-1} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee \overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1}),$$
$$x_3^t = \overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot \overline{x_3^{t-1}} \vee u^{t-1} \cdot (\overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \vee x_2^{t-1} \cdot x_4^{t-1} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \cdot x_5^{t-1}) \vee \overline{u^{t-1}} \cdot$$
$$\cdot (\overline{x_1^{t-1}} \cdot x_2^{t-1} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \vee x_2^{t-1} \cdot \overline{x_4^{t-1}} \cdot \overline{x_5^{t-1}} \vee x_1^{t-1} \cdot \overline{x_2^{t-1}} \cdot x_4^{t-1} \cdot x_5^{t-1}),$$
$$x_4^t = x_3^{t-1}, x_5^t = x_4^{t-1}.$$

Здесь $x=col\ (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ – вектор состояния, $u(t)$ – скалярное входное воздействие (синдром в смысле работы [12]).

В [12] используется два свойства устойчивости сдвигового регистра.

- Свойство 1 ($u(t)=0$, режим самоконтроля регистра). Если для каждого состояния существует такое t, что $x\ (t, x^0, u^0(t) = 0) = 0$, то регистр сдвига с нелинейной обратной связью называется устойчивым. В противном случае этот регистр называют неустойчивым.
- Свойство 2 (на вход регистра поступает произвольное входное воздействие $u(t)$). Регистр сдвига с нелинейной обратной связью называется устойчивым по отношению к входному воздействию $u(t)$ тогда и только тогда, когда для любого состояния x^*, которое этот регистр может достичь из нулевого состояния при том или ином входном воздействии $u(t)$, существует такое t, что $x\ (t, x^*, u^0(t) = 0) = 0$.

В целях сокращения записи двоичное состояние регистра представим в виде десятичного эквивалента в предположении, что x_1 является младшим разрядом двоичного числа. Непроцедурные постановки задач для расчетов:

Путем решения булева уравнения (4) выявлено, что состояния 0 и 29 являются равновесными состояниями, причем состояние 29 является изолированным (НПЗ T_1). Это означает, что нулевое состояние недостижимо из состояния 29, и рассматриваемый регистр сдвига с нелинейной обратной связью является неустойчивым. Для проверки второго свойства находим непосредственных предшественников x^0 состояния 29 при $u^0(t)=1$ путем решения булева уравнения (4) (НПЗ T_3). Это будут состояния 14 и 30. При $u^0(t)=0$ состояние 14 имеет предшественника – состояние 7, состояние 30 не имеет предшественников (решается уравнение (4), НПЗ T_2 для $x_1 = 14$ и $x_1 = 30$). Состояния 30 и 7 не имеют предшественников как для $u^0(t)=0$, так и для $u^0(t)=1$, что означает недостижимость состояния 29 при любых входных воздействиях $u(t)$. Достижимые состояния составляют множество $X^0=B^5\backslash\{29, 14, 30, 7\}$. Проверка достижимости множества $X^*=\{0\}$ из множества X^0 осуществляется путем решения уравнения (4) для k=1, 2, 4, 8 (НПЗ T_4). Элементы множеств X^0 и X^* являются соответственно решениями булевых уравнений

$$G^0(x): \overline{x_5} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot x_2 \cdot \overline{x_1} \vee x_5 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \cdot x_1 \vee \overline{x_5} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \cdot x_1 \vee$$
$$\vee x_5 \cdot x_4 \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_1} \vee \overline{x_5} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_1} = 0,$$
$$G^*(x): x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 = 0.$$

Дополнительно из множества X^0 исключено нулевое состояние. Таким образом, мы показали, что регистр с нелинейной обратной связью обладает свойством устойчивости по отношению к входному воздействию $u(t)$.

Заключение. В рамках разработки пакета прикладных микросервисов BDSQA-BCM для решения задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений предложен агентный декларативный подход к организации конвейерно-параллельных вычислений. На основе предложенного подхода проведено исследование свойства устойчивости регистра сдвига с нелинейной обратной связью. Разрабатываемый пакет BDSQA-BCM может применяться для решения широкого спектра задач, в том числе изучения динамики поведения генных регуляторных сетей, представленных дискретной по времени и состоянию моделью.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ, проект № 18-07-00596.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков И.В., Опарин Г.А., Богданова В.Г, Пашинин А.А. Интеллектуализация децентрализованного управления распределенными вычислениями // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 10. С. 35–42. DOI: 10.14489/vkit.2017.10.
2. Бычков И.В., Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Сервис-ориентированная технология создания и применения децентрализованных мультиагентных решателей вычислительных задач // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 12. С. 36–44. DOI: 10.14489/vkit.2018.12.pp.036-044.
3. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. Режим доступа: http://hpc.icc.ru/ (дата обращения 31.01.2018).
4. Кобайло А.С. Применение гибридных методов проектирования вычислительных систем реального времени // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2018. №1 (206). С. 120–124.
5. Кудряшова Е.С., Михайлова Н.Н., Хусаинов А.А. Моделирование конвейерных и волновых вычислений // Интернет-журнал Науковедение. 2014. Вып. 1. Режим доступа: http://znanium.com/catalog/product/477304 (дата обращения 31.01.2018).
6. Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Метод булевых ограничений в качественном анализе двоичных динамических систем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 9. С. 19–29. DOI: 10.17513/mjpfi.12381.
7. Щербинина Н. В. Моделирование конвейерно-параллельного вычислителя с проблемной ориентацией // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2013. №15-1 С. 158–162.
8. Akutsu T., Hayashida M., Tamura T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks // In: International Conference on Algebraic Biology. 2008. Pp. 1–15. DOI:10.1007/978-3-540-85101-1_1.
9. Castillo L.F., López-Gartner G., Isaza G.A., Sánchez M., Arango J., Agudelo-Valencia D., Castaño S. GITIRBio: A Semantic and Distributed Service Oriented-Architecture for

Bioinformatics Pipeline // J Integr Bioinform. 2015. 12(1):255. DOI: 10.2390/biecoll-jib-2015-255.

10. Isaacson C. Software Pipelines and SOA: Releasing the Power of Multi-Core Processing // Publisher: Addison-Wesley Professional. 2008.
11. Maarala A.I., Bzhalava Z., Dillner J., Heljanko K., Bzhalava D. ViraPipe: scalable parallel pipeline for viral metagenome analysis from next generation sequencing reads Bioinformatics. 2018. Vol. 34(6). Pp. 928–935. DOI: 10.1093/bioinformatics/btx702.
12. Massey J.L., Li R.W. Application of Lyapunov's direct method to error-propagation effect convoluatenel codes // In: IEEE Trans. IT-10. 1964. Pp. 248–250.
13. Mirsoleimani S.A., van den Herik J., Plaat A., Vermaseren J. Pipeline Pattern for Parallel MCTS // Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018). 2018. Vol. 2. Pp. 614–621.
14. Navarro A., Asenjo R., Tabik S., Cascaval C. Analytical Modeling of Pipeline Parallelism // In proceedings of 18th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques, Raleigh, NC, 2009. Pp. 281–290. DOI: 10.1109/PACT.2009.28.
15. Newman S. Building Microservices. O'Reilly. 2015.
16. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations // Proceedings of 42st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija. 2019. Pp. 253–258. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
17. Somov Ye.I., Butyrin S., Oparin G.A., Bogdanova V.G. Methods and Software for Computer-Aided design of the Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). 2016. Vol. 7. No. 4. Pp. 613–624.

UDK 004.421+004.4'2+004.771

DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZING MULTIAGENT SYSTEM FOR DECENTRALIZED CONTROL BY DISTRIBUTED SOLUTION OF APPLIED PROBLEMS

Gennadiy A. Oparin

Doctor of technical science, professor, Deputy Director, e-mail: prn51@icc.ru

Vera G. Bogdanova

PhD., assistant professor, senior researcher, e-mail: bvg@icc.ru

Anton A. Pashinin

Junior Researcher, e-mail: apcrol@gmail.com

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. We consider the means of managing computations in the applied microservices package intended for the qualitative research of binary dynamic systems based on the Boolean constraints method. The computational domain model and the architecture of the agent provide the possibility of multivariate, parallel and

pipeline computing on dedicated resources. The proposed approach is demonstrated by the example of an analysis of the structure of the shift register state space.

Keywords: applied microservices package, microservice, calculations management, pipeline, binary dynamic systems.

References

1. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Intellektualizatsiya detsentralizovannogo upravleniya raspredelennymi vychisleniyami [Intellectualization of decentralized management by distributed computations] // Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Herald of computer and information technologies. 2017. Vol. 12. Pp. 35–42. DOI: 10.14489/vkit.2017.10. (in Russian)
2. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Servis-oriyentirovannaya tekhnologiya sozdaniya i primeneniya detsentralizovannykh multiagentnykh reshateley vychislitelnykh zadach [Service-oriented technology for development and application of decentralized multiagent solvers for applied problems] // Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Herald of computer and information technologies. 2018. Vol. 12. Pp. 36–44. (in Russian)
3. Irkutskiy superkomp'yuternyy tsentr [Irkutsk Supercomputer Center of SB RAS]. Available at: http://hpc.icc.ru/ (accessed 30-June-2019) (in Russian)
4. Kobaylo A.S. Primeneniye gibridnykh metodov proyektirovaniya vychislitelnykh sistem realnogo vremeni [The use of hybrid methods for the design of real-time computing systems] // Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskiye nauki i informatika = Proceedings of BSTU. Seriy 3. Physics and Mathematics. Informatics. 2018. №1 (206). Pp. 120–124. (in Russian)
5. Kudryashova E.C., Mikhaylova N.N., Khusainov A.A. Modelirovaniye konveyernykh i volnovykh vychisleniy [Modeling conveyor and wave computing] // Internet-zhurnal Naukovedeniye = Internet journal "Science of Science". 2014. Vyp. 1. Available at: http://znanium.com/catalog/product/477304 (accessed 15/06/2019). (in Russian)
6. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Metod bulevykh ogranicheniy v kachestvennom analize dvoichnykh dinamicheskikh system [Boolean constraints method in qualitative analysis of binary dynamic systems] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Research. 2018. № 9. Pp. 19–29. DOI: 10.17513/mjpfi.12381 (in Russian)
7. Shcherbinina N.V. Modelirovaniye konveyerno-parallelnogo vychislitelya s problemnoy oriyentatsiyey [Simulation of a pipeline-parallel computer with a problem orientation] // Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika = Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies. 2013. №15-1. Pp. 158–162. (in Russian)
8. Akutsu T., Hayashida M., Tamura T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks // In: International Conference on Algebraic Biology. 2008. Pp. 1–15. DOI:10.1007/978-3-540-85101-1_1.
9. Castillo L.F., López-Gartner G., Isaza G.A., Sánchez M., Arango J., Agudelo-Valencia D., Castaño S. GITIRBio: A Semantic and Distributed Service Oriented-Architecture for

Bioinformatics Pipeline // J Integr Bioinform. 2015. 12(1):255. DOI: 10.2390/biecoll-jib-2015-255.

10. Isaacson C. Software Pipelines and SOA: Releasing the Power of Multi-Core Processing // Publisher: Addison-Wesley Professional. 2008.
11. Maarala A.I., Bzhalava Z., Dillner J., Heljanko K., Bzhalava D. ViraPipe: scalable parallel pipeline for viral metagenome analysis from next generation sequencing reads Bioinformatics. 2018. Vol. 34(6). Pp. 928–935. DOI: 10.1093/bioinformatics/btx702.
12. Massey J.L., Li R.W. Application of Lyapunov's direct method to error-propagation effect convoluatenel codes // In: IEEE Trans. IT-10. 1964. Pp. 248–250.
13. Mirsoleimani S.A., van den Herik J., Plaat A., Vermaseren J. Pipeline Pattern for Parallel MCTS // Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018). 2018. Vol. 2. Pp. 614–621.
14. Navarro A., Asenjo R., Tabik S., Cascaval C. Analytical Modeling of Pipeline Parallelism // In proceedings of 18th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques, Raleigh, NC, 2009. Pp. 281–290. DOI: 10.1109/PACT.2009.28.
15. Newman S. Building Microservices. O'Reilly. 2015.
16. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations // Proceedings of 42st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija. 2019. Pp. 253–258. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
17. Somov Ye.I., Butyrin S., Oparin G.A., Bogdanova V.G. Methods and Software for Computer-Aided design of the Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). 2016. Vol. 7. No. 4. Pp. 613–624.

УДК 004.421+004.4’2+004.771

КОНСТРУКТИВНЫЙ ПОДХОД К ПРОВЕРКЕ ИСТИННОСТИ КВАНТИФИЦИРОВАННЫХ БУЛЕВЫХ ФОРМУЛ В РЕШАТЕЛЕ HPC2QALL

Опарин Геннадий Анатольевич
Д.т.н., проф., зам. директора, e-mail: prn51@icc.ru
Богданова Вера Геннадьевна
К.т.н., доцент, с.н.с., e-mail: bvg@icc.ru
Горский Сергей Алексеевич
К.т.н., н.с., e-mail: gorskysergey@mail.ru
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН),
664033 г. Иркутск ул. Лермонтова, 134

Аннотация. Высокая вычислительная сложность ряда задач анализа динамики и структурно-параметрического синтеза для разных классов динамических управляемых систем обусловливает разработку методов и средств их параллельного решения. На основе метода булевых ограничений задачи качественного анализа поведения траекторий двоичных динамических систем, функционирование которых рассматривается на конечном интервале времени, сводятся к решению задач булевой выполнимости и проверки истинности квантифицированных булевых формул. Строится математическая модель исследуемого динамического свойства в виде системы булевых уравнений, учитывающая как спецификацию свойства, так и уравнения динамики конкретного объекта. Такой подход, в отличие от существующих, является декларативным и обеспечивает возможность параллелизма по данным. Для проверки истинности 2-квантифицированных булевых формул разработан параллельный решатель Hpc2qall. В отличие от аналогичных решателей, Hpc2qall выдает не только результат проверки истинности формулы (SAT или UNSAT), но и осуществляет конструктивное нахождение всех наборов значений переменных под квантором всеобщности, приводящих к результату UNSAT. Приводится пример применения конструктивного подхода для решения задачи синтеза стабилизирующей обратной связи.

Ключевые слова: двоичная динамическая система, булева модель, параллельный 2QBF решатель, качественный анализ.

Цитирование: Опарин Г.А., Богданова В.Г., Горский С.А. Конструктивный подход к проверке истинности квантифицированных булевых формул в решателе Hpc2qall // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 91–101. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-08

Введение. Высокая вычислительная сложность ряда задач анализа динамики и структурно-параметрического синтеза для разных классов динамических управляемых систем, в частности, NP-сложность задач качественного исследования двоичных динамических систем (ДДС) [14], синтеза управляющей последовательности в ДДС [4],

параметрического синтеза стабилизирующей обратной связи для управляемых динамических систем [10], обусловливает разработку методов и средств их параллельного решения. На основе метода булевых ограничений [3] задачи качественного анализа поведения траекторий двоичных динамических систем (ДДС), функционирование которых рассматривается на конечном интервале времени, сводятся к решению задач булевой выполнимости или проверки истинности квантифицированных булевых формул. Строится математическая модель исследуемого динамического свойства в виде системы булевых уравнений, учитывающая как спецификацию свойства, так и уравнения динамики конкретного объекта [1, 6]. Такой подход, в отличие от существующих, является декларативным и обеспечивает возможность параллелизма по данным при решении задач большой размерности. Цель настоящего исследования состояла в разработке параллельного решателя проверки истинности 2-квантифицированных булевых формул (2QBF). В разработанном решателе Hpc2qall применяется параллелизм по данным. Подзадачи, полученные путем расщепления исходной 2QBF, решаются параллельно как независимые. В отличие от существующих 2QBF решателей, Hpc2qall выдает не только результат проверки истинности 2QBF, но и осуществляет конструктивное нахождение всех наборов переменных под квантором всеобщности, приводящих к результату UNSAT (значение формулы равно FALSE), для этого в качестве базового решателя используется решатель CADET [12]. Выдаваемое этим решателем доказательство правильности полученного им результата (сертификата [11]) в случае ложности 2QBF (результат UNSAT) представляет собой частный случай сертификата, а именно, означивание переменных под знаком верхнего квантора всеобщности. Сертификаты очень востребованы для практических приложений QBF [5, 11]. В настоящей работе приводится пример применения Hpc2qall для конструктивного решения задачи синтеза обратной стабилизирующей связи в ДДС на основе метода булевых ограничений.

1. Постановка задачи. Рассматривается нелинейная двоичная динамическая система (ДДС), векторно-матричное уравнение которой имеет вид

$$x^t = F(x^{t-1}, u^{t-1}), \tag{1}$$

$$y^{t-1} = H(x^{t-1}). \tag{2}$$

где x, u, y – векторы соответственно состояния, управления и выхода ($x \in B^n$, $u \in B^m$, $y \in B^l$, $B = \{0,1\}$), n, m и l – соответствующие размерности этих векторов; $t \in T = \{1,2,\ldots,k\}$ – дискретное время (номер такта); $F(x, u)$, $H(x)$ – векторные функции алгебры логики, называемые соответственно функцией переходов и выхода ($F : B^n \times B^m \to B^n$, $H : B^n \to B^l$).

Ставится задача синтеза нелинейного закона управления по выходу в виду обратной связи

$$u^{t-1} = G(y^{t-1}), \tag{3}$$

обеспечивающей глобальную устойчивость заданного состояния замкнутой системы.

Система (1-3) на конечном интервале времени T называется глобально устойчивой относительно состояния x^*, если для любого $x^0 \in B^n$ существует момент времени $t^* \in T$ такой, что $x(t^*, x^0) = x^*$, для всех $t \geq t^*$, т.е. состояние x^* является равновесным состоянием

$$(x(t^*, x^0) = x^*) \wedge (x(t^* + 1, x^0) = x^*). \tag{4}$$

Для заданного $k = k^*$ стабилизирующую обратную связь (3) назовем оптимальной по быстродействию, если замкнутая система (1-4) является глобально устойчивой по отношению к состоянию x^*, но для $k = k^* - 1$ задача синтеза обратной связи не имеет решения.

2. Метод решения. Будем искать функции $G_i(y)\,(i = 1,2,...,m)$ в алгебраической нормальной форме (АНФ)

$$\begin{aligned} G_i(y) = c_0^i \oplus c_1^i \wedge y_1 \oplus c_2^i \wedge y_2 \oplus ... \oplus c_l^i \wedge y_l \oplus c_{l+1}^i \wedge y_1 \wedge y_2 \oplus \\ \oplus c_{l+2}^i \wedge y_1 \wedge y_3 \oplus ... \oplus c_{2^l-1}^i \wedge y_1 \wedge y_2 \wedge ... \wedge y_l, \end{aligned} \quad (5)$$

где c_j^i – неопределенные коэффициенты, $c_j^i \in \{0,1\}\,(i = 1,2,...,n;\ j = 0,1,...,2^l - 1)$. Обозначим множество таких коэффициентов через *C*.

Сведем задачу синтеза стабилизирующей обратной связи к решению задачи проверки истинности 2QBF, используя метод булевых ограничений. Система уравнений (1-3) с обратной связью вида (4) на интервале времени $T = \{1,2,...,k\}$ эквивалентна одному булеву уравнению вида

$$\Phi(X,Y,U,C) = 0, \quad (6)$$

где $x = \{x^0, x^1, ..., x^k\}$, $y = \{y^0, y^1, ..., y^{k-1}\}$, $u = \{u^0, u^1, ..., u^{k-1}\}$.

Запишем спецификацию задачи синтеза обратной связи, обеспечивающей глобальную устойчивость состояния x^*, на языке формальной логики:

$$(\exists C)(\forall x^0)(\exists t : t \in T)((x(t^*, x^0) = x^*) \wedge (x(t^* + 1, x^0) = x^*)).$$

С учетом (6) это выражение примет вид:

$$(\exists C)(\forall X,Y,U : \overline{\Phi}(X,Y,U,C)(\exists t : t \in T)((x(t^*, x^0) = x^*) \wedge (x(t^* + 1, x^0) = x^*)), \quad (7)$$

где $\overline{\Phi}(X,Y,U)$ – характеристическая функция динамического процесса с начальным состоянием x^0 и множеством коэффициентов *C* относительно переменных из множеств *X*,*Y*,*U*.

С учетом того, что характеристическая функция состояния x^* имеет вид $\tilde{x}_1 \wedge \tilde{x}_2 \wedge \cdots \wedge \tilde{x}_n$ ($\tilde{x}_i$ – это переменная x_i без отрицания для $x^* = 1$ и с отрицанием для $x^* = 0$, $i = 1,2,...,n$) и в силу конечности множества *T* подформулу

$$(\exists t : t \in T)((x(t^*, x^0) = x^*) \wedge (x(t^* + 1, x^0) = x^*))$$

заменим на эквивалентную ей формулу

$$\vee_{t=1}^{k} \wedge_{i=1}^{n} (\tilde{x}_i^t \wedge \tilde{x}_i^{t+1}).$$

Заменим ограниченный квантор всеобщности на обычный квантор всеобщности. Тогда (7) примет вид

$$(\exists C)(\forall X,Y,U)(\overline{\Phi}(X,Y,U,C) \to \vee_{t=1}^{k} \wedge_{i=1}^{n} (\tilde{x}_i^t \wedge \tilde{x}_i^{t+1})). \quad (8)$$

Избавимся от импликации в формуле (8). Тогда получим эквивалентную (8) 2QBF:

$$(\exists C)(\forall X,Y,U)(\Phi(X,Y,U,C)\vee(\vee_{t=1}^{k}\wedge_{i=1}^{n}(\widetilde{x}_i^t\wedge\widetilde{x}_i^{t+1}))). \tag{9}$$

Если значение этой формулы равно TRUE, то существует хотя бы одно означивание коэффициентов из множества C, являющееся решением задачи синтеза стабилизирующей обратной связи. В силу двойственности, если (9) истинна, то формула

$$(\forall C)(\exists X,Y,U)(\overline{\Phi}(X,Y,U,C)\wedge(\wedge_{t=1}^{k}\vee_{i=1}^{n}(\overline{\widetilde{x}_i^t}\vee\overline{\widetilde{x}_i^{t+1}}))) \tag{10}$$

ложна. Следовательно, значение FALSE, полученное при проверке истинности (10), говорит о существовании решения задачи синтеза стабилизирующей обратной связи. Преимущество решения обратной задачи заключается в возможности автоматизации представления подкванторного выражения в виде конъюнктивной нормальной формы (КНФ) с помощью конвертора, предоставляемого программными средствами Sage Tutorial [13], если левая часть уравнения (6) задана в виде АНФ. КНФ используется в формате QDIMACS, требуемом для QBF-решателей.

3. Иллюстративный пример. Применим рассмотренный подход для генетической регуляторной сети с управляющими входами [9], уравнения описания динамики которой имеют вид:

$$\begin{aligned}
&x_1^{t+1}=\overline{u_1^t}\wedge(x_2^t\vee x_3^t),\\
&x_2^{t+1}=\overline{u_1^t}\wedge u_2^t\wedge x_1^t,\\
&x_3^{t+1}=\overline{u_1^t}\wedge(u_2^t\vee(u_3^t\cdot x_1^t)),\\
&y_1^t=x_1^t,\\
&y_2^t=x_2^t,\\
&u_1^{t-1}=c_0^1\oplus c_1^1\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^1\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^1\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1},\\
&u_2^{t-1}=c_0^2\oplus c_1^2\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^2\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^2\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1},\\
&u_3^{t-1}=c_0^3\oplus c_1^3\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^3\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^3\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Система булевых уравнений (11) в формате АНФ имеет вид:

$$\begin{aligned}
&\Phi_1^t=x_1^t\oplus x_2^{t-1}\oplus x_3^{t-1}\oplus x_2^{t-1}\wedge x_3^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge x_2^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge x_3^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge x_2^{t-1}\wedge x_3^{t-1}=0,\\
&\Phi_2^t=x_2^t\oplus u_2^{t-1}\wedge x_1^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge u_2^{t-1}\wedge x_1^{t-1}=0,\\
&\Phi_3^t=x_3^t\oplus u_2^{t-1}\oplus u_3^{t-1}\wedge x_1^{t-1}\oplus u_2^{t-1}\wedge u_3^{t-1}\wedge x_1^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge u_2^{t-1}\oplus u_1^{t-1}\wedge u_3^{t-1}\wedge x_1^{t-1}\oplus\\
&\oplus u_1^{t-1}\wedge u_2^{t-1}\wedge u_3^{t-1}\wedge x_1^{t-1}=0,\\
&\Phi_4^{t-1}=y_1^{t-1}\oplus x_1^{t-1}=0,\\
&\Phi_5^{t-1}=y_2^{t-1}\oplus x_2^{t-1}=0,\\
&\Phi_6^{t-1}=u_1^{t-1}\oplus c_0^1\oplus c_1^1\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^1\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^1\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1}=0,\\
&\Phi_7^{t-1}=u_2^{t-1}\oplus c_0^2\oplus c_1^2\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^2\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^2\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1}=0,\\
&\Phi_8^{t-1}=u_3^{t-1}\oplus c_0^3\oplus c_1^3\wedge y_1^{t-1}\oplus c_2^3\wedge y_2^{t-1}\oplus c_3^3\wedge y_1^{t-1}\wedge y_2^{t-1}=0.
\end{aligned}$$

Используя конвертор [13], приведем каждое уравнение к виду КНФ=1. Для $t \in T = \{1,2,...,k,k+1\}$ получим $\overline{\Phi}(X,Y,U,C) = \wedge_{t=1}^{k+1} \overline{\Phi_1^t} \wedge \overline{\Phi_2^t} \wedge \cdots \wedge \overline{\Phi_8^{t-1}}$. Подставив это значение в (10), получим 2QBF:

$$(\forall C)(\exists X,Y,U) \wedge_{t=1}^{k+1} \overline{\Phi_1^t} \wedge \overline{\Phi_2^t} \wedge \cdots \wedge \overline{\Phi_8^{t-1}} \wedge (\wedge_{t=1}^{k} \vee_{i=1}^{n} (\overline{\tilde{x}_i^t} \vee \overline{\tilde{x}_i^{t+1}})).$$

Значения коэффициентов из множества *C*, при которых эта формула ложна, являются решениями задачи синтеза стабилизирующей обратной связи.

Для поиска решений этой задачи разработан параллельный 2QBF решатель Hpc2qall. В отличие от существующих 2QBF решателей, Hpc2qall выдает не только заключение об истинности формулы (SAT или UNSUT), но и осуществляет конструктивное нахождение всех наборов переменных под квантором всеобщности, приводящих к заключению UNSAT (значение формулы равно FALSE). Эти наборы значений представляют собой означивания коэффициентов из множества *C*. В рассматриваемом примере для $t \in \{1,2\}$ найдены следующие наборы таких значений, являющиеся решением задачи синтеза стабилизирующей обратной связи:

$$(000011000100), (000011001011), (000011000111), (000011001000),$$

которым соответствуют следующие законы управления по выходу в виде обратной связи

$$u_1^t = 0, u_2^t = 1 \oplus y_1^t = \overline{y_1^t}, u_3^t = f_i(y_1^t, y_2^t),$$

где $f_1 = 1$, $f_2 = y_1^t \oplus y_2^t \oplus y_1^t \cdot y_2^t = y_1^t \vee y_2^t$, $f_3 = 1 \oplus y_2^t \oplus y_1^t \cdot y_2^t = y_1^t \vee \overline{y_2^t}$, $f_4 = y_1^t$.

3. Параллельный решатель Hpc2qall. В решателе Hpc2qall используется параллелизм по данным. Подзадачи формируются на основе расщепления исходной 2QBF.

Пусть $x = (x_1,...,x_{n_x})$ и $y = (y_1,...,y_{n_y})$ – векторы булевых переменных размерности соответственно n_x и n_y. Решатель Hpc2qall ориентирован на проверку истинности 2QBF вида $Q_1 y_1 .. y_{n_y} Q_2 x_1 .. x_{n_x} \varphi(y,x)$, где кванторы $Q_1, Q_2 \in \{\forall, \exists\}$, а подкванторное выражение $\varphi(y,x) = \varphi(y_1,...,y_{n_y}, x_1,...,x_{n_x})$ представлено в конъюнктивной нормальной форме (КНФ). Для определения выполнимости формулы 2QBF, в которой Q_1 является квантором всеобщности, а Q_2 – квантором существования, используется параллельный алгоритм, основанный на расщеплении заданной 2QBF рассматриваемого вида путем выведения переменной y_i из-под верхнего квантора всеобщности в соответствии со следующими правилами преобразования:

$$\begin{aligned} \forall y_1,...,y_i,...,y_{n_y} \exists x_1,...,x_{n_x} \varphi(y,x) = [\forall y_1,...,y_{i-1},y_{i+1},...,y_{n_y} \exists x_1,...,x_{n_x} \varphi(y,x)\big|_{y_i=1}] \wedge \\ \wedge [\forall y_1,...,y_{i-1},y_{i+1},...,y_{n_y} \exists x_1,...,x_{n_x} \varphi(y,x)\big|_{y_i=0}] \end{aligned} . \quad (12)$$

Если пользоваться этой формулой, то при большой глубине расщепления возникают накладные расходы, связанные с подстановкой констант, распространением ограничений, упрощением и т.д. Поэтому применяется следующее преобразование

$$\forall y_1,\ldots,y_i,\ldots,y_{n_y}\exists x_1,\ldots,x_{n_x}\varphi(y,x)=[\forall y_1,\ldots,y_{i-1},y_{i+1},\ldots,y_{n_y}\exists x_1,\ldots,x_{n_x},y_i(\varphi(y,x)\wedge \wedge(y_i))]\wedge[\forall y_1,\ldots,y_{i-1},y_{i+1},\ldots,y_{n_y}\exists x_1,\ldots,x_{n_x},y_i(\varphi(y,x)\wedge(\neg y_i))] \quad (13)$$

Очевидно, что (12) и (13) эквивалентны в силу следующего:

$$\exists y_i(\varphi(y,x)\wedge y_i)=(\varphi(y,x)\big|_{y_i=1}\wedge 1)\vee(\varphi(y,x)\big|_{y_i=0}\wedge 0)=\varphi(y,x)\big|_{y_i=1},$$

$$\exists y_i(\varphi(y,x)\wedge(\neg y_i))=(\varphi(y,x)\big|_{y_i=1}\wedge 0)\vee(\varphi(y,x)\big|_{y_i=0}\wedge 1)=\varphi(y,x)\big|_{y_i=0}.$$

Использующий рассмотренный алгоритм расщепления 2QBF параллельный решатель Hpc2qall представляет собой модифицированную версию решателя Hpcqsat [1]. Решатель Hpc2qall также реализован на основе архитектуры “Master-Slave” как MPI-приложение на языке C++. Главный процесс выполняет аналогичные функции по формированию очереди подзадач и управлению работой дочерних процессов.

Решатели Hpcqsat и Hpc2qall имеют следующие отличия:

1. В Hpc2qall в качестве базового решателя для проверки истинности подзадачи в дочерних процессах запускается 2QBF-решатель Cadet [12], в Hpcqsat – DepQBF.

2. В Hpcqsat дочерний процесс передает главному процессу запрос на подзадачу и результат решения подзадачи (SAT или UNSAT), а в Hpc2qall дополнительно к результату решения передается сертификат, возвращаемый базовым решателем Cadet.

3. В случае получения ответа UNSAT от базового решателя Hpcqsat находит один набор значений булевых переменных, который привел к такому ответу (конструктивное решение). Hpc2qall может найти все такие наборы (по умолчанию, а также один или k наборов, если задано соответствующее значение параметра поиска).

4. Hpcqsat использует дерево расщепления 2QBF для поиска конструктивного решения, а Hpc2qall использует сертификат, переданный вместе с результатом базовым решателем Cadet. Сертификат в данном случае представляет собой значения переменных верхнего квантора, при которых данный результат был получен. При получении для подзадачи ответа UNSAT главный процесс решателя Hpc2qall осуществляет построение соответствующей ветки дерева расщепления на глубину верхнего квантора (процедура SetSubtaskPath, рис. 1), и присваивает ей значение UNSAT. В процессе формирования данной ветки появляется множество ответвлений, которые могут также содержать искомые значения, они будут обрабатываться аналогично в процессе решения задачи. Представленные на рис. 1 и рис. 2 блок-схемы описывают работу главного (Master) и рабочих процессов (Slave).

Переменная Solve переключает режим работы главного процесса с расщепления 2QBF (Solve=0) на управление работой дочерних процессов при решении подзадач (Solve=1). Количество подзадач в очереди поддерживается в соответствии с количеством свободных вычислительных ресурсов. Переменная Result.val служит для выбора обработки результата, полученного в дочернем процессе при запуске процедуры SolveByCadet (рис. 2). Анализ влияния загрузки дочерних процессов (количества подзадач, отправляемых в ответ на запрос дочернего процесса Send(Request)) приведен в [7]. Процедура addToRequest регулирует формирование задания для дочерних процессов. На рис. 3 приведено ускорение, полученное при решении задачи синтеза стабилизирующей обратной связи для k=2 (нижняя линия) и этой же задачи большей размерности (при k=3 – верхняя линия). Видно, что с увеличением размерности задачи ускорение становится близким к линейному. На рис. 4 приведены

результаты решения ряда близких по характеристикам тестовых задач [8], показывающие одинаково высокую эффективность (рис. 5). Эксперименты проводились на кластере «Академик В.М. Матросов» [2].

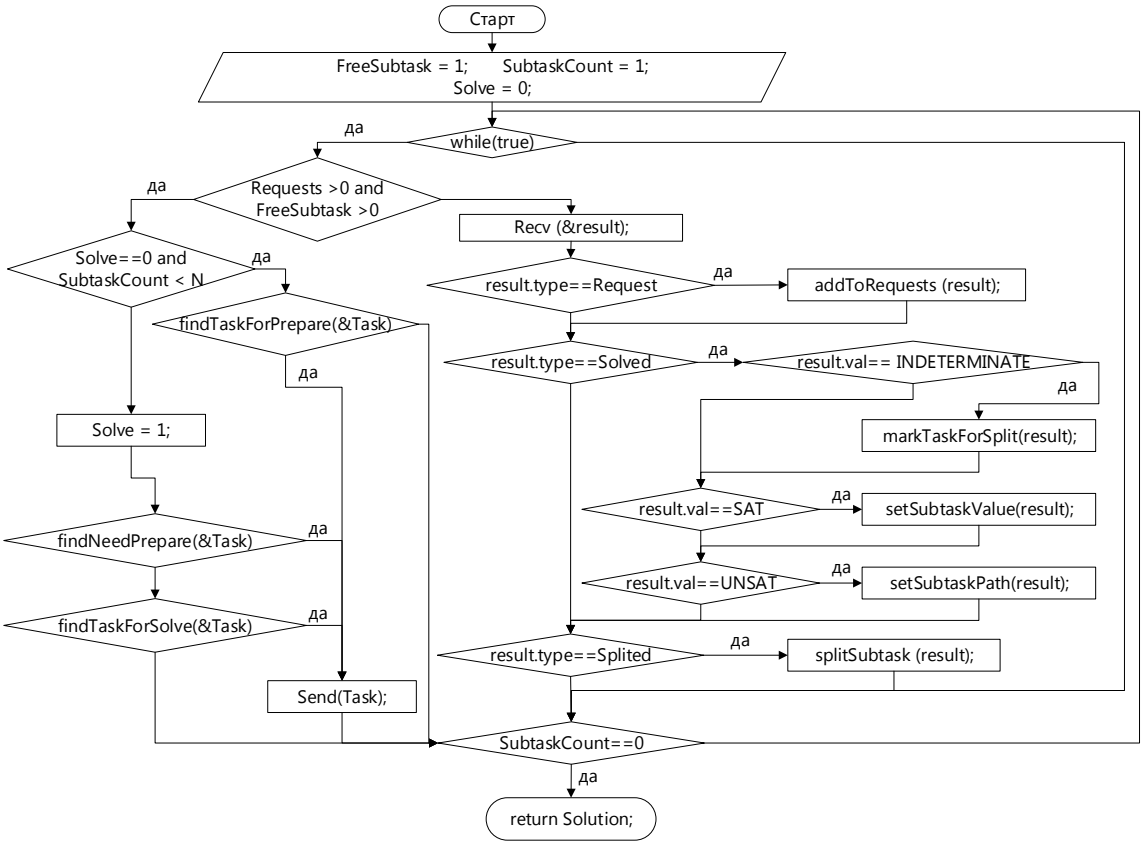


Рис. 1. Работа главного процесса

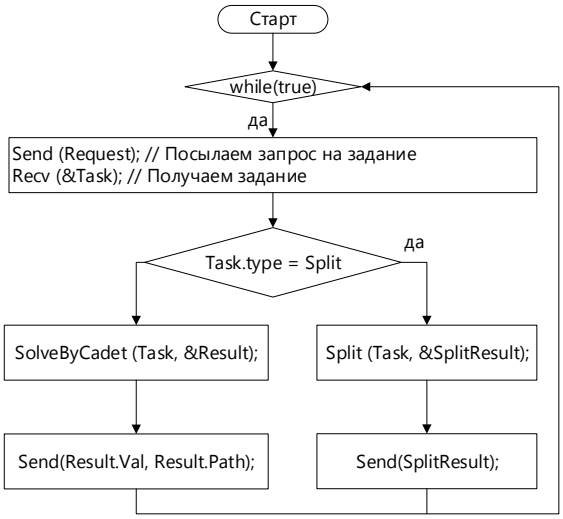


Рис. 2. Работа дочернего процесса

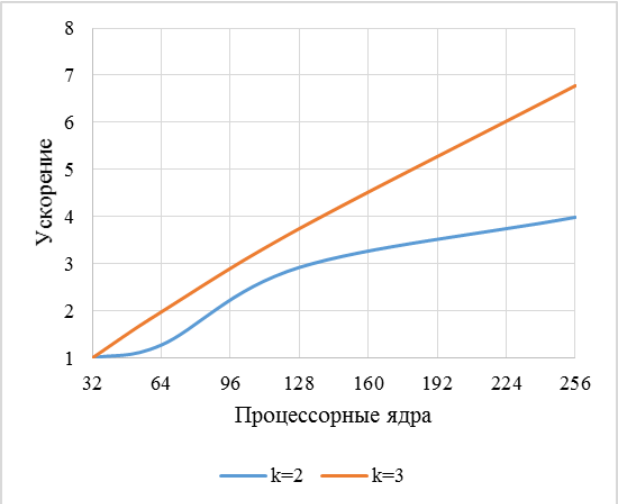


Рис. 3. Ускорение на рассмотренном примере

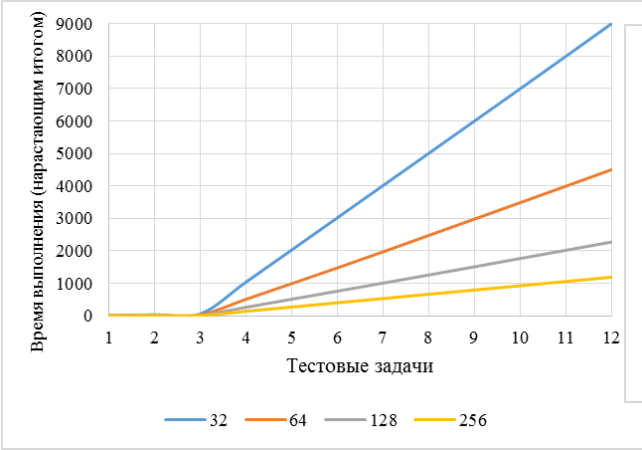


Рис. 4. Нарастающее общее время выполнения тестовых задач (в сек.)

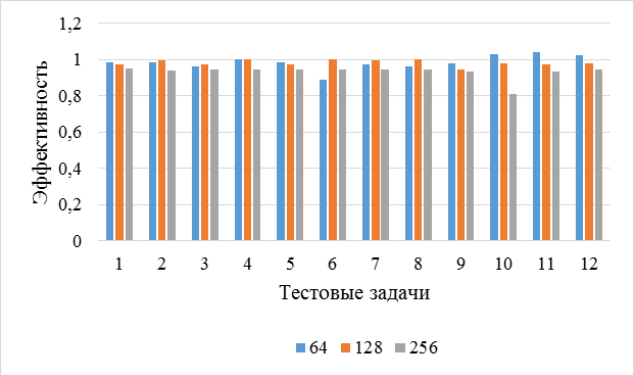


Рис. 5. Эффективность решения тестовых задач для 64, 128 и 256 процессорных ядер

Заключение. Предложен конструктивный подход к решению задачи проверки истинности 2QBF. Разработан параллельный 2QBF решатель Hpc2qall, который, в отличие от существующих, выдавая ответ UNSAT, позволяет получить значения переменных под первым знаком квантора всеобщности, при которых формула принимает ложное значение. С использованием Hpc2qall решена задача синтеза закона управления по выходу в виде обратной связи, обеспечивающей глобальную устойчивость заданного состояния замкнутой системы. Проведен ряд вычислительных экспериментов, подтвердивших работоспособность и эффективность решателя.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 18-07-00596.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова В.Г., Горский С.А. Параллельная реализация логического метода решения задач качественного анализа двоичных динамических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №4 (12). С. 145–154. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-15.
2. Иркутский суперкомпьютерный центр. Режим доступа: http://hpc.icc.ru/ (дата доступа 30.06.2019).
3. Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Метод булевых ограничений в качественном анализе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 9. С. 19–29. DOI: 10.17513/mjpfi.12381.
4. Akutsu T., Hayashida M., Tamura T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks // International Conference on Algebraic Biology, 2008. Pp. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85101-1_1.
5. Becker B., Ehlers R., Lewis M., Marin P. ALLQBF Solving by Computational Learning. In: Chakraborty S., Mukund M. (eds) Automated Technology for Verification and Analysis. ATVA 2012. Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7561. Pp. 370–384. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33386-6_29.
6. Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Multiagent technology for parallel implementation of Boolean constraint method for qualitative analysis of binary dynamic systems // 42nd International

Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija. 2019. Pp. 1043–1048. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757154.

7. Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Scalable parallel solver of Boolean satisfiability problems // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2018. Pp. 0222–0227. DOI: 10.23919/MIPRO.2018.8400042.
8. Datasets of 2QBF. Режим доступа: http://www.qbflib.org/eval18.html (дата доступ: 30.06.2019)
9. Li H., Wang Y. Output feedback stabilization control design for Boolean control networks // Automatica. 2013. Vol. 49(12). Pp. 3641–3645. DOI: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.09.023.
10. Nemirovskii A.A. Several NP-hard problems arising in robust stability analysis // Mathematics of Control, Signals, and Systems. 1993. Vol. 6. Pp. 99–105. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01211741.
11. Niemetz A., Preiner M., Lonsing F., Seidl M., Biere A. Resolution-Based Certificate Extraction for QBF. In: Cimatti A., Sebastiani R. (eds) Theory and Applications of Satisfiability Testing – SAT 2012. Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7317. Pp. 430–435. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31612-8_33.
12. Rabe M.N., Seshia S.A.: Incremental Determinization. In: Creignou N., Le Berre D. (eds) Theory and Applications of Satisfiability Testing – SAT 2016. Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9710. Pp. 375–392. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40970-2_23.
13. Sage Tutorial in Russian. Режим доступа: http://doc.sagemath.org/pdf/ru/tutorial/ SageTutorial_ru.pdf (дата доступа 30.06.2019)
14. Zhao Q. "A remark on "Scalar equations for synchronous Boolean networks with biological Applications" by C. Farrow, J. Heidel, J. Maloney, and J. Rogers," in IEEE Transactions on Neural Networks, 2005. Vol. 16(6). Pp. 1715–1716. DOI: 10.1109/TNN.2005.857944.

UDK 004.421+004.4’2+004.771

A CONSTRUCTIVE APPROACH TO THE CHECKING OF VALIDITY OF 2-QUANTIFIED BOOLEAN FORMULAS IN THE HPC2QALL SOLVER

Gennady A. Oparin
Doctor of technical science, professor, Deputy Director, e-mail: prn51@icc.ru
Vera G. Bogdanova
PhD., assistant professor, senior researcher, e-mail: bvg@icc.ru
Sergey A. Gorsky
PhD., researcher, e-mail: gorskysergey@mail.ru
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The high computational complexity of some problems in the analysis of dynamics and structural-parametric synthesis for different classes of dynamic controlled systems leads to the development of methods and software for their parallel solution. Based on the Boolean constraints method, problems of qualitative analysis of the trajectories behavior of binary dynamical systems, whose operation is considered on a finite time interval, are reduced to solving Boolean satisfiability problems and checking the validity of quantified Boolean formulas. A mathematical model of the studied dynamic property is constructed as a system of Boolean equations, taking into account both the property specification and the equations of the dynamics of a specific object. Such an approach is declarative and provides the possibility of data parallelism. For verifying the validity of the quantified Boolean formulas, a parallel solver Hpc2qall was implemented. Unlike similar solvers, Hpc2qall not only produces the answer (SAT or UNSAT) but finds all values sets of universally quantified variables leading to this answer. An example is given of applying a constructive approach to solving the problem of the synthesis of stabilizing feedback.

Keywords: binary dynamic system, Boolean model, parallel 2QBF solver, qualitative analysis.

References

1. Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Parallelnaya realizatsiya logicheskogo metoda resheniya zadach kachestvennogo analiza dvoichnykh dinamicheskikh system [Parallel implementation of the logical method for solving the problems of binary dynamic systems qualitative analysis // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №4 (12). С. 145–154. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-15 (in Russian)
2. Irkutskiy superkomp'yuternyy tsentr [Irkutsk Supercomputer Center of SB RAS]. Available at: http://hpc.icc.ru/ (accessed 30.06.2019) (in Russian)

3. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Metod bulevykh ogranicheniy v kachestvennom analize dvoichnykh dinamicheskikh system [Boolean constraints method in qualitative analysis of binary dynamic systems] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Research. 2018. № 9. Pp. 19–29. DOI: 10.17513/mjpfi.12381 (in Russian)
4. Akutsu T., Hayashida M., Tamura T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks // International Conference on Algebraic Biology, 2008. Pp. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85101-1_1.
5. Becker B., Ehlers R., Lewis M., Marin P. ALLQBF Solving by Computational Learning. In: Chakraborty S., Mukund M. (eds) Automated Technology for Verification and Analysis. ATVA 2012. Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7561. Pp. 370–384. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33386-6_29.
6. Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Multiagent technology for parallel implementation of Boolean constraint method for qualitative analysis of binary dynamic systems // 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija. 2019. Pp. 1043–1048. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757154.
7. Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Scalable parallel solver of Boolean satisfiability problems // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija. 2018. Pp. 0222–0227. DOI: 10.23919/MIPRO.2018.8400042.
8. Datasets of 2QBF. Available at: http://www.qbflib.org/eval18.html (accessed 30.06.2019)
9. Li H., Wang Y. Output feedback stabilization control design for Boolean control networks // Automatica. 2013. Vol. 49(12). Pp. 3641–3645. DOI: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.09.023.
10. Nemirovskii A.A. Several NP-hard problems arising in robust stability analysis // Mathematics of Control, Signals, and Systems. 1993. Vol. 6. Pp. 99–105. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01211741.
11. Niemetz A., Preiner M., Lonsing F., Seidl M., Biere A. Resolution-Based Certificate Extraction for QBF. In: Cimatti A., Sebastiani R. (eds) Theory and Applications of Satisfiability Testing – SAT 2012. Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7317. Pp. 430–435. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31612-8_33.
12. Rabe M.N., Seshia S.A.: Incremental Determinization. In: Creignou N., Le Berre D. (eds) Theory and Applications of Satisfiability Testing – SAT 2016. Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9710. Pp. 375–392. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40970-2_23.
13. Sage Tutorial in Russian. Режим доступа: http://doc.sagemath.org/pdf/ru/tutorial/ SageTutorial_ru.pdf (дата доступа 30.06.2019)
14. Zhao Q. "A remark on "Scalar equations for synchronous Boolean networks with biological Applications" by C. Farrow, J. Heidel, J. Maloney, and J. Rogers," in IEEE Transactions on Neural Networks, 2005. Vol. 16(6). Pp. 1715–1716. DOI: 10.1109/TNN.2005.857944.

УДК 004.896, 533.6.071.4

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КООРДИНАТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Башуров Валерий Витальевич
Ведущий инженер, e-mail: bashurov@itam.nsc.ru
Губанов Дмитрий Андреевич
К.ф.-м.н., младший научный сотрудник, e-mail: gubanov@itam.nsc.ru
Запрягаев Валерий Иванович
Д.т.н., главный научный сотрудник, e-mail: zapr@itam.nsc.ru
Киселев Николай Петрович
К.ф.-м.н., научный сотрудник, e-mail: nkiselev@itam.nsc.ru
Певзнер Анна Самуиловна
Ведущий программист, e-mail: pevzner@itam.nsc.ru
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Аннотация. В статье описано автоматизированное координатное устройство, применяемое для позиционирования модели и перемещения зонда по заданной программе при экспериментальных исследованиях на вертикальной струйной установке. Подсистема сбора данных и управления позволяет задавать алгоритм перемещения датчика по двум координатам для конкретных экспериментов, в том числе по сложной траектории, как в ручном режиме от пульта управления, так и в автоматическом по заданной программе. Система управления координатным устройством является составной частью системы автоматизированного сбора экспериментальных данных на вертикальной струйной установке ИТПМ СО РАН.
Ключевые слова: автоматизация экспериментальных исследований, аэрогазодинамика, система позиционирования, сверхзвуковые струйные течения.

Цитирование: Башуров В.В., Губанов Д.А., Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Певзнер А.С. Разработка автоматизированного координатного устройства для экспериментального исследования струйных течений // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 102–110. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-09

Введение. Зондовые измерения занимают значительную долю среди методов изучения газодинамических параметров потока, при этом результаты измерений имеют высокую точность. Для получения достоверных данных требуется обеспечить достаточное быстродействие для датчика, нужную погрешность измерения, надежность, малую чувствительность к внешним воздействиям (вибрация, изменение температуры окружающей среды). При проведении экспериментальных исследований струйных течений важным параметром является точность позиционирования приемника полного давления, нити датчика термоанемометра или другого чувствительного элемента, с помощью которого определяется значение термодинамического параметра потока.

В экспериментальных исследованиях сверхзвуковых струйных течений при зондировании потока необходимо пространственное перемещение измерительного зонда.

Элементы газодинамической структуры струи, такие, как скачки уплотнения, пограничные слои, слои смешения и т.д. при малых размерах, имеют большие градиенты газодинамических параметров, что накладывает достаточно высокие требования на точность позиционирования.

Исследование пространственной картины течения сверхзвуковой неизобарической струи при наличии искусственно введенных продольных вихрей требует измерения азимутальных профилей с переменным шагом по углу. Такая постановка задачи формирует требования к автоматизированному перемещению зонда в продольном и поперечном направлениях по заданной программе с переменным шагом по пространству.

Координатное устройство К2-19 (координатник) является составной частью системы автоматизированного сбора экспериментальных данных на вертикальной струйной установке (ВСУ) ИТПМ СО РАН. Разработанные алгоритмы и система управления созданы на основе опыта создания измерительного координатника для исследования структуры потока высокоскоростных струй, истекающих из сопел сложной формы с целью выявления пространственного распределения как средних, так и пульсационных газодинамических параметров. Результаты исследования, полученные с помощью аналогичного координатника, приведены в работах [3, 6, 7].

Автоматизированное координатное устройство К2-19. Координатное устройство К2-19 (координатник) предназначено для перемещения зонда по полю размером 500х200мм по заданной программе или в ручном режиме. Зонд перемещается по двум координатам X и Y, по взаимно перпендикулярным, линейным направляющим, снабженным шарико-винтовыми парами, соединенными с шаговыми двигателями (ШД). Электронный блок выполняет команды ПЭВМ (автоматический режим) или пульта (ручной режим) и управляет ШД, то есть вырабатывает сигналы для направления вращения и количества шагов для достижения зондом заданной координаты.

С учетом имеющегося опыта создания координатников в ИТПМ СО РАН был выбран вариант контроллера на базе микропроцессора (МП) ATMega328 (рис. 1).

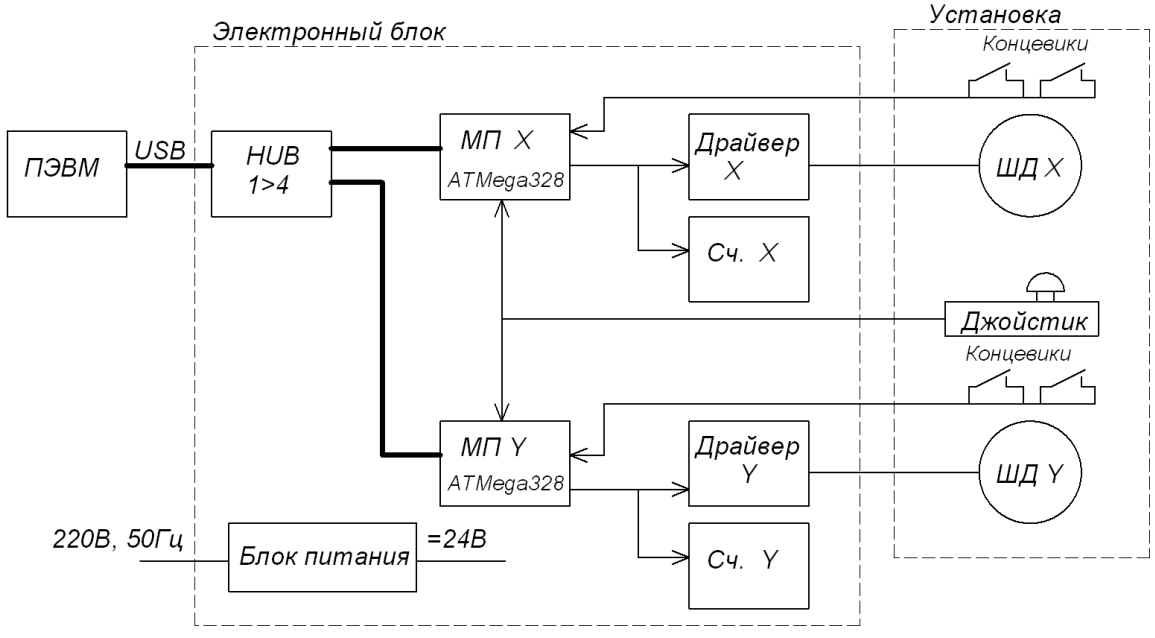


Рис. 1. Структурная схема блока электроники (БЭ) координатного устройства

Алгоритм работы К2-19. Проводя исследования, экспериментатору надо пройти определенную траекторию с остановкой и проведением измерений в нужных точках. Поскольку исследования проводятся в потоке, необходима обработка ситуации, когда по разным причинам нужная точка не достигается – то есть оператор ПЭВМ должен иметь возможность вмешаться в процесс.

Проанализировав опыт разработки подобных систем [2, 4, 8], мы постарались минимизировать обмен данными между ПЭВМ и микропроцессорами (МП) координат; выбранная система команд приведена в табл. 1.

Таблица 1. Система команд К2-19.

Название команды	Код	Входные параметры	Выходные параметры
Подать синхроимпульс	1	байт	-
Перемещение в заданную координату	2	-	4 байта данных счетчика, байт регистра статуса
Стоп	3	-	-
Сброс счетчика шагов (команда верхнего уровня)	4	-	-
Чтение счетчика шагов и состояния регистра статуса	5	-	4 байта данных счетчика, байт регистра статуса
Задать скорость	6	байт	байт

На рис. 2 приведен алгоритм работы МП. Работа начинается с анализа положения переключателя режима на передней панели БЭ. В ручном режиме, в зависимости от положения джойстика, выбираются направление и скорость перемещения. В автоматическом режиме МП ждет команды от ПЭВМ, полученная команда анализируется и выполняется. Во время перемещения в автоматическом режиме запрещены команды сброса и другого перемещения, остальные - возможны. Поскольку координаты независимы, то для каждой координаты подается отдельная команда. Так, например, для полного останова в аварийной ситуации надо послать команду «стоп» для каждой из координат отдельно - после этого доступна любая другая команда.

Координатное устройство и система автоматизированного сбора экспериментальных данных на ВСУ ИТПМ СО РАН. ВСУ используется для исследования газодинамической структуры, как затопленных сверхзвуковых струй, так и струй, взаимодействующих с преградами. Эксперименты, как правило, заключаются в проведении измерений в заданных точках.

Система сбора данных вертикальной струйной установки [2] предназначена для автоматизации калибровок датчиков и сбора экспериментальных данных; контроля измерений в течение эксперимента, а также для обеспечения хранения данных в БД «Архив экспериментальных данных» [5].

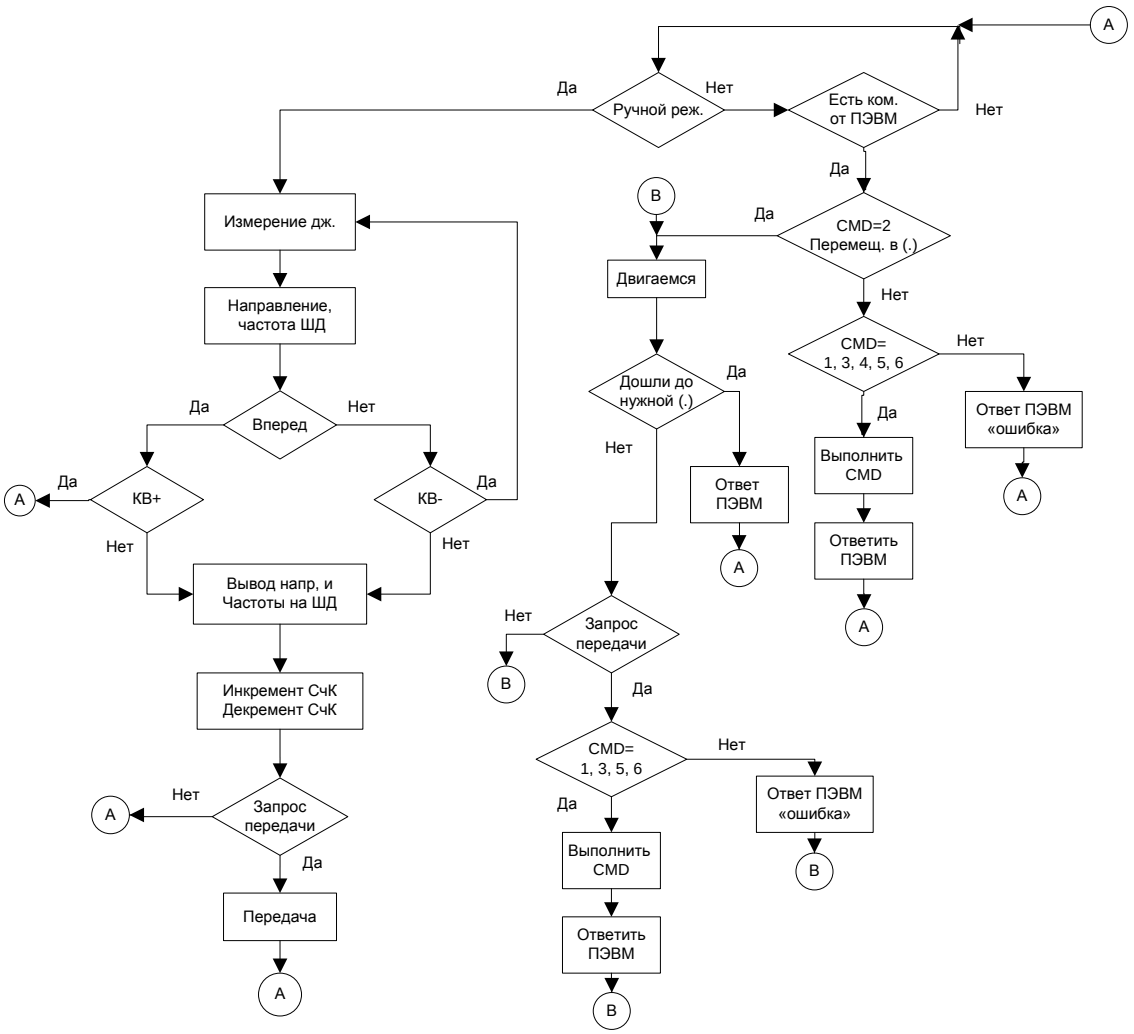


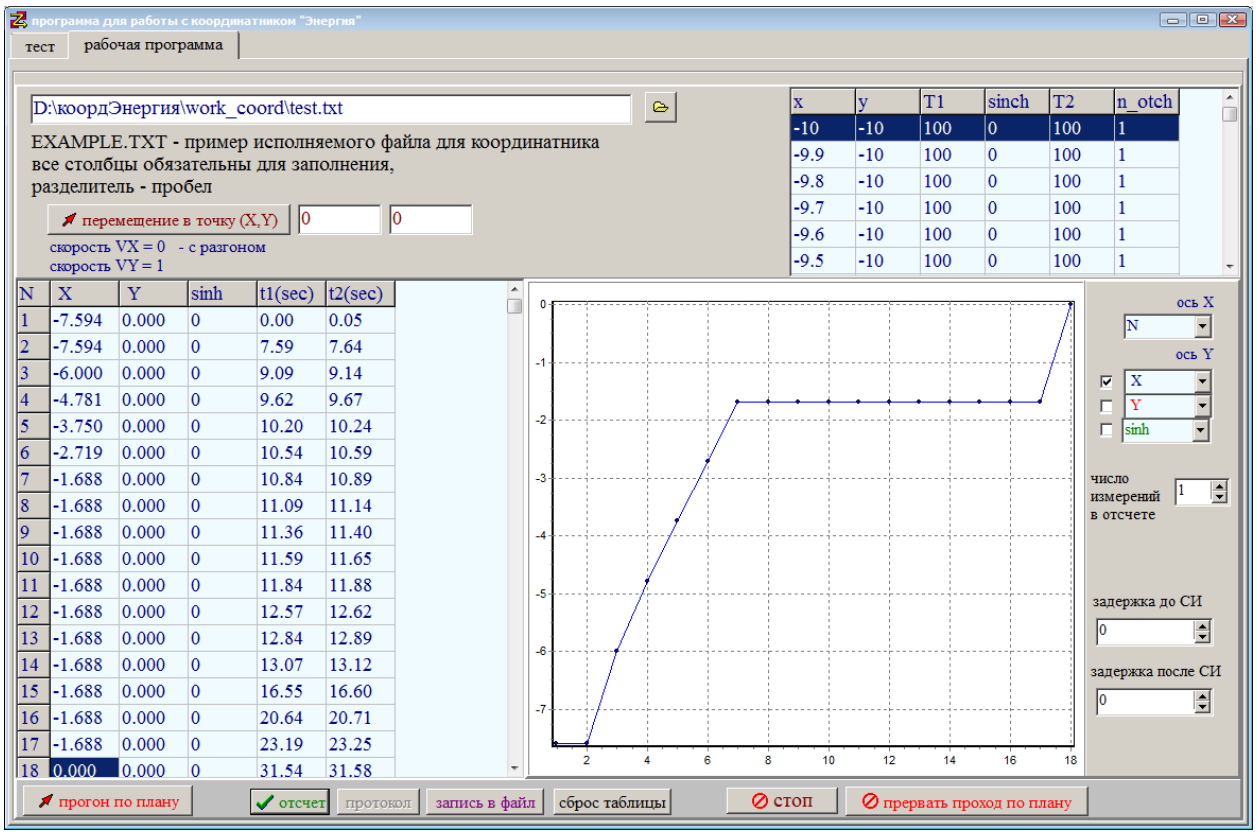
Рис. 2. Алгоритм работы МП

Для перемещения зонда в ходе эксперимента необходимо координатное устройство. Работа системы сбора данных с координатником К2-19 возможна 2-мя способами:

- включить К2-19 в систему сбора данных в качестве нового устройства;
- использовать К2-19 на отдельном рабочем месте, используя систему синхронизации.

Имеется опыт разработки и использования обоих вышеописанных вариантов систем сбора данных: на наших установках обычно используется 1-й вариант [1], а в рамках работы с РРК «Энергия» был разработан координатник, основанный на втором подходе. Первый вариант удобен тем, что все данные будут в едином протоколе, второй – позволяет связать координатник с любой (имеющей внешний запуск) системой. Пользователь может перемещаться по точкам (кнопка «перемещение в точку (X,Y)») и фиксировать в таблице значения координат (кнопка «отсчет»). Удобней и быстрей предварительно приготовить текстовый файл, который содержит план для прохождения координатником определенной траектории и содержит:

- значения координат X и Y,
- задержку на установление режима,
- наличие синхроимпульса,
- задержка на работу пользовательской системы,
- число измерений после данного перемещения.



x	y	T1	sinch	T2	n_otch
-10	-10	100	0	100	1
-9.9	-10	100	0	100	1
-9.8	-10	100	0	100	1
-9.7	-10	100	0	100	1
-9.6	-10	100	0	100	1
-9.5	-10	100	0	100	1

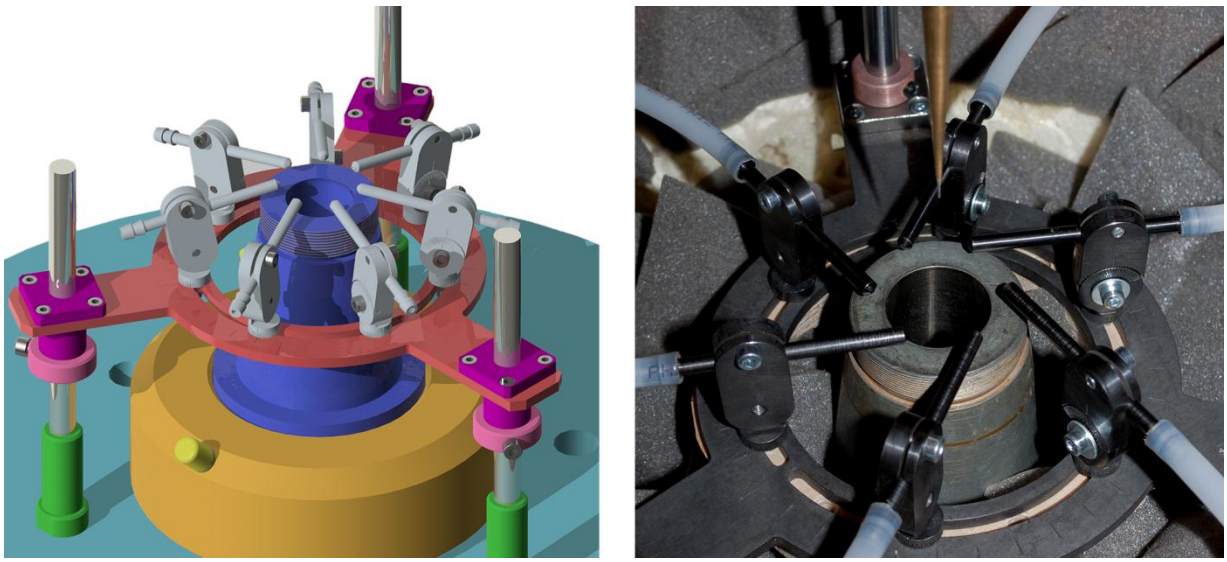
N	X	Y	sinh	t1(sec)	t2(sec)
1	-7.594	0.000	0	0.00	0.05
2	-7.594	0.000	0	7.59	7.64
3	-6.000	0.000	0	9.09	9.14
4	-4.781	0.000	0	9.62	9.67
5	-3.750	0.000	0	10.20	10.24
6	-2.719	0.000	0	10.54	10.59
7	-1.688	0.000	0	10.84	10.89
8	-1.688	0.000	0	11.09	11.14
9	-1.688	0.000	0	11.36	11.40
10	-1.688	0.000	0	11.59	11.65
11	-1.688	0.000	0	11.84	11.88
12	-1.688	0.000	0	12.57	12.62
13	-1.688	0.000	0	12.84	12.89
14	-1.688	0.000	0	13.07	13.12
15	-1.688	0.000	0	16.55	16.60
16	-1.688	0.000	0	20.64	20.71
17	-1.688	0.000	0	23.19	23.25
18	0.000	0.000	0	31.54	31.58

Рис. 3. Работа с координатником по заданному алгоритму (плану)

Работа начинается с выбора файла, содержащего план для координатника (кнопка «открыть»). Выбранный план отобразится в верхней правой таблице и пользователь может его посмотреть (если в плане – ошибки, то они будут заметны). После этого в левом нижнем углу в панели кнопок появится кнопка «прогон по плану», нажав которую, можно запустить выполнение заданного плана (рис. 3). Измеренные значения координат отображаются в левой нижней таблице. Соседняя с этой таблицей панель графика позволяет просмотреть полученные значения в табличном виде. На нижней панели есть еще несколько кнопок:

- «прервать проход по плану» - аварийный останов выполнения плана;
- «стоп» - остановить;
- «сброс таблицы» - удалить данные из таблицы;
- «запись в файл» - записать данные из таблицы в текстовый файл;
- «протокол» - просмотреть записанный файл.

С использованием системы автоматизированного сбора данных проведены параметрические исследования влияния вихрегенераторов – микроструй, вдуваемых в основной поток, на структуру образования продольных вихрей в слое смешения сверхзвуковой неизобарической струи M_a=1, N_{pr}=5, истекающей в затопленное пространство. Протестировано десять различных конфигураций, в которых газодинамические и геометрические параметры микроструй, такие, как давление микроструй, расстояние вдува от среза основного сопла, азимутальный, тангенциальный и осевой углы наклона микросопел изменялись по одному. Для этого использовалась микросопловая установка, состоящая из независимых модулей, расположенных на общей направляющей пластине (рис. 4). Это дает свободу в конфигурировании установки, но осложняет монтаж.

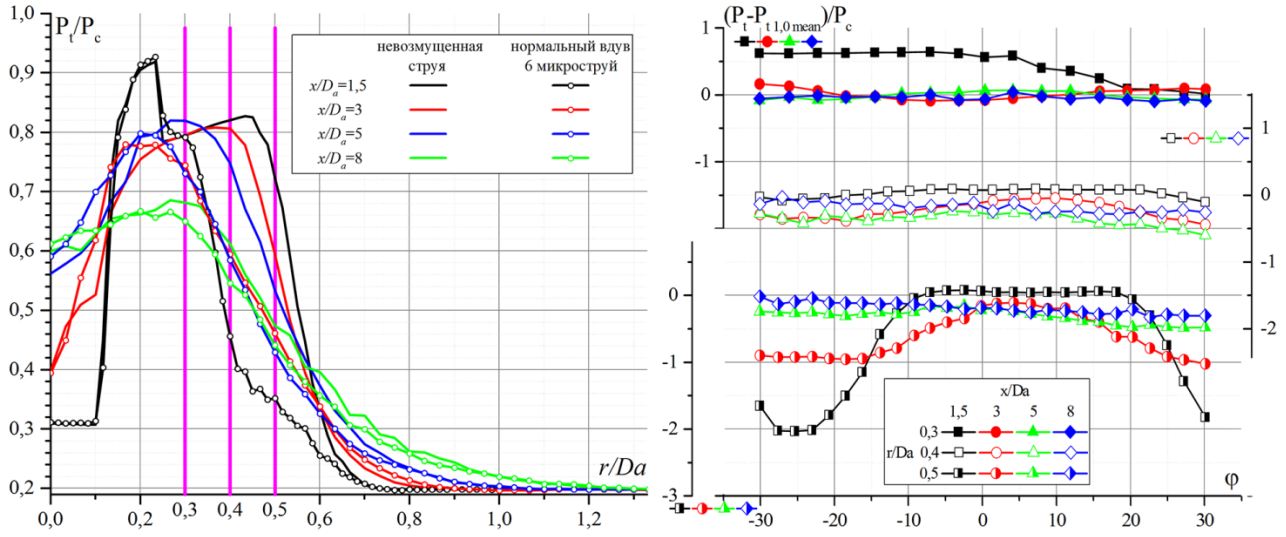


а) *б)*

Рис. 4. Изображение микросопловой установки в двух конфигурациях

Для точного позиционирования элементов установки использовалось координатное устройство К2-19, на котором был закреплен измерительный зонд в виде трубки Пито диаметром 0,6 мм. По известной геометрии микросопловой установки были вычислены необходимые координаты зонда относительно позиционируемых элементов. Осуществлялось последовательное перемещение зонда и фиксация винтовыми соединениями микросопловых модулей.

На рис. 5 представлены примеры полученных радиальных и азимутальных профилей относительного давления Пито по результатам зондовых измерений с использованием координатного устройства.



а) *б)*

Рис. 5. Радиальные (*а*) и азимутальные (*б*) профили распределения относительного давления Пито невозмущенной струи и с вдувом микроструй различных конфигураций: нормальный вдув 6 (а) микроструй и вдув 6 микроструй с тангенциальным углом 30° (*б*)

Зарегистрировано образование области пониженного давления в следе за точкой взаимодействия микроструи с потоком основной струи. Область основного влияния располагается близи внешней границы струи.

Заключение. В статье описан алгоритм работы автоматизированного координатного устройства и принцип управления, используемый при проведении экспериментальных исследований струйных течений на вертикальной струйной установке ИТПМ СО РАН.

В результате оснащения экспериментальной установки данной системой позиционирования появилась возможность получать подробные и достоверные результаты о пространственном распределении газодинамических параметров исследуемого течения.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0) и частично в рамках научного проекта РФФИ №18-38-00183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башуров В.В., Запрягаев В.И., Кавун И.Н., Певзнер А.С. Система синхронизации сбора данных и её применение для исследования сверхзвуковых течений // Труды XVII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть II. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2012. С. 37–44.
2. Башуров В.В., Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Певзнер А.С. Система сбора данных вертикальной струйной установки и ее применение для исследования течений // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2013. С. 110–116.
3. Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Пивоваров А.А., Кавун И.Н., Бойко В.М. Влияние шевронов на структуру течения сверхзвуковой неизобарической струи // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. Т.49. С. 5–17. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.49.01.
4. Запрягаев В.И., Певзнер А.С., Тютин А.А., Гаркуша В.В., Хорошенко Е.И., Яковлев В.В. Подсистемы позиционирования, используемые в аэродинамических установках периодического действия // Труды XV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2010. С. 172–179.
5. Локотко А.В., Певзнер А.С., Яковлева Н.В. Программный комплекс сбора, обработки и хранения данных аэродинамического эксперимента // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2017. № 2(6). С. 123−131.
6. Соболев А.В., Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Губанов Д.А., Кундасев С.Г. Исследование турбулентной структуры сверхзвуковой струи с большим числом Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т.25. No.4. С. 495–504.
7. Dyad'kin A.A., Sukhorukov V.P., Rybak S.P., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Kundasev S.G., Sobolev A.V., Gubanov D.A. Simulation of the reentry vehicle supersonic brake jets interaction with landing surface // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017) (Italy, Milano, 3-6 july, 2017): Proceedings. S.l. 2017. Pp. 1–9. DOI: 10.13009/EUCASS2017-116.

8. Garkusha V.V., Zapryagaev V.I., Pevzner A.S., Yakovlev V.V., Yakovleva N.V. Automated system for experimental data acquisition, stored and processing // International Association of Science and Technology for Development, Research: Abstracts. Pt. II. Kazan. 2012. August 19 – 25. Pp. 102–104.

UDK 004.896, 533.6.071.4

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED AXIS MOTION DEVICE FOR THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF JET FLOW

Valeriy V. Bashurov
Principal Engineer, e-mail: bashurov@itam.nsc.ru
Dmitriy A. Gubanov
PhD., Junior Researcher, e-mail: gubanov@itam.nsc.ru
Valeriy I. Zapryagaev
Doctor of Engineering Sciences, Prof., Head of Laboratory "Experimental aerogasdynamics", e-mail: zapr@itam.nsc.ru
Nikolay P. Kiselev
PhD., Researcher, e-mail: nkiselev@itam.nsc.ru
Anna S. Pevzner
Principal Software Engineer, e-mail: pevzner@itam.nsc.ru
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,
Institutskaya str., 4/1, 630090, Novosibirsk, Russia

Abstract. This paper describes the automated axis motion device used to positioning of model and movement of the probe on the set program at experimental research on vertical jet facility. The subsystem of data collection and management allows to set an algorithm of movement of model on two coordinates for specific experiments, including on a difficult trajectory both in the manual mode from the control panel, and in automatic from a workplace of the experimenter. The management system the axis controller is a component of a system of the automated collecting experimental data on the vertical jet facility of ITAM SB RAS.

Keywords: automation of experimental researches, aerogasdynamics, axis motion device, supersonic jet flows.

References

1. Bashurov V.V., Zaprjagaev V.I., Kavun I.N., Pevzner A.S. Sistema sinhronizacii sbora dannyh i ejo primenenie dlja issledovanija sverhzvukovyh techenij [System for synchronization of data acquisition and its application for supersonic flow investigations] // Trudy XVII Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii». Chast' II. = Works XVII of the Baikal Russian conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management" № 2. Irkutsk. ISJeM SO RAN = ESI SB RAS. 2012. Pp. 37–44. (in Russian)

2. Bashurov V.V., Zaprjagaev V.I., Kiselev N.P., Pevzner A.S. Sistema sbora dannyh vertikal'noj strujnoj ustanovki i ee primenenie dlja issledovanija techenij [Data acquisition system for a vertical jet facility and its application for flow analysis] // Trudy XVIII Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii». Ch. III. = Works XVIII of the Baikal Russian conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management" № 3. Irkutsk. ISJeM SO RAN = ESI SB RAS. 2013. Pp. 110–116. (in Russian)
3. Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Pivovarov A.A., Kavun I.N., Boiko V.M. Influence Vlijanie shevronov na strukturu techenija sverhzvukovoj neizobaricheskoj strui [Chevrons influence on nonisobaric supersonic jet shock-wave pattern] // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika = Herald of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace technics. 2017. T.49. Pp. 5–17. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.49.01. (in Russian)
4. Zaprjagaev V.I., Pevzner A.S., Tjutin A.A., Garkusha V.V., Horoshenko E.I., Jakovlev V.V. Podsistemy pozicionirovanija, ispol'zuemye v ajerodinamicheskih ustanovkah periodicheskogo dejstvija [Positioning subsystems used in blowdown wind tunnels] // Trudy XV Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii». Ch. III. = Works XV of the Baikal Russian conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management" № 3. Irkutsk. ISJeM SO RAN = ESI SB RAS. 2010. Pp. 172–179. (in Russian)
5. Lokotko A.V., Pevzner A.S., Jakovleva N.V. Programmnyj kompleks sbora, obrabotki i hranenija dannyh ajerodinamicheskogo jeksperimenta [Program complex of data acquisition, processing and storage applied to an aerodynamic experiment] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. Irkutsk. ISJeM SO RAN = ESI SB RAS. 2017. № 2(6). Pp. 123–131. (in Russian)
6. Sobolev A.V., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Gubanov D.A., Kundasev S.G. Turbulent structure in supersonic jets with a high Reynolds number // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. Vol. 25. No. 4. Pp. 473–481. DOI: 10.1134/S0869864318040017.
7. Dyad'kin A.A., Sukhorukov V.P., Rybak S.P., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Kundasev S.G., Sobolev A.V., Gubanov D.A. Simulation of the reentry vehicle supersonic brake jets interaction with landing surface // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017) (Italy, Milano, 3-6 july, 2017) : Proceedings. S.l. 2017. Pp. 1–9. DOI: 10.13009/EUCASS2017-116.
8. Garkusha V.V., Zapryagaev V.I., Pevzner A.S., Yakovlev V.V., Yakovleva N.V. Automated system for experimental data acquisition, stored and processing // International Association of Science and Technology for Development, Research: Abstracts. Pt. II. Kazan. 2012. August 19 – 25. Pp. 102–104.

УДК 620.92

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

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
Кашникова Инна Васильевна
К.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры менеджмента,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: innabseu@mail.ru
Богдан Игорь Тадеушевич
Зав. сектором «Развитие энергетики»,
Научно-исследовательский экономический институт Министерства экономики,
220086, г. Минск, ул. Славинского 1/1, e-mail: trud33@tut.by

Аннотация. В статье дается характеристика энергетической системы Республики Беларусь, предложена и решена задача моделирования оптимальной структуры энергопроизводства с нечеткими параметрами. В качестве нечетких параметров были использованы спрос на электро- и теплоэнергию. В результате использования предложенной модели была получена оптимальная структура энергопроизводства Республики Беларусь, в которой объемы производства каждой станции принимают нечеткое значение.

Ключевые слова: Белорусская энергетическая система, прогнозирование оптимальной структуры энергопроизводства, математическое программирование с нечеткими параметрами.

Цитирование: Зорина Т.Г., Кашникова И.В., Богдан И.Т. Развитие методов прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства Республики Беларусь с использованием методов нечеткого математического программирования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 111–120. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-10

Введение. Энергетическая система относится к классу сложных систем. Она объединяет огромное число элементов, отличается многообразием внутренних связей и связей с другими системами (природная среда, экономика страны и т.д.). В связи с этим при разработке стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь целесообразно использовать экономико-математические модели.

В основе настоящего исследования сложных систем с использованием математического моделирования лежит системный подход, конечной целью которого является системное проектирование, направленное на построение системы с заданным качеством. В свою очередь системное проектирование базируется на результатах системного анализа, позволяющего выявить причинно-следственные связи между параметрами и характеристиками исследуемой системы, реализуемого с использованием математических

моделей, которые позволяют прогнозировать эффект, достигаемый при изменении структурно-функциональных параметров системы и параметров нагрузки [8].

1. Характеристика Белорусской энергетической системы. В настоящее время в Республике Беларусь деятельностью электроэнергетического комплекса (электростанции, котельные, электрические и тепловые сети) управляет Государственное производственное объединение «Белэнерго». Это ведущая организация в области производства и распределения электрической и тепловой энергии. Данные по общей установленной мощности Белорусской энергетической системы (БЭС) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Установленная мощность БЭС на 01.01.2019 г. [2]

Категория энергообъекта	Количество	Установленная электрическая мощность, МВт	Удельный вес, %
Энергоисточники ГПО «Белэнерго» всего, в т.ч.:	68	8938,34	88,77
1 Тепловые электростанции всего, в т.ч.:	42	8841,08	87,81
1.1 Тепловые электростанции высокого давления	12	8187,57	81,32
1.2 Малые тепловые электростанции	30	653,51	6,49
2 Гидроэлектростанции (ГЭС)	25	88,26	0,88
3 Ветроэлектростанции (ВЭС)	1	9,00	0,09
Эноргоисточники не входящие в состав ГПО «Белэнерго» всего, в т.ч.:	-	1130,34	11,23
1 Ветроэлектростанции (ВЭС)	-	92,10	0,91
2 Энергоисточники, работающие на ВИЭ	-	201,10	2,00
3 Блок-станции	-	837,14	8,31
ИТОГО по всем энергоисточникам	-	10068,68	100,00

Установленная мощность генерирующих энергоисточников БЭС составляет 10068,68 МВт., удельный вес энергоисточников ГПО «Белэнерго» – 88.77%. В технологическом разрезе электроэнергетика представлена генерирующими станциями, а также электро- и теплосетями, передающими от них электро- и теплоэнергию к потребителям. ГПО «Белэнерго» – монополист на внутреннем рынке электроэнергии. Тепло- и электросети являются филиалами областных подразделений компании. Тарифы на тепло и электроэнергию регулируются государством. БЭС представлена линиями электропередачи 220-330 кВ, подстанциями 220-330 кВ и распределительными устройствами электростанций высокого давления.

Тенденции, характерные для электроэнергетики Республики Беларусь:

- доминирование объектов тепловой энергетики (87,81% в БЭС);
- низкий уровень энергоисточников, работающих на ВИЭ (3,88% в БЭС);
- невысокая степень развития объектов распределенной генерации;
- низкий уровень автоматизации учета потребления электрической энергии;
- введение в эксплуатацию в 2020 г. Белорусской атомной электростанции [4, 7].

2. Построение модели прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства. В основе структуры БЭС находятся энергообъекты разных видов. По первичному энергоресурсу, потребляемому для производства электрической и тепловой энергии, они подразделяются на:

– теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) – производят тепловую и электрическую энергию, работают на газе и мазуте (в соотношении 95:5) или только на газе;

– конденсационные электростанции (КЭС) - производят электрическую энергию и работают, в зависимости от типа станции, на газе или на газе и мазуте (в соотношении 95:5);

– блок-станции - производят тепловую и электрическую энергию, работают на газе;

– атомная электростанция (АЭС) – производит электрическую энергию на основе ядерного топлива;

– гидроэлектростанции (ГЭС) – производят электрическую энергию, в качестве источника энергии используют энергию водного потока;

– ветровые электростанции (ВЭС) – производят электроэнергию за счет энергии ветра;

– солнечные электростанции (СЭС) – производят электроэнергию за счет энергии солнца;

– котельные – производят тепловую энергию и работают или на газе и мазуте (КОТ 1), или на торфе и дровах (КОТ 2).

Все перечисленные типы энергообъектов обладают разными экономическими и техническими характеристиками. Основные показатели, которые включены в модель: годовые эксплуатационные затраты, установленная мощность, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), расход топлива.

Цель моделирования энергосистемы – спрогнозировать нагрузку каждого типа энерообъектов таким образом, чтобы минимизировать совокупные эксплуатационные затраты.

Введем следующие переменные:

Z_{nmlt} - количество сырья *m*, потребленного станцией n для производства энергии вида *l* в период *t*;

U_{nmlt} - производство энергии вида *l* станцией n на сырье вида m в период *t*;

R_{mt} - добыча ресурса вида *m* в период *t*;

I_{mt} - импорт ресурса вида *m* в период *t*;

I_{et} - импорт энергии в период *t*;

vom_{nm} - переменные затраты станции n при работе на ресурсе *m*;

c_{lt} - стоимость ресурса l в период *t*;

ci_{lt} - стоимость импортируемого ресурса *l* в период *t*;

k_{nmlt} - КИУМ *n* –станции, работающей на *m* –виде ресурсов, производящей *l* вид энергии в период *t*;

pov_{nt} - мощность *n*- ой станции в период *t*;

U_{lt} - величина спроса на энергию *l* в период *t* (задается нечетким числом);

$\overline{R}_{lt}$ - ограничения по добыче ресурса *l* в период *t*.

Критерием оптимальности модели являются суммарные эксплуатационные затраты. Они включают в себя капитальные, постоянные и переменные затраты. Итак, целевая функция включает переменные затраты, затраты на ресурсы и затраты на импорт электроэнергии. Первое слагаемое целевой функции описывает затраты на закупку ресурсов, второе – переменные затраты на обслуживание станций, третье – затраты на импорт электроэнергии. Суммирование по t задает динамику по годам:

$$f = \sum_{l}\sum_{t} R_{mt}c_{mt} + I_{mt}ci_{mt} + \sum_{n}\left(\sum_{m}\sum_{t}\left(\left(\sum_{l} U_{nmlt}\right)vom_{mt}\right)\right) + \sum_{t}\sum_{l} I_{et}ci_{et} \to \min \quad (1)$$

Ограничения можно разделить на несколько групп:

1. Балансовые соотношения по распределению ресурсов показывают объемы потребленного ресурса с учетом ограничений по их добыче. Такие соотношения в модели описывают балансы по мазуту, торфу, дровам, ядерному топливу. По условию, ограничений на закупку газа не установлено. Кроме того, учитывается, что каждый ресурс поступает из одного источника – либо собственная добыча, либо импорт.

$$\sum_{n,l} z_{nmlt} \le R_{mt} + I_{mt} \quad (2)$$

2. Ограничения по мощности станций. Это ограничение показывает максимальные объемы производимой энергии каждой из станций.

$$\sum_{m,l} U_{nmlt} \le pov_{nt} \quad (3)$$

Здесь необходимо учесть взаимосвязь между параметрами:

$$U_{nmlt} = k_{nmlt} z_{nmlt} \quad (4)$$

Это уравнение показывает взаимосвязь между потребленным количеством ресурса и произведенной энергией.

3. Условие по нормам потребления ресурсов:

$$z_{mt} \le 0{,}05(z_{mt} + z_{gt}) \qquad t = 2000{,}2025 \quad (5)$$

4. Ограничения по потреблению сырья:

$$R_{mt} \le \overline{R}_{mt} \quad (6)$$

5. Ограничение по спросу на энергию.

$$\sum_{n}\sum_{m} U_{nmlt}E_{\mathrm{lt}} + I_{lt} \ge U_{lt} \quad (7)$$

Левая часть ограничения описывает количество произведенной и закупленной энергии, правая – прогнозируемый спрос на энергию (электрическую либо тепловую). Коэффициент E_{lt}=0,97. Он учитывает технологические потери при передаче энергии [5].

3. Разработка прогноза оптимальной структуры энергопроизводства на среднесрочный период. С целью апробации предложенной модели нами был рассчитан прогноз оптимальной структуры энергопроизводства в Республике Беларусь на период 2019-2025 гг. При этом энергообъекты БЭС для прогнозирования были представлены в укрупненном виде. Исходные данные для прогнозирования, характеризующие основные параметры энергообъектов, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные для прогноза: основные параметры энергообъектов БЭС[1]

Показатели	Мощность станции, МВт	КПД		Переменные затраты, долл. США/кВт*год	Постоянные затраты, долл. США/кВт/год	Капитальные затраты, долл. США/кВт
		электрическое	тепловое			
ТЭЦ	4130	0,2	0,6	31,2	33,6	813,8
КЭС	4700	0,56		4,9	17,8	8000
Блок-станции	807	0,4	0,54	10,5	24	1200
АЭС	1200	0,34		3	52	3500
ГЭС	88,2	1		3,5	9,4	3500
ВЭС	9	0,17		10,5	29,3	1800
СЭС	152,6	0,27		0	11,68	1860
КОТ 1 (газ/мазут)	300		0,88/0,86	16	7,5	200
КОТ 2	50		0,6	22	10	300

Кроме того, были заданы прогнозы производства и закупок ресурсов и прогнозы цен на ресурсы. Отметим, что газ, мазут и ядерное топливо являются импортируемыми ресурсами, а торф, дрова – собственными. Потребление мазута ограничено планом закупок, потребление ядерного топлива ограничено мощностью АЭС, потребление торфа и дров ограничено возможностями его производства. Объемы закупок газа не ограничены (табл. 3).

Таблица 3. Исходные данные для прогноза: цены на ресурсы и ограничения по их потреблению

Год	Газ	Мазут		Ядерное топливо		Торф		Дрова	
	цена, долл. США/кВт*год	цена, долл. США/кВт*год	потребление МВт*год	цена, долл. США/кВт*год	потребление МВт*год	цена, долл. США/кВт*год	потребление МВт*год	цена, долл. США/кВт*год	потребление МВт*год
2019	168,97	200,09	700	98,2		127,02	1097	120,34	2082
2020	174,73	198,75	700	103,11	1000	130,78	1097	123,88	2082
2021	180,70	197,42	700	108,27	2000	134,00	1097	127,50	2082
2022	186,88	196,12	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2023	193,26	195,04	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2024	199,88	193,76	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2025	206,71	192,5	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082

В качестве исходных данных использовались результаты прогнозирования потребления электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь в 2019-2025 гг. (табл. 4).

[1] Здесь и далее в таблицах 3-4 показатели представлены в единицах измерения, используемых в расчетной модели

Таблица 4. Исходные данные для прогноза: потребление электрической и тепловой энергии

Год	Потребление			
	Электрической энергии		Тепловой энергии	
	МВт*год	млрд. кВт*ч	МВт*год	тыс Гкал
2019	4783,11	41900,04	8879,29	66880,98
2020	4832,19	42329,98	8871,03	66818,76
2021	4880,52	42753,36	8869,54	66807,54
2022	4929,32	43180,84	8885,41	66927,08
2023	4978,61	43612,62	8915,43	67153,20
2024	5028,39	44048,70	8957,82	67472,49
2025	5084,68	44541,80	9003,75	67818,44

Полученные результаты моделирования можно представить в виде трех блоков.

Первый блок описывает оптимальную структуру производства электрической энергии различными типами энергообъектов (табл. 5).

Таблица 5. Результаты моделирования: производство электрической энергии различными типами энергообъектов

Год	Производство электрической энергии, млрд кВт*ч						
	ТЭЦ	КЭС	Блок-станции	АЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
2019	24110,94	9808,13	7069,32	0,00	438,00	438,00	1331,52
2020	24085,53	1182,16	7069,32	8760,00	772,63	438,00	1331,52
2021	26288,94	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	707,37
2022	26288,94	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	707,37
2023	26381,18	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	1060,22
2024	26511,53	0,00	0,00	17520,00	48,00	0,00	1331,52
2025	26652,65	0,00	0,00	17520,00	415,14	0,00	1331,52

Анализируя результаты, представленные в таблице 5, можно сделать вывод, что наиболее целесообразным с точки зрения минимизации затрат в прогнозируемом периоде будет производство электрической энергии на ТЭЦ, АЭС и СЭС. Вместе с тем, ГЭС являются более экономически эффективными, чем ВЭС, КЭС и блок-станции. Однако, следует отметить, что с помощью КЭС целесообразно покрывать нагрузку в пиковые периоды, поэтому полностью исключить их из структуры энергопроизводства после ввода АЭС не представляется возможным.

Второй блок описывает оптимальную структуру производства тепловой энергии различными типами энергообъектов (табл. 6).

Анализируя результаты, представленные в таблице 6, можно сделать вывод, что наиболее целесообразным с точки зрения минимизации затрат в прогнозируемом периоде будет производство тепловой энергии на ТЭЦ. После ввода в эксплуатацию АЭС, снижения объемов производства на блок станциях, с учетом изменений цен на ресурсы в прогнозируемом периоде более низкими эксплуатационными затратами будут характеризоваться котельные на газе и дровах.

Таблица 6. Результаты моделирования: производство тепловой энергии различными типами энергообъектов

Год	Производство тепловой энергии, тыс. Гкал					
	ТЭЦ	Блок-станции	КОТ 1		КОТ 2	
			газ	мазут	торф	дрова
2019	62195,02	8206,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2020	62129,57	8206,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2021	67813,25	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2022	67813,25	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2023	68051,27	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2024	68387,35	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2025	68751,54	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61

Третий блок описывает требуемые объемы ресурсов для оптимального функционирования БЭС (табл. 7).

Таблица 7. Результаты моделирования: требуемые объемы ресурсов

Год	Потребление ресурсов, тыс. т. у.т.				
	газ	мазут	ядерное топливо	торф	дрова
2019	19156,33	0,00	0,00	0,00	0,00
2020	17246,08	0,00	3169,06	0,00	0,00
2021	16487,06	18,38	6338,11	0,00	89,79
2022	16517,06	18,38	6338,11	0,00	89,79
2023	16573,80	18,38	6338,11	0,00	89,79
2024	16653,93	18,38	6338,11	0,00	89,79
2025	16740,75	18,38	6338,11	0,00	89,79

На протяжении прогнозируемого периода доминирующим ресурсом для производства электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь останется природный газ.

4. Прогноз оптимальной структуры энергопроизводства с нечеткими входными данными. Можно отметить, что ряд параметров модели (1-7) являются недетерминированными. Прежде, всего, это объемы потребления электро- и теплоэнергии. На сегодняшний день разработаны методики, использующиеся для прогнозирования спроса на энергию, однако все они обладают рядом недостатков. В данной ситуации имеет смысл рассматривать параметры модели в виде нечетких треугольных чисел $A= (a_{min}, a, a_{max})$. Эти числа моделируют высказывание следующего вида: «параметр А приблизительно равен a и однозначно находится в диапазоне $[a_{min}, a_{max}]$». Такой подход позволяет учесть и проанализировать более широкий объем информации [6]. Задача (1-7) в результате будет преобразована в задачу математического программирования с нечеткими параметрами [2].

В рамках предложенной модели сущность методики поиска оптимального решения задачи линейного программирования с нечеткими параметрами будет заключаться в аппроксимации нечетких ограничений задачи детерминированным эквивалентом. Детерминированные ограничения строятся на основе понятия α-уровня. Подмножеством α - уровня некоторого множества A называется множество $A_\alpha = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\}$ [9].

Можно показать, что на каждом α - уровне нечеткое число будет представлено в виде интервала $\left[x_{\min}^{\alpha}, x_{\max}^{\alpha}\right]$, а в задаче (1-7) ограничение (7) для каждого α - уровня будет представлять собой совокупность ограничений:

$$\sum_{n}\sum_{m} U_{nmlt} E_{\text{lt}} + I_{lt} + y_{lt} \geq [U_{lt}]_{\min}^{\alpha} \tag{8}$$

$$\sum_{n}\sum_{m} U_{nmlt} E_{\text{lt}} + I_{lt} + y_{lt} \leq [U_{lt}]_{\max}^{\alpha} \tag{9}$$

Таким образом, процесс решения задачи линейной оптимизации с нечеткими коэффициентами можно представить как совокупность обычных задач линейного программирования на всевозможных множествах уровня допустимых альтернатив. Если альтернатива x_0 есть решение задачи (1-6), (8), (9) на множестве уровня α, то можно считать, что число α есть степень принадлежности альтернативы x_0 нечеткому множеству решений исходной задачи. Перебрав, таким образом, всевозможные значения α, мы построим функцию принадлежности нечеткого решения [1].

Заключение. Процессы функционирования реальных систем практически невозможно описать детально ввиду их сложности. Основная проблема при разработке модели состоит в нахождении компромисса между простотой ее описания (что необходимо для её исследования математическими методами) и необходимостью учета многочисленных особенностей, присущих реальной системе. Попытка построить единую универсальную модель сложной системы обречена на неудачу ввиду ее необозримости и невозможности расчета. Кроме того, при моделировании необходимо учитывать влияние факторов неопределенности исходной информации.

Построение модели функционирования энергопроизводства происходит в условиях неполной информации о будущем потреблении энергоресурсов, о выполнении плана производства и планов функционирования энергообъектов. Процессы управления энергосистемой сопровождаются случайными помехами, статистические закономерности которых не всегда могут быть определены и учтены. Тем не менее, учет неопределенности позволяет более адекватно отразить свойства рассматриваемой системы, и, следовательно, принимать более обоснованные решения по управлению электроэнергетической системой [10].

Анализируя предлагаемую методику, можно заметить, что за гибкость приходится платить ценой увеличения размерности задачи. Фактически исходная задача с ограничениями по включению преобразуется в задачу с ограничениями в виде неравенств, с которыми легко обращаться; при этом такая цена не слишком высока, поскольку сохраняется возможность использования хорошо разработанных классических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат. 1991. 240 с.
2. ГПО «Белэнерго». Режим доступа: http://www.energo.by/ (дата обращения: 02.04.2019).
3. Зайченко Ю.П. Исследование операций: Нечеткая оптимизация: Учеб. пособие. К.: Выща шк. 1991. 191 с.
4. Зорина Т.Г. Стратегия устойчивого развития энергетики Республики Беларусь: анализ и основные тенденции // Экономическая наука сегодня. 2017. № 5. С. 168–190.

5. Зорина Т.Г., Кашникова И.В. Разработка стратегии развития энергетической системы РБ на основе модели оптимального планирования энергопроизводства с нечеткими параметрами // Экономика и управление. 2013. № 4 (36). С. 49–53.
6. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2005. 416 с.
7. Рак В.А. Перспективы развития энергетики в Республике Беларусь. Режим доступа: https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya_energetika/perspektivy_razvitiya_energetiki_v_respublike_belarus/ (дата обращения: 02.04.2019).
8. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. К.: МАУП. 2003. 368 с.
9. Яхъяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие. М.: Интернет - Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006. 316 с.
10. Levchenko S.A., Zoryna T.G. Simulation veracity at construction long-term energy systems modeling // Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future. Book of abstracts of International Conference of Humboldt-Kolleg Series in Minsk. Минск: ИТМО. 2010. Pp. 263.

UDK 620.92

DEVELOPMENT OF METHODS FOR FORECASTING THE OPTIMAL STRUCTURE OF ENERGY PRODUCTION OF THE BELARUS REPUBLIC USING THE FUZZY MATHEMATICAL PROGRAMMING METHODS

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
Ina V. Kashnikava
PhD, Associate professor, Associate Professor of Management Department,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovki Str., 220013, Minsk, Belarus , e-mail: innabseu@mail.ru
Igar T. Bohdan
Head Sector "Energy Development",
Research Economic Institute of the Ministry of Economics,
1/1, Slavinskogo Str., 220086, Minsk, Belarus, e-mail: trud33@tut.by

Abstract. The article describes the characteristics of the energy system of the Belarus Republic, proposes and solves the problem of the optimal structure modeling of energy production with fuzzy parameters. As fuzzy parameters were used the demand for electricity and heat. As a result of the use of the proposed model, the optimal structure of the energy production of the Belarus Republic was obtained, in which the production volumes of each station take an fuzzy value.

Keywords: Belarusian energy system, forecasting the optimal structure of energy production, mathematical programming with fuzzy parameters.

References

1. Aliev R.A., Tserkovnyiy A.E., Mamedova G.A. Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy ishodnoy informatsii [Production management with fuzzy baseline information]. Moscow. Energoatomizdat = Publishing house "Energoatomizdat". 1991. 240 p. (in Russian)
2. GPO «Belenergo» [SPA "Belenergo"]. Available at: http://www.energo.by/ (accessed 02.04.2019). (in Russian)
3. Zaychenko Yu.P. Issledovanie operatsiy: Nechetkaya optimizatsiya: Ucheb. posobie. [Operations Research: Fuzzy Optimization: A Tutorial]. Kiev. Vyischa shkola = Publishing house “High school”. 1991. 191 p. (in Russian)
4. Zoryna T.G. Strategiya ustoychivogo razvitiya energetiki Respubliki Belarus: analiz i osnovnyie tendentsii [Sustainable Energy Development Strategy of the Republic of Belarus: analysis and main trends] // Ekonomicheskaya nauka segodnya = Economic science today. 2017. No 5. Pp. 168–190. (in Russian)
5. Zoryna T.G., Kashnikava I.V. Razrabotka strategii razvitiya energeticheskoj sistemy RB na osnove modeli optimal'nogo planirovaniya energoproizvodstva s nechetkimi parametrami [Elaboration of a development strategy of the energy system of the Republic of Belarus on the basis of optimal planning model of energy production with fuzzy parameters] // Ekonomika i upravlenie = Economics and Management. 2013. No 4 (36). Pp. 49–53 (in Russian)
6. Lyu B. Teoriya i praktika neopredelennogo programmirovaniya [Theory and practice of uncertain programming]. Moscow. Binom. Laboratoriya znanij = Publishing House “Binom. Knowledge Laboratory”. 2005. 416 p. (in Russian)
7. Rak V.A. Perspektivyi razvitiya energetiki v Respublike Belarus [Prospects for the development of energy in the Republic of Belarus]. Available at: https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya_energetika/perspektivy_razvitiya_energetiki_v_respublike_belarus/, accessed 02.04.2019. (in Russian)
8. Surmin Yu.P. Teoriya sistem i sistemnyiy analiz: Ucheb. posobie [System Theory and System Analysis: A Tutorial]. Kiev. Mezhregional'naya Akademiya upravleniya personalom (MAUP) = Interregional Academy of Personnel Management (IAPM). 2003. 368 p. (in Russian)
9. Yah'yaeva G.E. Nechetkie mnozhestva i neyronnyie seti: Uchebnoe posobie [Fuzzy Sets and Neural Networks: A Tutorial]. Moscow. Internet-Universitet Informatsionnyih Tehnologiy; BINOM. Laboratoriya znaniy = Internet University of Information Technology; Publishing House “Binom. Knowledge Laboratory”. 2006. 316 p. (in Russian)
10. Levchenko, S.A., T.G. Zoryna Simulation veracity at construction long-term energy systems modeling. // Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future. Book of abstracts of International Conference of Humboldt-Kolleg Series in Minsk. Minsk. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (ITMO) = The A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. 2010. 263 p.

УДК 621.311

АНАЛИЗ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ С ПОЗИЦИЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ[1]

Колосок Ирина Николаевна

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

Коркина Елена Сергеевна

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

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Цифровая подстанция (ЦПС) - важное звено технологического управления электроэнергетической системой. В связи с «цифровизацией» энергетики и развитием электроэнергетических систем на основе инновационных средств и технологий современные объекты электроэнергетики, в том числе и цифровые подстанции, необходимо рассматривать как сложные комплексные кибер-физические системы. В статье рассмотрена структура цифровой подстанции с позиций кибер-физической системы, выполнен анализ факторов, влияющих на «глубину» снижения функциональности цифровой подстанции при кибератаках, реакцию кибернетической и физической подсистем ЦПС на различные атаки, а также предложены меры противодействия кибератакам для этих подсистем.

Ключевые слова: цифровая подстанция, кибербезопасность, кибер-физическая система, кибератаки.

Цитирование: Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 121–131. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-11

Введение. Современная электроэнергетическая система (ЭЭС) и ее объекты – это сложные системы, состоящие из двух тесно взаимосвязанных между собой подсистем: физической (технологической) и информационно-управляющей. По мере «цифровизации» ЭЭС [2, 12] информационно-коммуникационная подсистема, выполняющая функции управления, становится сопоставимой по сложности и уязвимости с физической подсистемой. Таким образом, современные объекты энергетики можно в полной мере отнести к кибер-физическим системам (КФС).

Концепция кибер-физической системы (КФС) основана на интеграции вычислительных ресурсов в физические процессы [13]. В КФС датчики, коммуникации и информационные (интеллектуальные) системы интегрированы в единую цепочку создания продукции. Именно кибер-физические системы служат основой интеллектуального распределенного управления при функционировании ЭЭС.

[1]Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№19-07-00351 А)

В [11] рассматривается надежность КФС электроэнергетического объекта. Электрооборудование отнесено к категории физических компонентов (ФК) – это технические устройства первичного оборудования, управляемые с помощью аналоговых сигналов. К категории кибернетических компонентов (КК) отнесены интеллектуальные устройства, обеспечивающие сбор, обработку и передачу информации в цифровом виде от физических компонентов в Центр Управления или для взаимодействия ФК.

При оценке работоспособности КФС один из основных показателей – уровень надёжности и безопасности. КФС должны быть работоспособны в непредвиденных обстоятельствах, адаптироваться и восстанавливаться.

Процесс «цифровизации» энергетических систем, использование интеллектуальных технологий, сложного технического, информационного и коммуникационного оборудования повысили риски в области кибербезопасности энергетических предприятий, в том числе и ЦПС. В [10] отмечается возрастание угроз кибербезопасности с связи с развитием концепции интеллектуальных энергетических систем, в рамках которой предусматривается повышение уровня компьютеризации и интеллектуализации энергетики.

Наиболее уязвимыми к кибератакам (КА) являются компоненты информационно-коммуникационной подсистемы, но поскольку в КФС обе подсистемы тесно взаимосвязаны, то потеря и недостоверность информации вследствие КА на информационно-коммуникационную подсистему могут привести к выработке и реализации неправильных управляющих воздействий и к развитию аварийных ситуаций в физической подсистеме как самой ЦПС, так и в ЭЭС в целом.

В свою очередь, отказ элемента физической подсистемы может привести к аварийному состоянию электрической части и способствовать выходу из строя системы управления информационно-коммуникационной подсистемы [7].

В статье будет рассмотрена структура ЦПС с позиций КФС, взаимосвязь физических и кибернетических компонентов, выполнен анализ возможных кибератак, рассмотрены способы их обнаружения и предложены меры для уменьшения влияния последствий кибератак на надежность функционирования ЦПС.

1. Структура ЦПС. Взаимосвязь физических и кибернетических компонентов ЦПС. Электрическая подстанция (ПС) служит для преобразования, распределения и передачи электроэнергии и является важным элементом технологического управления в ЕЭС. Основные функции ПС:

- технологическая связь и передача данных;
- управление противоаварийной автоматикой;
- релейная защита и автоматика;
- автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП);
- учет электроэнергии и мощности (АИИСКУЭ);
- видеонаблюдение, пожарная и охранная сигнализации.

Цифровая подстанция с технической точки зрения – это обычная подстанция, выполняющая основные технологические функции передачи, преобразования, распределения и снабжения электроэнергией потребителей, но в которой информация, необходимая для выполнения технологических задач различными устройствами и электрооборудованием, передается в цифровом виде на основе международного стандарта IEC 61850 (в России – МЭК 61850) по оптоволоконным каналам связи [14, 6].

По результатам опроса ведущих российских и зарубежных специалистов в области ЦПС, проведенного в журнале «Цифровая Подстанция», можно сформулировать определение: ЦПС – это подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами подстанции, обмена с внешними системами, а также управления работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе протоколов МЭК61850.

ЦПС – важное звено технологического управления, в сфере её функционирования находится управление противоаварийной автоматикой (ПА), микропроцессорными устройствами (МП) релейной защиты (РЗ), АСУ ТП, АИИСКУЭ, коммуникационная сеть. ЦПС выбрана в качестве примера КФС – там есть первичное, вторичное оборудование, устройства сопряжения, специализированное программное обеспечение (ПО) и др.

Архитектура ЦПС, показанная на рис.1, разделяется на три уровня (снизу вверх) [1]:

- уровень первичного оборудования (процесса): интеллектуальные первичные устройства и оптические кабели, по которым на уровень ячейки идет передача значений напряжения и тока;
- уровень ячейки (присоединения): терминалы МП РЗА, контроллеры присоединений и другое оборудование, традиционно называемое «вторичным»;
- станционный уровень: коммуникации внутри подстанции и элементы системы управления, включая оперативные блокировки и функции самодиагностики на верхнем уровне.

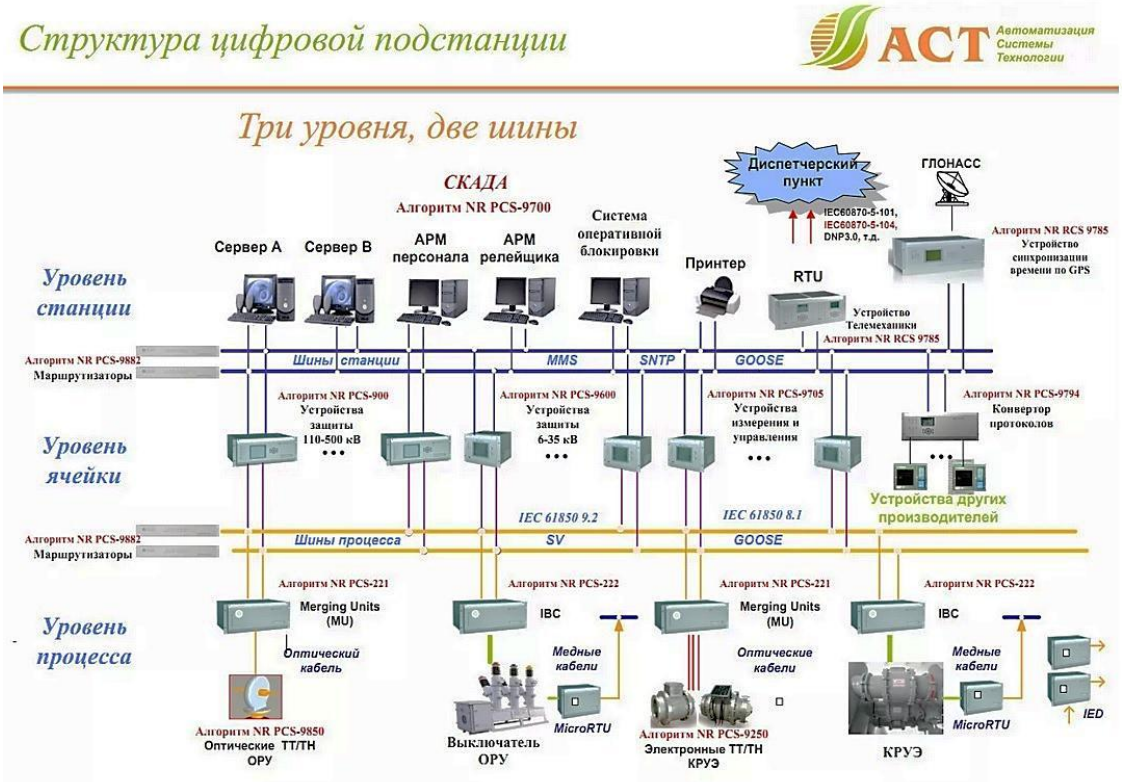


Рис. 1. Структура ЦПС

1.1. Уровень первичного оборудования. ЦПС основана на такой коммуникационной архитектуре, в которой измерения в реальном времени и другие данные передаются от первичного оборудования и встроенных датчиков через шину процесса устройствам,

выполняющим свои функции на основе этих измерений (токи и напряжения, давление и температура для КРУЭ). Наиболее важным является то, что интеллектуальные устройства и системы на подстанции (терминалы РЗА, РАС, PMU модули, измерительные центры, контроллеры присоединений) могут мгновенно обрабатывать данные.

Шина процесса также является связью, по которой информация от первичного оборудования распределительного устройства (РУ) поступает в операторский пункт управления (ОПУ). В полностью цифровой архитектуре команды управления первичным оборудованием также передаются по шине процесса. Таким образом, шина процесса позволяет реализовывать критически важные по времени функции [6].

1.2. Уровень ячейки. Устройства между шиной процесса и станционной шиной называются «вторичным оборудованием». В ЦПС - это интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), которые взаимодействуют:

- с первичным оборудованием через шину процесса;
- с другими устройствами в ячейке;
- с цифровой системой управления через станционную шину.

Они спроектированы для работы в реальном времени с обеспечением безопасности и удовлетворяют требованиям, предъявляемым МЭК 61850. ИЭУ обеспечивают совместимость решений, работу приложений по поддержанию стабильности работы, интеграцию в WACS[2] систему и гораздо лучшую ситуационную наблюдаемость подстанции. Протокол МЭК 61850 позволяет обеспечить полную интеграцию между устройствами. Это дает возможность оптимального использования информации для непрерывного и надежного управления работой подстанции [7].

Ключевые элементы архитектуры: терминалы РЗА, контроллеры присоединений, коммутаторы и Ethernet сеть, измерительные центры, шлюзы, шкафы (в которых оборудование смонтировано, настроено и обеспечено электропитанием), интерфейс оператора, устройства синхронизации времени. Поскольку энергетика относится к сфере объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) согласно ФЗ-187[3] , ключевым элементом являются и приложения по обеспечению кибернетической безопасности.

1.3. Станционный уровень. В ЦПС станционная шина это гораздо больше, чем стандартная шина обмена данными в SCADA системе, т.к. она позволяет большому количеству клиентов выполнять обмен данными, поддерживает соединение устройств точка-точка и подключение шлюзов для организации взаимодействий между подстанциями.

ИЭУ выполняют свои критичные по времени функции, такие как защита, контроль синхронизма и другие задачи с прямым подключением к шине процесса. Дополнительно, другие клиенты на подстанции также могут получать при необходимости доступ к этим данным. Например, функции защиты и управления могут быть распределены между несколькими ИЭУ.

Также существует необходимость распределения информации между локальными и удаленными операторами, что позволяет отображать текущее состояние подстанции в реальном времени. Это требует организации взаимодействия между интерфейсом оператора,

[2] Wide Area Control System – широкомасштабная система управления на основе синхронизированных векторных измерений
[3] ФЗ-187“О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации” от 26.07.2017

шлюзами и удаленными серверами управления. Одна или больше рабочих станций могут выполнять команды от оператора сети, могут использоваться как инженерная станция для конфигурации ИЭУ или как локальный концентратор информации, и выполнять функции архивирования. Система мониторинга в реальном времени также может включать специальные рабочие станции для отображения состояния и просмотра архива по каждому типу первичного оборудования [11].

1.4. Информационный обмен. ЦПС базируется на международном стандарте МЭК 61850, первая глава которого определяет трёхуровневую архитектуру системы автоматизации. Там же приведены Перечень интерфейсов и их назначение [4]:

- обмен сигналами функций защиты между уровнями присоединения и станции, между уровнем присоединения одного объекта и уровнем присоединения смежного объекта;
- обмен данными в рамках уровня присоединения, между уровнем станции и удаленным рабочим местом инженера, а также в рамках уровня станции;
- обмен сигналами функций управления между уровнем станции и удаленным диспетчерским центром, между уровнями присоединения двух различных объектов.

2. Кибербезопасность ЦПС с позиций КФС [5, 8, 9, 15, 16]. Для обеспечения информационно-технологической защищённости ЦПС должна обладать свойствами устойчивости, адаптивности, восстанавливаемости, которые могут быть развиты на основе глубокого анализа проблем безотказной работы ЦПС. Отличительной особенностью ЦПС является передача информации через сеть с коммутацией пакетов Ethernet, настроенную специальным образом (шина процесса и шина подстанции – в терминологии МЭК 61850). В связи с этим закрытость объекта больше не является барьером для злоумышленника, и, если не принять специальных защитных мер, все данные на верхнем уровне автоматизации подстанции с внедрением этого Стандарта могут стать доступными для кибератак. Кроме того, к угрозам безопасности обычной подстанции, которые на ЦПС, как правило, усиливаются, добавляются угрозы вмешательства в работу шины процесса и систему синхронизации времени. Киберустойчивость (или киберупругость) энергосистемы – относительно новый термин, характеризующий её способность восстанавливаться после реализации явно направленных или скрытых кибератак. Согласно ФЗ №187 “средствами, предназначенными для обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак и реагирования на компьютерные инциденты, являются технические, программные, программно-аппаратные и иные средства … , а также криптографические средства защиты такой информации”.

Анализируя компоненты ЦПС, показанные на рис. 1, и их функции, можно разделить все оборудование ЦПС на физическую и кибернетическую подсистемы (компоненты) следующим образом:

- к физическим компонентам (ФК) ЦПС относится электрооборудование (трансформаторы, выключатели, разъединители и др.) и установленное на них измерительное оборудование (измерительные ТТ и ТН… и др.),
- к кибернетическим (КК): шина процесса, станционная шина, аналого-цифровые преобразователи, коммутаторы, ИЭУ, маршрутизаторы, терминалы, серверы, систему SCADA, WAMS, АСУ ТП, АСКУЭ, автоматизированные рабочие места (АРМ) технологов и др.

Многие ФК находятся под мониторингом и управлением кибер-компонентами. Некоторые ФК, такие, как удаленные терминальные блоки (RTU), компьютеризированы, т. е. имеют встроенное ПО и подключены к КК, например, к SCADA-серверам. Линия передачи данных является аналогом линии электропередачи в электросети, она физическая по своей природе даже при использовании технологии беспроводной связи. Все компьютеризированные компоненты отнесены к ФК, при этом аппаратное обеспечение отделено от программного обеспечения, работающего на таких ФК.

Кибер-компоненты (ПО, данные) отделены от физических компонентов, которые являются их хостами. КК означают фактический читаемый компьютером код и данные, которые находятся на каком-либо физическом компоненте.

Ряд известных кибератак – “отказ в обслуживании” (DoS–атака), внедрение вирусов и программного обеспечения с “закладками”, подмена сигналов GPS/ потока мгновенных значений (SV-потока)/ MMS и GOOSE-сообщений, переполнение трафика и пр. – являются прямыми угрозами работоспособности ЦПС. В Таблице 1 сопоставляются последствия, к которым ведут атаки в информационной и физической подсистемах ЦПС, и возможные меры противодействия этим атакам.

Таблица 1.

КИБЕР-АТАКА	**Последствия**		**Меры противодействия**	
	Киберподсистема	**Физическая подсистема**	**Киберподсистема**	**Физическая подсистема**
1. Анализ сетевого трафика	Кража данных о сетевой конфигурации объекта	Для технологического процесса угрозы нет	Шифрование	Не требуются
2.Специали-зированное вредоносное ПО, “закладки”, вызывающие ошибки в работе ОС Windows	Проникновение в операционную систему Windows	РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ	В силу того, что нет разработанных антивирусов, приходится ликвидировать такую аппаратуру.	РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ
3.Атака по изменению прикладного ПО путем внедрения вредоносного ПО	• Взлом серверов и рабочих станций, • удаленное управление вычислительными ресурсами, • администрирование каналов	• Некорректная работа программных приложений. • Срабатывание аппаратных и программных закладок. • Нежелательное отключение/срабатывание интеллектуаль-ных устройств.	• Авторизация пользователей; • Системы обнаружения и предотвращения вторжения; • установка антивируса; • запрет использования флэш-карт, замена их на CD.	Использование традиционных аналоговых цепей
4.DoS–атака (отказ в обс-луживании)	Вывод из строя маршрутизатора, коммутатора многочисленными запросами к сети	• Задержка управления; • отказ отключения/ срабатывания интеллекту-альных устройств	• Строгие правила аутентификации, возможность идентификации IP-адреса злоумышленника	Дублирование IED-устройств и каналов

КИБЕР-АТАКА	Последствия		Меры противодействия	
	Киберподсистема	**Физическая подсистема**	**Киберподсистема**	**Физическая подсистема**
5.Задержка передачи пакетов вследствие изменения маршрута	Потеря информационных пакетов	Задержка команд управления	Закрытие портов; усиление защиты коммутаторов/маршрутизаторов/ NMS ("система управления сетью")	Использование традиционных аналоговых цепей или РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ
6.Наведение повторных кибер- или физических атак	Срабатывает как атака по изменению маршрута в сети	Задержка команд управления	Системы обнаружения вторжения	Использование традиционных аналоговых цепей или РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ
7.Подмена сигналов GPS	Ошибка синхронизации времени	Возможно рассогласование команд на отключение/срабатывание интеллектуальных устройств	Использование VLAN ("виртуальная локальная сеть"); мониторинг направления антенны; дублирование приемников	Мониторинг состояния оборудования
8.Подмена SV-потока, MMS-, GOOSE-сообщений	SV-поток – это измерения первичного оборудования, GOOSE-управляющие сигналы, MMS- обмен с верхним уровнем управления	Нежелательное отключение/ срабатывание; отказ отключения/ срабатывания	Аутентификация сообщений	Мониторинг состояния оборудования
9.Проникновение через Интернет корпоративной сети (через web- или FTP-сервер)	Кража, искажение и стирание информации	• Некорректная работа программных приложений, • неверные команды управления, • нежелательное отключение/срабатывание интеллектуальных устройств.	Корректное конфигурирование сетевых операционных систем и средств защиты	Использование традиционных аналоговых цепей или РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ
10.Проникновение в локальную сеть ПС с последующим искажением информации (ЧМИ)	4 категории воздействия на структуру человеко-машинного интерфейса: повреждение памяти, управление учетными данными, отсутствие аутентификации / авторизации и небезопасные значения по умолчанию	Формирование ложных команд на управление сетью, электронным оборудованием, отключение элементов сети;	• Строгие правила доступа к сети, правильная конфигурация Firewall. • Приглашение только сертифицированных специалистов для наладки.	Использование традиционных аналоговых цепей или РАБОТА В РУЧНОМ РЕЖИМЕ

На недавно введенных в эксплуатацию пилотных российских цифровых подстанциях (ЦПС 35/6 кВ «Бабайки», ПС 110/10 кВ имени М.П. Сморгунова, ПС 500 кВ «Тобол», ЦПС 110/20кВ Медведевская) осуществлены следующие меры по предотвращению различных угроз работоспособности ЦПС и защитные средства для их кибер-физических систем [3]. Это 100% дублирование сети, высокая степень автоматизации и управляемости оборудования, самодиагностики и учета аварийных событий, организация на РЗА двух параллельных систем: цифровой и классической, полная изолированность шины процесса и

шины подстанции от внешней сети для исключения возможности постороннего дистанционного вмешательства, применена технология параллельного резервирования.

Заключение. Процесс «цифровизации» энергетических систем, использование интеллектуальных технологий, сложного технического, информационного и коммуникационного оборудования повысили риски в области кибербезопасности энергетических предприятий, в том числе и цифровой подстанции. Среди основных направлений цифровизации электроэнергетики важное место отводится развитию цифровых технологических систем производства, транспорта, диспетчеризации и потребления электроэнергии. Цифровая подстанция является одним из пилотных проектов развития цифровизации электроэнергетики.

Потеря и недостоверность информации вследствие кибератак на информационно-коммуникационную подсистему могут привести к выработке и реализации неправильных управляющих воздействий и к развитию аварийных ситуаций в физической подсистеме как самой ЦПС, так и в ЭЭС в целом, поэтому проблема киберустойчивости объектов энергетики является критически важной и должна решаться как техническими средствами, так и организационными, включая повышение квалификации оперативного персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АСТ. Автоматизация. Системы. Технологии. Режим доступа: http://autosystech.ru/?page_id=676 (дата обращения 14.05.19).
2. Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. 2019. №1. С. 2–14.
3. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Проблемы повышения киберустойчивости цифровой подстанции // Релейная защита и автоматизация. 2019. Т. 34. № 1. С. 78–83.
4. Головин А., Аношин А. Структура стандарта МЭК 61850 // Цифровая подстанция. 2012. Режим доступа: http://digitalsubstation.com/blog/2012/10/18/struktura-standarta-me-k-61850/ (дата обращения 28.06.18)
5. Зинин В.М., Подлесный А.М., Карантаев В.Г. Цифровая подстанция – объект критической инфраструктуры // Автоматизация и IT в энергетике. 2017. №4(93). С. 28–32.
6. Иванченко А.Ф. Управление и оперативное обслуживание подстанций Единой национальной электрической сети. Часть 1 // Энергетик. 2018. № 10. Библиотечка электротехника. 96 с.
7. Куликов А.Л., Зин ин В.М. Создание системы кибербезопасности в электроэнергетике РФ с учетом реализации Концепции ИЭС ААС // ЭЭ ПиР. 2015. №5(32). С. 122–126.
8. Куликов А.Л., Зинин В.М., Петров А.А. Обеспечение кибербезопасности в технологии «Цифровой подстанции» с учетом импортозамещения // Релейная защита и автоматика энергосистем. Материалы Межд. научно-технической конференции. 2017. С. 941–944.
9. Левшин В.П., Шурдов М.А. Кибербезопасная ЦПС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №4(49). С. 24–26.

10. Массель Л.В., Воропай Н.И., Сендеров С.М., Массель А.Г. и др. Киберопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России // Вопросы кибербезопасности. 2016. №4(17). С. 2–10.
11. Обычайко Д.С., Шихин В.А. Разработка комбинированного метода оценки эксплуатационной надёжности КФС // Материалы Всеросс. НТконф. “Инф.технологии в электротехнике и электроэнергетике”. Чебоксары. 2018. С. 118–121.
12. Холкин Д. Цифровая энергетика: что это такое? // Цифровая подстанция. 2018. №10. С. 52–55.
13. Цветков В.Я. Распределенное интеллектуальное управление // Государственный Советник. 2017. №1. С. 16–22.
14. Цифровая подстанция. Эффективные решения // Журнал «ИСУП». Режим доступа: http://isup.ru/articles/6/13855/ (дата обращения 14.05.19)
15. Gouglidis A., Green B., Hutchison D., Alshawish A., and Hermann de Meer. Surveillance and security: protecting electricity utilities and other critical infrastructures. Available at: https://doi.org/10.1186/s42162-018-0019-1. (accessed 16.01.19)
16. Mehrdad S., Mousavian S., Madraki G., Dvorkin Yu. Cyber-physical resilience of electrical power systems against malicious attacks: A review // Current Sustainable / Renewable Energy Reports. Available at: https://doi.org/10.1007/s40518-018-0094-8 (accessed 28.06.18)

UDK 621.311

AN ANALYSIS OF CYBER SECURITY OF A DIGITAL SUBSTATION IN TERMS OF CYBER PHYSICAL SYSTEM [4]

Irina N. Kolosok
Professor, Leading Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: kolosok@isem.irk.ru
Elena S. Korkina
Doctor, Senior Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: korkina@isem.irk.ru
Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Digital substation is an important component in the technological control of electric power system. In the context of the energy sector digitalization and the development of electric power systems based on innovative tools and technologies, modern electric power facilities, including digital substations, must be viewed as complex integrated cyber-physical systems. The paper gives consideration to the structure of a digital substation from the perspective of a cyber-physical system. An analysis of the factors affecting the extent to which the functionality of a digital substation is reduced during cyberattacks, and the factors contributing to its speedy restoration is made.

[4]This study is supported by RFBR grant №19-07-00351 A.

Keywords: Digital substation, cyber security, electric power system, cyber physical system.

References

1. AST. Avtomatizatsiya. Sistemy. Tekhnologii [Automation. Systems. Technology.] Available at: http://autosystech.ru/?page_id=676 (accessed 14.05.19) (in Russian)
2. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., Massel' L.V., Novikov D.A., Rajkov A.N., Senderov S.M., Stennikov V.A. Problemy razvitiya cifrovoj energetiki v Rossii [Digital Energy Development Problems in Russia] // Problemy upravleniya = Control Sciences. 2019. №1. Pp. 2–14. (in Russian)
3. Voropai N.I., Kolosok I.N., Korkina E.S Problemy povysheniya kiberustojchivosti cifrovoj podstancii [An Increase in Cyber Resilience of Digital Substation] // Relejnaya zashchita i avtomatizaciya = Relay Protection and Automation. 2019. V.34. № 1. Pp. 78–83. (in Russian)
4. Golovin A., Anoshin A. Struktura standarta MEK 61850 [IEC 61850 Standard Structure] // Cifrovaya podstanciya = Digital substation. 2012. Available at: http://digitalsubstation.com/blog/2012/10/18/struktura-standarta-me-k-61850/ (accessed 28.06.18) (in Russian)
5. Zinin V.M., Podlesnyj A.M., Karantaev V.G. Cifrovaya podstanciya – ob"ekt kriticheskoj infrastruktury [Digital substation – object of critical infrastructure] // Avtomatizaciya i IT v energetike = Automation and IT in power engineering. 2017. № 4 (93). Pp. 28–32. (in Russian)
6. Ivanchenko A.F. Upravlenie i obsluzhivanie podstanciej ENES [Management and maintenance of substations of National Power Grid.] // Energetik (Bibliotechka elektrotekhnika) = Power Engineer (Application). 2018. 96 p. (in Russian).
7. Kulikov A.L., Zinin V.M. Sozdanie sistemy kiberbezopasnosti v elektroenergetike RF s uchetom realizacii Koncepcii IES AAS [Creation of a cybersecurity system in the electric power industry of the Russian Federation taking into account the implementation of the IES AAS Concept] // EE PiR = Electric Power. Transmission and Distribution. 2015. №5 (32). Pp. 122–126. (in Russian)
8. Kulikov A.L., Zinin V.M., Petrov A.A. Obespechenie kiberbezopasnosti v tekhnologii «Cifrovoj podstancii» s uchetom importozameshcheniya [Cyber security of a digital substation in the “Digital Substation” technology with account of import substitution.] // Relejnaya zashchita i avtomatika energosistem = Relay protection and automatic of energy systems. St.-Petersburg. 2017. Pp. 941–944. (in Russian)
9. Levshin V.P., Shurdov M.A. Kiberbezopasnaya CPS [Cyber secure DSS] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and Distribution. 2018. №4 (49). Pp. 24–26. (in Russian)
10. Massel L., Voropay N., Senderov S., Massel A. Kiberopasnost' kak odna iz strategicheskih ugroz energeticheskoj bezopasnosti Rossii [Cyber Danger as One of the Strategic Threats to Russia’s Energy Security] // Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues. 2016. №4(17). Pp. 2–10. (in Russian)
11. Obychaiko D.S., Shikhin V.A. Razrabotka kombinirovannogo metoda ocenki ekspluatacionnoj nadyozhnosti KFS [Development of a combined method for assessing the operating reliability of cyber-physical systems] // Materialy Vseross. NTkonf.

"Inf.tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike" = Proc. of XI All-Russia Conference "IT in power engineering". Cheboksary. 2018. Pp. 118–121. (in Russian)

12. Holkin D. Cifrovaya energetika: chto eto takoe? [Digital power engineering: what is it?] // Cifrovaya podstanciya = Digital substation. 2018. №10. Pp. 52–55. (in Russian)
13. Cvetkov V.Ya. Raspredelennoe intellektual'noe upravlenie [Distributed Intelligent Control] // Gosudarstvennyj Sovetnik = State Advisor. 2017. №1. Pp. 16–22. (in Russian)
14. Cifrovaya podstanciya. Effektivnye resheniya [Digital substation. Effective Solutions] // Zhurnal «ISUP» = Magazine «Informatization and management systems in industry». Available at: http://isup.ru/articles/6/13855/ (accessed 14.05.19) (in Russian)
15. Gouglidis A., Green B., Hutchison D., Alshawish A., and Hermann de Meer. Surveillance and security: protecting electricity utilities and other critical infrastructures. Available at: https://doi.org/10.1186/s42162-018-0019-1. (accessed 16.01.19)
16. Mehrdad S., Mousavian S., Madraki G., Dvorkin Yu. Cyber-physical resilience of electrical power systems against malicious attacks: A review // Current Sustainable / Renewable Energy Reports. Available at: https://doi.org/10.1007/s40518-018-0094-8 (accessed 28.06.18)

УДК 621. 311. 1

ОСОБЕННОСТИ АГРЕГИРОВАНИЯ МИРОВЫХ ГАЗОВЫХ РЫНКОВ

Калинина Жанна Вадимовна
К.т.н., н.с., e-mail: zhannochka_k@mail.ru
Илькевич Николай Иванович
Д.т.н., гл.н.с., e-mail: ilkev@isem.irk.ru
Дзюбина Татьяна Владимировна
К.т.н., с.н.с., e-mail: tvleo@isem.irk.ru
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Аннотация. Моделирование развития систем газоснабжения для создания мировых прогнозов их развития и взаимодействия газовых рынков выполняется на основе моделей потоков газа. В данной работе представлена иерархия газовых моделей, в основном зарубежных, проведен их анализ, описаны возможности, учитываемые факторы и получаемые результаты. Во всех рассмотренных моделях данные по газоснабжающим системам представлены в агрегированном виде, хотя методы агрегирования и их точность не указываются. В работе кратко описываются разработанные авторами методы агрегирования для решения задач оптимального развития газоснабжающих систем при их многоуровневом моделировании.

Ключевые слова: математическая модель, газоснабжающая система, мировые газовые рынки, агрегирование, расчетная схема, технико-экономические показатели.

Цитирование: Калинина Ж.В., Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В. Особенности агрегирования мировых газовых рынков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 132–143. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-12

Введение. При комплексном исследовании развития газоснабжающей системы создать точную модель, адекватно описывающую все ее объекты практически невозможно. Большое значение при решении различных задач приобретает агрегирование реальной схемы системы газоснабжения, определение агрегированных характеристик ее объектов и представление исходной информации в виде расчетных схем. В результате агрегирования схемы представляются в упрощенном виде, удобном для визуализации результатов расчетов и выполнения исследований, адекватно отражаются основные технико-экономические показатели системы.

Единая система газоснабжения (ЕСГ) России представляет собой уникальную систему большого размера, в мире нет соответствующего аналога, тем не менее, в Европе также ведутся исследования оптимального развития больших газовых систем. Речь, прежде всего, идет о системе газоснабжения Европы, в которую входят системы газоснабжения разных стран, в том числе учитываются и поставки газа из ЕСГ РФ.

Методы сетевого анализа, основанные на теории графов [12], получили широкое применение при решении задач в области исследования операций. Моделирование развития

систем газоснабжения для создания мировых прогнозов их развития и взаимодействия газовых рынков выполняется на основе моделей потоков газа [4].

В работе рассматривается иерархия мировых газовых моделей. Описываются известные модели, используемые для создания мировых прогнозов развития и взаимодействия газовых рынков.

1. Обзор моделей газовых рынков. Природный газ занимает все более важное место в энергетическом балансе развитых стран мира. Исследования мирового газового рынка, определение оптимальных стратегий его развития осуществляются с помощью множества моделей, которые, в зависимости от глубины и детальности проработки мировых газовых систем, можно представить в виде четырех уровней иерархии: мировые энергетические модели, мировые, европейские и национальные газовые модели.

Системы газоснабжения обычно представляются в виде трех подсистем: источников газа, сетей магистрального транспорта и потребителей.

1.1. Мировые энергетические модели. Верхний уровень иерархии представляют мировые энергетические модели, которые исследуют отрасли топливно-энергетического комплекса и описывают их взаимосвязи. К таким моделям относятся: International Energy Agency World Energy Model (IEA WEM), Energy Information Administration World Energy Projection System Plus (EIA WEPS+), а также российский Модельно-информационный комплекс SCANER [7, 14, 15, 19, 25, 27]. В этих моделях информация по отраслям наиболее агрегирована. Конкуренция между различными видами топлива моделируется лишь на стороне спроса.

В моделях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) узлы (регионы) газовой сети включают в себя несколько стран. Для них в укрупненном виде составляются прогнозы добычи, потребления, экспорта, импорта, цен, необходимых новых мощностей, инвестиций. Исследуются различные варианты развития газовых рынков в зависимости от различных мировых тенденций и политических влияний.

Мировая энергетическая модель (IEA WEM) [14] используется Международным энергетическим агентством (МЭА) для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования системы. Модель описывает всю глобальную энергетическую систему, включая основные виды энергий (угольную, нефтяную, газовую, ядерную, гидро- и биоэнергию). Большая часть исходных данных о предложении, спросе на энергию, а также ценах получена из собственных баз данных энергетической и экономической статистики МЭА [19].

Модель исследует глобальные и региональные энергетические перспективы (тенденции спроса, наличие предложения, ограничения, международную торговлю и энергетические балансы по секторам и видам топлива до 2040 года), экологические последствия использования энергии, последствия политических действий и технологических изменений.

При моделировании газовой отрасли производство в регионе моделируется на основе информации по ресурсам и темпам истощения, при этом учитываются производственные затраты и цены в регионе. Разница между внутренним производством и спросом определяет требования по экспорту и импорту газа. Торговля между регионами ограничивается существующими или планируемыми газопроводами, заводами по производству сжиженного природного газа и долгосрочными контрактами.

Международные цены на уголь, природный газ и нефть в модели рассчитываются с помощью итеративного моделирования. Они определяются как цены, необходимые для

стимулирования достаточных инвестиций в производство для удовлетворения прогнозируемого спроса.

Система прогнозирования мировой энергетики (EIA WEPS+) [25, 27] используется для оценки международных рынков энергоносителей (International Energy Outlook). Модель осуществляет среднесрочный прогноз и анализ развития энергетики. WEPS+ проектирует предложение, спрос и цены на энергию по странам или регионам, учитывая данные о состоянии различных экономик, международных энергетических рынков и энергетической политике.

WEPS+ состоит из нескольких модулей: предложения, спроса, макроэкономики, решателя, позволяющего находить равновесное решение для всех баз данных модели (используется метод итеративной оптимизации Гаусса – Зейделя), и программы передачи информации из одного модуля в другой, так как разные модули работают с данными разной степени детализации. Поэтому проводится их агрегирование и дезагрегирование.

Прогнозируя глобальный рынок природного газа, WEPS+ работает совместно с Международной моделью природного газа EIA INGM (International Natural Gas Model), которая содержит оценки запасов природного газа, затраты на переработку, добычу и транспортировку, спрос на энергию. INGM объединяет региональные проекты потребления энергии на основе модели WEPS+. При этом, WEPS+ интегрируется с национальной системой моделирования энергоэффективности (NEMS), которая представляет нижний уровень иерархии моделей, предложенной в данной работе. Итерационный процесс между INGM и WEPS+ используется для баланса мировых рынков природного газа [15].

Модельно-информационный комплекс SCANER [7] разработан в Институте энергетических исследований РАН. Он содержит большие массивы энергетической, экономической и технической информации, математические модели для комплексного прогнозирования и оптимизации развития энергетики страны и мира по основным стадиям преобразования энергии – от производства (около 20 видов первичных энергоресурсов) до использования потребителями (10 основных энергоносителей). В состав комплекса входят несколько информационно-модельных блоков для максимального охвата проблем развития энергетики мира, России и ее регионов.

В газовом блоке осуществляется долгосрочное прогнозирование газовой отрасли: производства, экспорта и поставок газа на внутренний рынок, на основе данных по энергетическим потребностям экономики и условиям финансовой устойчивости газовых компаний при различных сценариях мировых цен, а также при различных вариантах ценообразования на газ в России и режимах налогового и таможенного регулирования.

1.2. Мировые газовые модели. Мировые газовые модели [3] исследуют развитие мировых рынков газа более детально. В моделях рассматриваются газовые рынки более чем семидесяти стран. Каждая страна рассматривается как отдельный рынок газа (узел). Некоторые страны в моделях разделены на несколько рынков. Учитываются сезонные неравномерности потребления газа, работа подземных хранилищ газа. Прогнозируются потоки газа, спрос, добыча, цены на газ, необходимые новые мощности газотранспортных коридоров и заводов по сжижению газа. Исследуются различные сценарии поведения участников газовых рынков.

В моделях вводятся виртуальные газопроводы [17], которые олицетворяют доставку до потребителей сжиженного природного газа (СПГ), с использованием автомобильных или морских перевозок.

Мировая газовая модель Nexant World Gas Model разработана компанией Nexant [20, 24, 28], создана для анализа развития газового рынка, на основе исследования различных сценариев. Регулярные обзоры газового рынка «Gas Market Outlook» базируются на решениях, полученных с помощью этой модели.

База данных модели периодически обновляется. Она содержит информацию по добыче (удельные издержки, налоги, объемы добычи), спросу в каждом узле, транспорту газа (тарифы и пропускные способности газопроводов), подземным хранилищам газа и информацию по поставкам сжиженного природного газа (СПГ). Для выполнения расчетов используется сетевая потоковая модель. Критерий оптимизации в данной модели – минимизация затрат добычи и транспорта газа.

Модель University of Maryland World Gas Model разработана коллективом авторов из Мэрилендского университета и Немецкого института экономических исследований [16]. Моделирует мировые газовые рынки, рассматривая более восьмидесяти стран. В отличие от предыдущей модели, здесь моделируется поведение игроков газового рынка, транспортная инфраструктура представляется только основными газопроводами между странами, используется нелинейная оптимизация, критерием оптимизации является максимизация дисконтированного дохода, рассчитываемого как разница между выручкой и издержками на добычу для каждого производителя в отдельности.

Программная среда Market Builder разработана компанией Altos Management Partners, однако в настоящее время права на платформу Market Builder принадлежат компании Deloitte Market Point [18, 21, 23]. Она применяется для создания и использования энергетических моделей, на ее основе функционирует несколько мировых газовых моделей**.**

Среда позволяет моделировать различные отрасли топливно-энергетического комплекса, представляя их структуру в виде узлов и ветвей.

Задача максимизации прибыли для каждого игрока газового рынка в отдельности и достижения Вальрасовского равновесия решается с помощью итерационного алгоритма.

1.3. Модели газового рынка Европы. Модели европейского рынка природного газа нацелены на определение оптимального развития газового рынка Европы [22]. С их помощью прогнозируют добычу, транспорт, потребление природного газа и цены на него. Основными моделями газового рынка Европы являются: NATGAS, GASTALE1, GASTALE2, GASTALE3, GASMOD, EUGAS, в них транспорт газа рассматривается в виде основных коридоров или отдельных трубопроводов высокого давления от производства до рынка и между рынками.

Чаще всего, моделируя добычу, газопроводный и сжиженный газ объединяют в один продукт с суммарной себестоимостью, производительностью и годовой или сезонной пропускной способностью. Каждая страна представляется как единый узел с суммарной себестоимостью, мощностью производства газа, инвестиционными и эксплуатационными затратами.

Условия транспорта газа внутри и за пределами Европейского союза в моделях принимаются одинаковыми, также не различаются поставки трубопроводного газа и СПГ. В системах транспортировки и хранения газа ограничения налагаются только на физические

возможности системы, предполагается равный доступ всех участников рынка, но практика действующих транспортных компаний показывает, что это не так. Газотранспортная система в моделях представляется, как единая сеть, не различая границы действия разных передающих компаний, характеризующихся отличающимися характеристиками. Транспортная инфраструктура в моделях различается и не всегда открыта. Это агрегированные сети, представляющие собой газотранспортные коридоры от производителей до рынков и между рынками. Расчет их производительностей тоже не описывается.

Модель EUGAS / TIGER представляет самую детализированную инфраструктуру газоснабжающей системы Европы [13].

Формирование цен в моделях различается. Модели GASTALE 1 и 2, и GASMOD учитывают только долгосрочные затраты. Некоторые модели предполагают двойную маргинализацию, когда каждый производитель и поставщик извлекает монопольную маржу с рынка, выбирая цену продажи, максимизирующую его прибыль. При двойной маргинализации моделируются линейные цены, а по газовым контрактам (Take or Pay) цены нелинейны.

Модель EUGAS предполагает совершенную конкуренцию, другие модели используют в грубом виде конкуренцию Курно в сочетании с совершенной конкуренцией. Конкуренция Курно подразумевает, что поставщики изменяют рыночные цены, действуя на количество, которое они продают на рынке.

Модель совершенной конкуренции позволяет технически просто представить рыночную власть: достаточно добавить наценку к чистой конкурентной цене. С введением наценки легко наблюдать за реакцией рынка.

Модель GASTALE1 предполагает идентичных поставщиков Курно на каждом национальном рынке. Модель GASMOD предполагает доминирующее положение поставщика на каждом национальном рынке, который может перепродавать часть импортируемого газа на другие национальные рынки.

1.4. Национальные газовые модели. Энергетические ресурсы и цены, спрос на конкретные энергетические услуги и другие характеристики энергетических рынков внутри некоторых стран сильно различаются. Национальные газовые модели более детально исследуют газовые рынки отдельной страны [26]. К таким моделям относится упомянутая выше Национальная система энергетического моделирования (NEMS). Модель была разработана и внедрена управлением энергетической информации (EIA) Министерства энергетики США. Она используется для прогнозирования энергетического, экономического, экологического воздействия и воздействия на безопасность в Соединенных Штатах альтернативной энергетической политики и различных допущений в отношении энергетических рынков. NEMS прогнозирует производство, импорт, транспортировку, потребление и цены на энергию с учетом допущений в отношении макроэкономических и финансовых факторов, мировых энергетических рынков, наличия ресурсов и затрат, поведенческих и технологических критериев выбора, стоимостных и эксплуатационных характеристик энергетических технологий и демографии.

Как уже отмечалось выше, сетевой анализ получил широкое применение при решении задач функционирования систем газоснабжения в различных условиях. Основу в этих задачах составляет проблема транспорта газа, т.е. проблема оптимального распределения потоков газа в системах. В России такими задачами стали заниматься в конце 1980 годов [4,

10, 11]. Первая программная реализация была выполнена Ефремовым В.А. для задачи относительно небольшой размерности [4].

Методические разработки, например [1, 2, 5, 8, 9 - 11], позволяют ставить и решать комплексные задачи по развитию систем газоснабжения в рамках ТЭК РФ, при учете расширения связей с другими отраслями народного хозяйства и с последующей детализацией решаемых вопросов.

2. Основные минусы представленных моделей. Представление инфраструктуры, как в зарубежных, так и в отечественных моделях, отличается. Однако, из доступных документов не ясно, как в конкретных моделях представлена различная информация. Схемы газоснабжающих систем используются в агрегированном виде, состоят из газотранспортных коридоров от источников до потребителей. Такая сеть требует определения агрегированных производительностей, однако, методы агрегирования не приводятся. Как говорится в работе [26], отсутствие прозрачности в получении агрегированной сети является общей проблемой моделирования.

Проведенный анализ как зарубежных, так и отечественных моделей показал, что недостаточно проработанными являются вопросы, которые, по составляющим агрегирования, можно разделить на три группы:

1) агрегирование объектов системы:

– потребность в природном газе чаще всего прогнозируется общей по всей стране или по округам;

– агрегированные узлы-источники представляются на схеме крупными месторождениями, при этом не учитываются мелкие месторождения и независимые производители газа;

– при агрегировании магистральных газопроводов выделяются основные газотранспортные коридоры, которые представляются в однониточном исчислении с суммарной пропускной способностью. Остальные магистральные газопроводы часто не учитываются;

– предполагается совершенная конкуренция в производстве, транспорте и хранении газа.

2) агрегирование технико-экономических показателей объектов системы:

– при агрегировании нескольких месторождений в один узел-источник, а также потребителей газа в один узел-потребитель не учитывается пропускная способность магистральных газопроводов между ними;

– не учитываются коэффициенты расхода газа на собственные нужды и утечки для предприятий добычи и транспорта газа;

– не агрегируются экономические показатели системы, такие, как издержки на добычу газа в узлах-источниках и транспорт газа по дугам графа, что не позволяет в дальнейшем определить цену газа у потребителя;

– в России цены на газ для потребителей устанавливаются по ценовым поясам, рассчитываются они, исходя из цен на мазут, газойль и др., при этом не учитываются затраты на предприятиях добычи и транспорта газа.

3) агрегирование в квазидинамике по годам расчетного периода (долгосрочное, среднесрочное, годовое, сезонное планирование):

– при агрегировании по временным периодам упускаются более детальные показатели системы (например, при годовом планировании упускаются сезонные и режимные показатели).

3. Агрегирование газоснабжающих систем. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН разработан комплекс математических моделей сложных иерархически подчиненных задач оптимального развития систем газоснабжения на перспективу [5].

Задачи решаются на трех иерархических уровнях, начиная с верхнего с последовательной детализацией решений на более низких уровнях рассмотрения. На первом уровне рассматривается модель оптимизации структуры системы газоснабжения. В моделях второго и третьего уровней более детально описываются территориальные и производственные связи.

В зависимости от задач данные по системам газоснабжения исследуют с разной степенью детализации. Все модели используют агрегированную информацию по системе. Для решения перечисленных вопросов получили развитие методы агрегирования и многоуровневого моделирования газоснабжающей системы, а именно методы: разнесения затрат и потерь газа по узлам источникам и дугам агрегированного графа; определения оптимальных технико-экономических показателей для новых магистральных газопроводов и месторождений [5, 6].

ЕСГ России может агрегироваться до уровня субъектов РФ, а не только до уровня федеральных округов (как в Генеральной схеме), что позволяет уточнять и детализировать информацию по потреблению, транспорту и добыче газа. На основе предложенных методов была создана агрегированная расчетная схема ЕСГ и определены технико-экономические характеристики ее объектов [5, 6].

Построение графа модельной сети газоснабжающей системы основывается на следующих принципах:

– конфигурация сети отражает направления основных газотранспортных систем, местоположение в сети крупных газотранспортных перемычек, места подключения к магистральным газопроводам объектов – источников и потребителей;

– в качестве узлов сети выделяются места подключения к газотранспортным магистралям объектов добычи, хранения, потребления газа, а также точки ветвления потоков газа (в местах расположения узловых компрессорных станций);

– в качестве ветвей модельной сети выступают участки магистральных газопроводов, расположенные между двумя узлами сети;

– технико-экономические показатели элементов агрегированной сети получаются суммированием или усреднением соответствующих показателей элементов подробной схемы.

Создание агрегированной расчетной схемы ЕСГ и информационной базы основных технико-экономических показателей ее объектов позволяет решать задачу комплексного исследования развития ЕСГ, а именно:

– получение обобщенных количественных рекомендаций по капиталоемкости, технологическим показателям и издержкам различных вариантов развития газовой отрасли, по их трудоемкости, влиянию разных экспортных стратегий на развитие системы;

– исследование рациональных темпов и пропорций в развитии газоснабжения отдельных регионов и страны в целом.

Многочисленные расчеты и прогнозы по развитию ЕСГ, сделанные по предложенным агрегированным схемам, показали, что расчетные показатели (объемы добычи и потребления газа, оптовые и затратные цены), находятся в близком, сопоставимом диапазоне с фактическими показателями официальной статистической информации ПАО «Газпром».

Заключение. В работе рассмотрены газовые модели, исследующие мировые и региональные газовые рынки с различной степенью детализации. Все рассмотренные модели опираются на обширные информационные базы, в которых исходные данные определяются расчетным путем или на основе экспертных оценок. Модели больших газовых систем оперируют агрегированной информацией. Однако, принципы и принятые допущения при агрегировании исходной информации не всегда прозрачны. Анализ как зарубежных, так и отечественных моделей показал, что непроработанными остаются некоторые вопросы. Поэтому были предложены методы агрегирования, используемые при многоуровневом моделировании развития ЕСГ, для решения различных задач.

Исследование выполнено по проекту III.17.4.3 программы фундаментальных исследований СО РАН (АААА-А17-117030310437-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.В., Яковлев Е.И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. М. Недра. 1974. 432 с.
2. Вольский Э.Л., Гарляускас А.И., Герчиков С.В. Надежность и оптимальное резервирование газовых промыслов и магистральных газопроводов. М. Недра. 1980. 279с.
3. Горячев. А.А. Мировые газовые модели. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-gazovye-modeli.pdf (дата обращения 10.07.2019)
4. Ефремов В.А. Сетевые потоковые модели для управления функционированием и развитием Единой системы газоснабжения: автореф. дисс. канд. техн. наук. М. ВНИИГаз. 1987. 22 с.
5. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск. Наука. 2014. 217 с.
6. Калинина Ж.В. Разработка методов агрегирования газоснабжающих систем и исследование на их основе направлений развития Единой системы газоснабжения России на период до 2030 года : автореф. дис. канд. техн. Наук. Иркутск. 2016. 29 с.
7. Модельно-информационный комплекс SCANER. Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/skaner_ light.pdf (дата обращения 10.07.2019)
8. Нименья И.Н., Илькевич Н.И. Моделирование инвестиционной деятельности естественной монополии (на примере ОАО "Газпром"). Новосибирск. Наука. 1999. 122 с.
9. Самсонов Р.О. Методология формирования схемы развития и реконструкции газотранспортной системы РФ // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. №1. 10 с. Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/SamsonovRO/SamsonovRO_1.pdf (дата обращения 10.07.2019)
10. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Резервирование систем магистральных трубопроводов. М. Недра. 1987. 168 с. справочник кн.1.

11. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских Е.Е. Оптимальное развитие систем газоснабжения. М. Недра. 1981. 294 с.
12. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потоки в сетях: Пер. с англ. М. 1966. 276 с.
13. Martinez Miguel, Paletar Martin, Hecking Harald. The 2014 Ukrainian crisis: Europes increased security position. Available at: http://www.ewi.uni-koln.de/fileadmin/user_upload/Institut/Startseite_Text/The_2014_Ukrainian_crisis_Europes_increased_security_position.pdf (accessed 10.07.2019)
14. World energy model documentation 2016 version. Available at: http://www.iea.org/media/weoweb site/2016/WEM_Documentation_WEO2016.pdf (accessed 10.07.2019)
15. CGEP_American Gas to the Rescue. https://www.yumpu.com/en/document/view/32922271/cgep-american-gas-to-the-rescue (accessed 10.07.2019)
16. Egging R., Holz F., Gabriel S.A. The World Gas Model: A Multi-Period Mixed Complementarity Model for the Global Natural Gas Market // Energy. Elsevier. 2010. T. 35. №10.
17. European Gas Target Model Review and Update Available at: http://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/ACER_Market_Monitoring_Report_2014 .pdf (accessed 10.07.2019)
18. Global LNG Outlook //Deloitte Center for Energy Solutions, Deloitte Market Point. Deloitte Development. 2012. Available at: http://www.marinemoney.com/sites/all/themes/marinemoney/forums/MMWeek12/presentations/wednesday/LNG 2.00Choi.pdf (accessed 10.07.2019)
19. International Energy Agency. Available at: http://www.iea.org/statistics (accessed 10.07.2019)
20. Licensing the World Gas Model // Nexant. London: 2011. http://server.nexant.com/ecc/docs/World Gas Model Licensing Flyer_May2011.pdf (accessed 10.07.2019)
21. Nesbitt D. M. Scientific Solutions for Complex Decision Problems Challenging Senior Management // Altos Management Partners. 2005. Available at: http://web.stanford.edu/class/msande290/ WarnersCourse-312005.pdf (accessed 10.07.2019)
22. Smeers Yves. Gas models and three difficult objectives. 2009. Available at: http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/e/CORE/dp2008_9.pdf (accessed 10.07.2019)
23. Solutions. Deloitte Development. 2011. Available at: http://www.deloitte.com/as-sets/Dcom-United States/Local Assets/ Documents/Energy_us_er/us_er_Market Point World Oil Model Technical brochure_081011.pdf (accessed 10.07.2019)
24. Subscribe to Nexant Thinking: World Gas Model // Nexant. London: 2014. Available at: www2.nexant.com/brochure/world-gas-model (accessed 10.07.2019)
25. The European side of the ledger. http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/The%20European%20Side%20of%20the%20Ledger_American%20Gas%20%to20the%20Rescue%3F.pdf (accessed 10.07.2019)
26. U.S. Energy Information Administration -EIA Available at: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/over view/ (accessed 10.07.2019)
27. World Energy Projection System Plus: Global Activity Module Available at: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/weps/documentation/pdf/wepsplus2016_globalactivitymodule.pdf (accessed 10.07.2019)
28. World Gas Model // Nexant. London: 2010. Available at: http://server.nexant.com/ecc/docs/World Gas Model.pdf (accessed 10.07.2019)

UDK 621. 311. 1

FEATURES OF AGGREGATION OF GLOBAL GAS MARKETS

Zhanna V. Kalinina
PhD., Researcher, e-mail: zhannochka_k@mail.ru
Nikolai I. Ilkevich
Doctor of engineering sciences, e-mail: ilkev@isem.irk.ru
Tatiana V. Dzyubina
PhD., Senior Researcher, e-mail: tvleo@isem.irk.ru
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian branch of Russian Academy of Science
130, Lermontov street, Irkutsk, Russia, 664033

Abstract. Modeling the development of gas supply systems to create world forecasts of their development and interaction of gas markets is carried out on the basis of gas flow models. This paper presents a hierarchy of gas models, mainly foreign ones, their analysis, describes the capabilities, factors taken into account and the results obtained. In all considered models, data on gas supply systems are presented in aggregated form, although the methods of aggregation and their accuracy are not indicated. The paper briefly describes the developed methods of aggregation for solving problems of optimal development of gas supply systems with their multi-level modeling.

Keywords: mathematical model, gas supply system, global gas markets, aggregation, design scheme, technical and economic indicators.

The research was carried out within the project III.17.4.3 of the Fundamental research program of SB RAS (AAAA-A17-117030310437-4).

References

1. Aleksandrov A.V., Yakovlev Ye.I. Proyektirovaniye i ekspluatatsiya sistem dal'nego transporta gaza [Design and operation of long haul gas systems]. Moscow. Nedra. 1974. 432 p. (in Russian)
2. Vol'skiy E.L., Garlyauskas A.I., Gerchikov S.V. Nadezhnost' i optimal'noye rezervi-rovaniye gazovykh promyslov i magistral'nykh gazoprovodov [Reliability and optimal reservation of gas fields and gas pipelines.]. Moscow. Nedra. 1980. 279 p. (in Russian)
3. Goryachev. A.A. Mirovyye gazovyye modeli [World gas models]. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-gazovye-modeli.pdf (accessed 10.07.2019) (in Russian)
4. Yefremov V.A. Setevyye potokovyye modeli dlya upravleniya funktsionirovaniyem i raz-vitiyem Yedinoy sistemy gazosnabzheniya: avtoref. diss. kand. tekhn. Nauk [Network flow models for managing the operation and development of the Unified Gas Supply System: abstract of the thesis. Cand. tech. sciences]. Moscow. VNIIGAZ. 1987. 22 p. (in Russian).
5. Il'kevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina Zh.V. Mnogourovnevoye modelirovaniye razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multi-level modeling of gas supply systems development]. Novosibirsk. Nauka=Science. 2014. 217 p. (in Russian).
6. Kalinina Zh.V. Razrabotka metodov agregirovaniya gazosnabzhayushchikh sistem i issle-dovaniye na ikh osnove napravleniy razvitiya Yedinoy sistemy gazosnabzheniya Rossii na

period do 2030 goda : avtoref. dis. kand. tekhn. Nauk [Development of methods for the aggregation of gas supplying systems and the study on their basis of the directions of development of the Unified Gas Supply System of Russia for the period up to 2030: abstract of thesis. Cand. tech. sciences]. Irkutsk. 2016. 29 p. (in Russian).

7. Model'no-informatsionnyy kompleks SCANER [Model information complex SCANER]. https://www.eriras.ru/files/skaner_light.pdf (in Russian).
8. Nimen'ya I.N., Il'kevich N.I. Modelirovaniye investitsionnoy deyatel'nosti yestestvennoy monopolii (na primere "Gazprom") [Modeling the investment activities of a natural monopoly (on the example of Gazprom]. Novosibirsk. Nauka=Science. 1999. 122 p. (in Russian).
9. Samsonov R.O. Metodologiya formirovaniya skhemy razvitiya i rekonstruktsii gazotransportnoy sistemy RF [Methodology of formation of the development scheme and reconstruction of the gas transmission system of the Russian Federation] // Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoye delo= Electronic scientific journal Oil and Gas Business. 2007. №1. 10 p. Available at: http://ogbus.ru/authors/SamsonovRO/SamsonovRO_1.pdf. (in Russian)
10. Sukharev M.G., Stavrovskiy Ye.R. Rezervirovaniye sistem magistral'nykh truboprovodov [Backing up trunk pipeline systems]. Moscow. Nedra. 1987. Book.1. 168 p. (in Russian).
11. Sukharev M.G., Stavrovskiy Ye.R., Bryanskikh Ye.Ye. Optimal'noye razvitiye sistem gazosnabzheniya [Optimal development of gas supply systems]. Moscow. Nedra. 1981. 294 p. (in Russian)
12. Ford L.R., Falkerson D.R. Potoki v setyakh [Streams in the networks]. Moscow. 1966. 276 p. (in Russian)
13. Martinez Miguel, Paletar Martin, Hecking Harald. The 2014 Ukrainian crisis: Europes increased security position. Available at: http://www.ewi.uni-koln.de/fileadmin/user_upload/Institut/Startseite_Text/The_2014_Ukrainian_crisis_Europes_increased_security_position.pdf (accessed 10.07.2019)
14. World energy model documentation 2016 version. Available at: http://www.iea.org/media/weoweb site/2016/WEM_Documentation_WEO2016.pdf (accessed 10.07.2019)
15. CGEP_American Gas to the Rescue. https://www.yumpu.com/en/document/view/32922271/cgep-american-gas-to-the-rescue (accessed 10.07.2019)
16. Egging R., Holz F., Gabriel S.A. The World Gas Model: A Multi-Period Mixed Complementarity Model for the Global Natural Gas Market // Energy. Elsevier. 2010. T. 35. № 10.
17. European Gas Target Model Review and Update Available at: http://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/ACER_Market_Monitoring_Report_2014 .pdf (accessed 10.07.2019)
18. Global LNG Outlook //Deloitte Center for Energy Solutions, Deloitte Market Point. Deloitte Development. 2012. Available at: http://www.marinemoney.com/sites/all/themes/marinemoney/forums/MMWeek12/presentations/wednesday/LNG 2.00Choi.pdf (accessed 10.07.2019)
19. International Energy Agency. Available at: http://www.iea.org/statistics (accessed 10.07.2019)
20. Licensing the World Gas Model // Nexant. London: 2011. http://server.nexant.com/ecc/docs/World Gas Model Licensing Flyer_May2011.pdf (accessed 10.07.2019)

21. Nesbitt D. M. Scientific Solutions for Complex Decision Problems Challenging Senior Management // Altos Management Partners. 2005. Available at: http://web.stanford.edu/class/msande290/ WarnersCourse-312005.pdf (accessed 10.07.2019)
22. Smeers Yves. Gas models and three difficult objectives. 2009. Available at: http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/e/CORE/dp2008_9.pdf (accessed 10.07.2019)
23. Solutions. Deloitte Development. 2011. Available at: http://www.deloitte.com/as-sets/Dcom-United States/Local Assets/ Documents/Energy_us_er/us_er_Market Point World Oil Model Technical brochure_081011.pdf (accessed 10.07.2019)
24. Subscribe to Nexant Thinking: World Gas Model // Nexant. London: 2014. Available at: www2.nexant.com/brochure/world-gas-model (accessed 10.07.2019)
25. The European side of the ledger. http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/The%20European%20Side%20of%20the%20Ledger_American%20Gas%20%to20the%20Rescue%3F.pdf (accessed 10.07.2019)
26. U.S. Energy Information Administration -EIA Available at: https://www.eia.gov/out-looks/aeo/over view/ (accessed 10.07.2019)
27. World Energy Projection System Plus: Global Activity Module Available at: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/weps/documentation/pdf/wepsplus2016_globalactivitymodule.pdf (accessed 10.07.2019)
28. World Gas Model // Nexant. London: 2010. Available at: http://server.nexant.com/ecc/docs/World Gas Model.pdf (accessed 10.07.2019)

УДК 621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Дунаев Михаил Павлович
Д.т.н., профессор, e-mail: mdunaev10@mail.ru
Довудов Сарфароз Умедович
Аспирант, e-mail: dsu_1991@mail.ru
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83

Аннотация. Статья посвящается моделированию схемы частотно-импульсного преобразователя (ЧИП) в среде Matlab 7.5. Описан принцип работы ЧИП, проведен эксперимент и получены регулировочные и выходные характеристики ЧИП, выполнен анализ характеристик, полученных при моделировании и эксперименте. Показано, что модель схемы ЧИП работает достаточно адекватно.
Ключевые слова: частотно-импульсный преобразователь; широтно-импульсный преобразователь; модель; характеристика.

Цитирование: Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 144–152. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-13

Введение. Наиболее известным и часто применяемым устройством для формирования необходимого закона изменения напряжения является широтно-импульсный преобразователь (ШИП). Из-за относительной простоты, высокой плавности и большого диапазона регулирования [4, 7, 10] ШИП используется в различных отраслях промышленности и техники, особенно он удобен при наличии сети постоянного тока [1, 11]. Кроме того, использование ШИП позволяет получить широкий диапазон регулирования угловой скорости электропривода [12 - 14]. Однако у способа управления с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) имеется и ряд недостатков:

- снижение к.п.д.,
- сложный алгоритм управления,
- высокая стоимость силовых транзисторов,
- повышенные электромагнитные помехи.

Устранение указанных недостатков возможно при использовании способа управления с применением частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и синусоидальной формы импульса [3, 5, 6, 9].

Целью работы является моделирование схемы ЧИП, а также анализ его динамических и статических характеристик.

1. Описание схемы. Принцип регулирования выходного напряжения ЧИП [5] заключается в изменении выходной частоты ЧИП при постоянной длительности (ширине) импульса выходного напряжения t_u, т.е. фактически изменяется длительность паузы t_n (рис. 1).

Примером силовой схемы ЧИП может служить схема, показанная на рис. 1. Фактически это схема однофазного инвертора [5, 8], нагрузка $R_н$ которого включена на стороне постоянного (пульсирующего) тока.

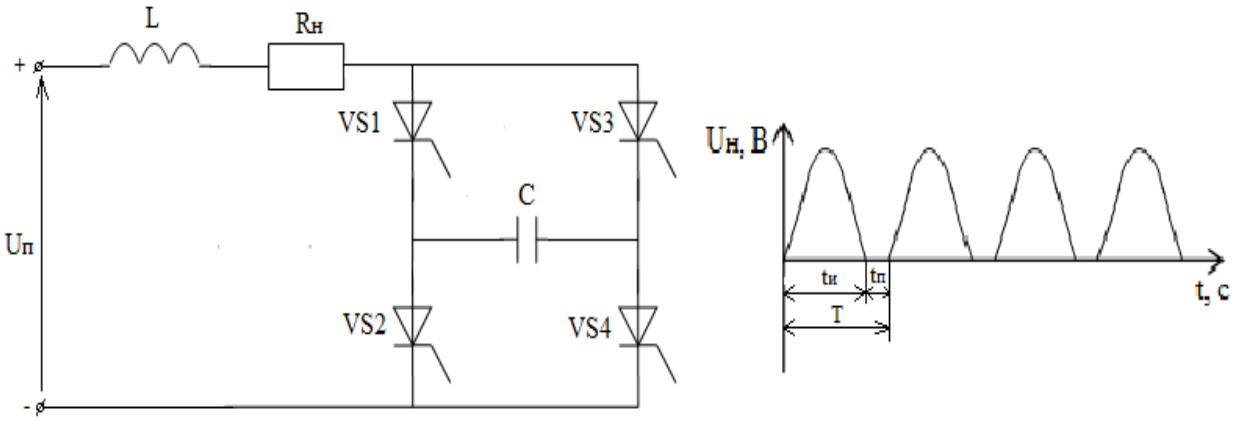


Рис. 1. Схема и диаграммы мостовой схемы ЧИП

Схема состоит из силовых тиристоров VS1-VS4, коммутирующего конденсатора С и коммутирующего дросселя L.

Порядок включения тиристоров схемы: попарно включаются тиристоры VS1,VS4 и VS2,VS3. Затем порядок повторяется.

Основной режим работы схемы (рис. 1) - это режим прерывистого тока в нагрузке. В этом случае имеет место естественная коммутация тиристоров, т.е. тиристоры работающей пары закрываются, когда зарядится конденсатор С и ток уменьшится до нуля. Отметим, что такой способ коммутации весьма надежен.

График зависимости $U_н$ от скважности частоты следования выходных импульсов f называется регулировочной характеристикой ЧИП. Аналитическое выражение для регулировочной характеристики ЧИП:

$$U_н = U_{макс} * f_{отн} \ ,$$

где $U_{макс}$ – максимальное выходное напряжение силовой схемы ЧИП. Максимальное напряжение $U_н$ получается при максимальном значении относительной выходной относительной частоты $f_{отн} = f / f_{макс}$. Изменяя f , можно регулировать среднее значение напряжения на нагрузке.

2. Описание эксперимента. Эксперимент, использующий схему рисунка 1, был проведен на стенде «Частотно-импульсный преобразователь» в лаборатории В-112 кафедры «Электропривод и электрический транспорт». Цель проведения экспериментального исследования - получение статических характеристик ЧИП. Регулировочная характеристика ЧИП, полученная при эксперименте, показана на рисунке 6. Также на рисунках 8, 9 и 10 показаны выходные характеристики ЧИП при частотах 300 Гц, 600 Гц и 900 Гц.

3. Описание модели. Модель схемы ЧИП (рис. 1), реализованная в среде Matlab 7.5 с использованием блоков из библиотеки SimPowerSystem и Simulink [2], показана на рис. 2.

Модель ЧИП содержит следующие блоки:

1 – задающий генератор (ЗГ) импульсов.

2 – распределитель импульсов (РИ) по каналам управления.

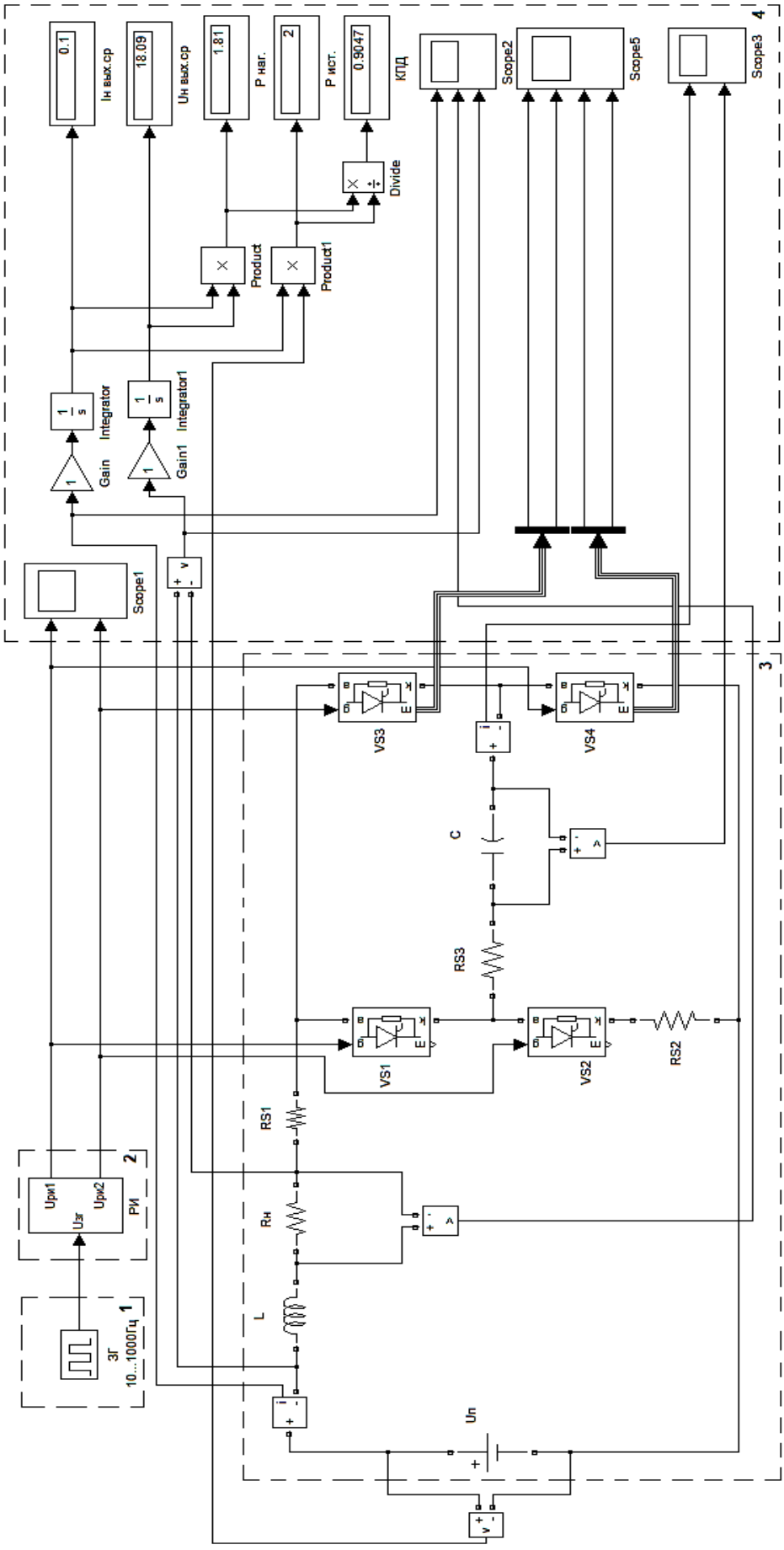


Рис. 2. Модель схемы ЧИП

3 – силовая схема ЧИП, которая состоит из силовых тиристоров VS1, …, VS4; активной нагрузки Rн; коммутирующего дросселя L, последовательно соединенного с нагрузкой; коммутирующего конденсатора С, подключенного к середине мостовой схемы и источника питания с напряжением 20 В.

4 – комплекс измерительных приборов.

Разработанная модель блока РИ по каналам управления приведена на рис. 3. На вход РИ подаются прямоугольные импульсы определенной частоты из блока ЗГ. Используя SR-триггер и логические элементы 2И-НЕ, РИ на выходе вырабатывает прямоугольные импульсы со сдвигом 180 градусов и частотой, вдвое меньшей частоты ЗГ.

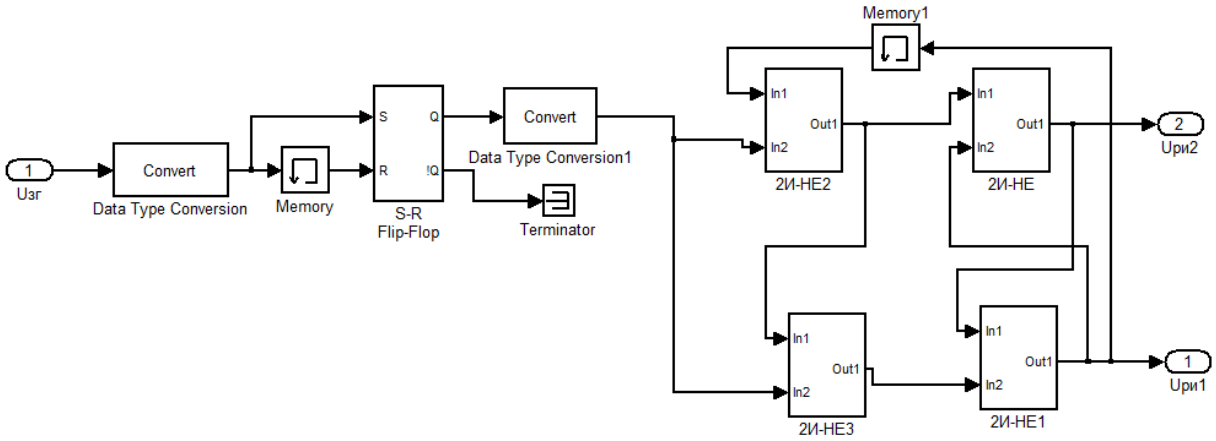


Рис. 3. Модель схемы распределителя импульсов по каналам управления

Напряжение Uри1 поступает на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS4 и через индуктивность L, нагрузку Rн и конденсатор С протекает ток. При этом конденсатор С заряжается. При подаче напряжения Uри2 для отпирания тиристоров VS3 и VS2, конденсатор С запирает тиристоры VS1 и VS4 и ток будет протекать через индуктивность L, нагрузку Rн. Конденсатор С опять начинает заряжаться. Таким образом, отпирание тиристоров происходит при подаче импульсов, поступающих из блока РИ. Запирание тиристоров происходит за счет перезаряда конденсатора С.

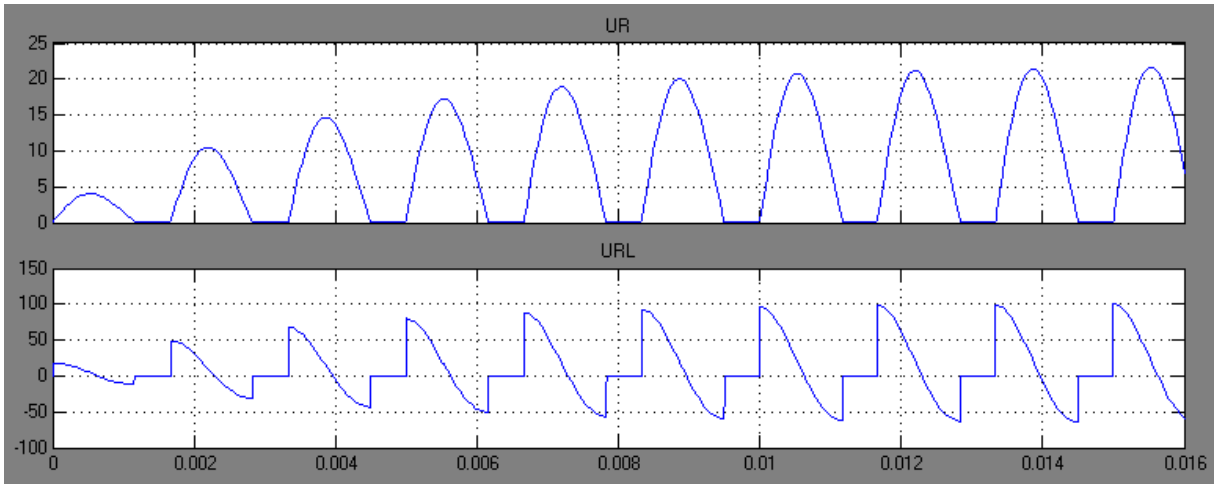


Рис. 4. Временные диаграммы напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке при частоте 300 Гц.

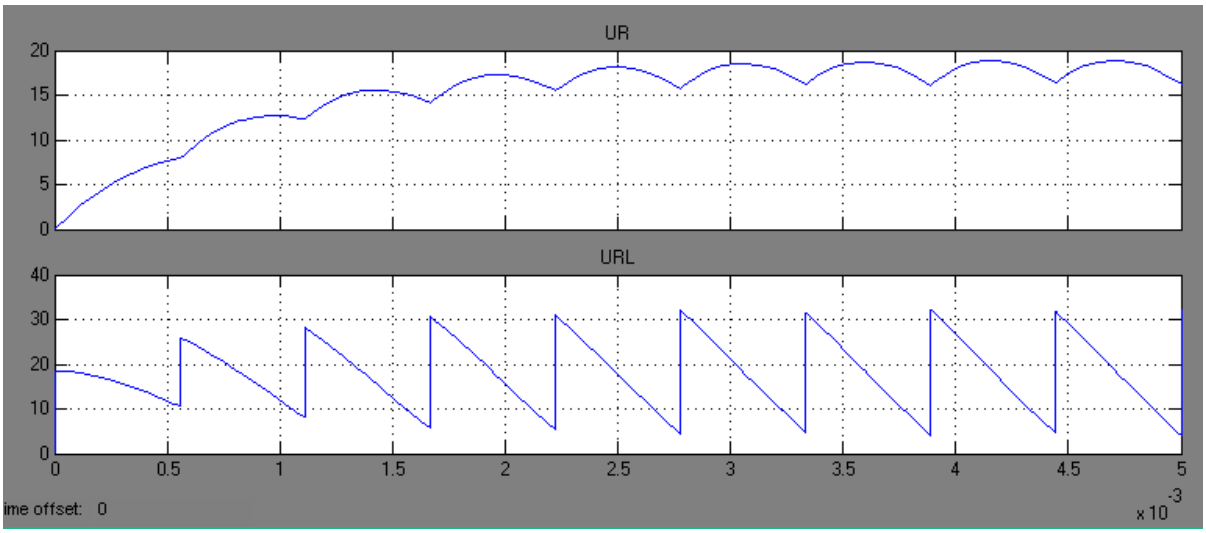


Рис. 5. Временные диаграммы напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке при частоте 900 Гц.

На рисунках 4 и 5 показаны диаграммы напряжения, полученных в результате моделирования на активную (U_R) и на активно-индуктивную нагрузку (U_{RL}) при частотах 300Гц и 900 Гц. Как видно из диаграммы, при частоте 300 Гц между импульсами идет пауза, а при частоте 900 Гц импульсы налагаются друг на друга, из-за чего статическая регулировочная характеристика ЧИП получается нелинейной.

На рисунке 6 приведены регулировочные характеристики ЧИП, полученные при расчете, моделировании и эксперименте. Как видно из рисунка, характеристика, полученная при моделировании, очень похожа на характеристику, которая получена при эксперименте. Это говорит о том, что модель достаточно качественно отражает работу ЧИП.

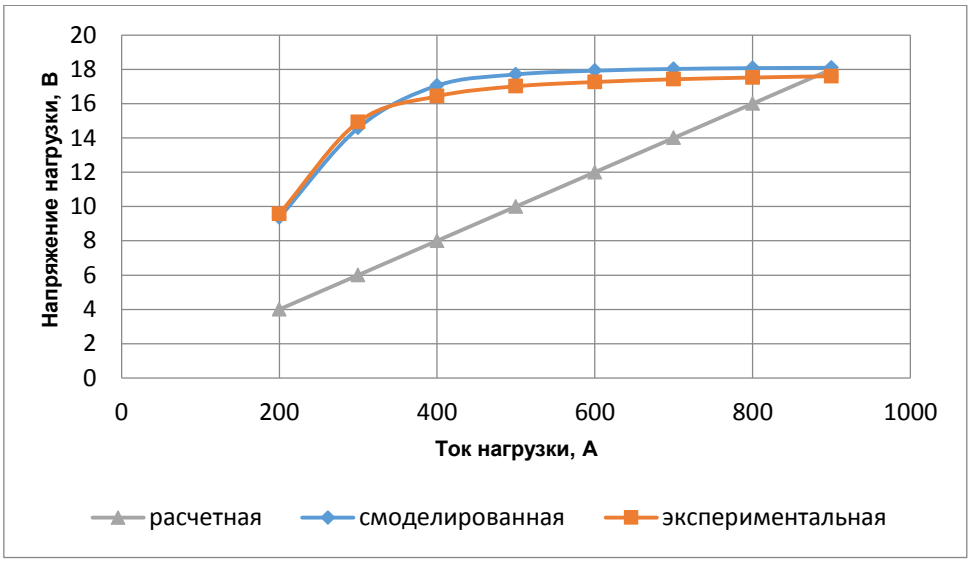


Рис. 6. Регулировочные характеристики ЧИП

На рисунках 7 - 9 показаны выходные характеристики ЧИП при частотах 300 Гц, 600 Гц и 900 Гц, полученные при расчете, моделировании и эксперименте. Полученные модельные выходные характеристики ЧИП достаточно хорошо совпадает с экспериментальными характеристиками.

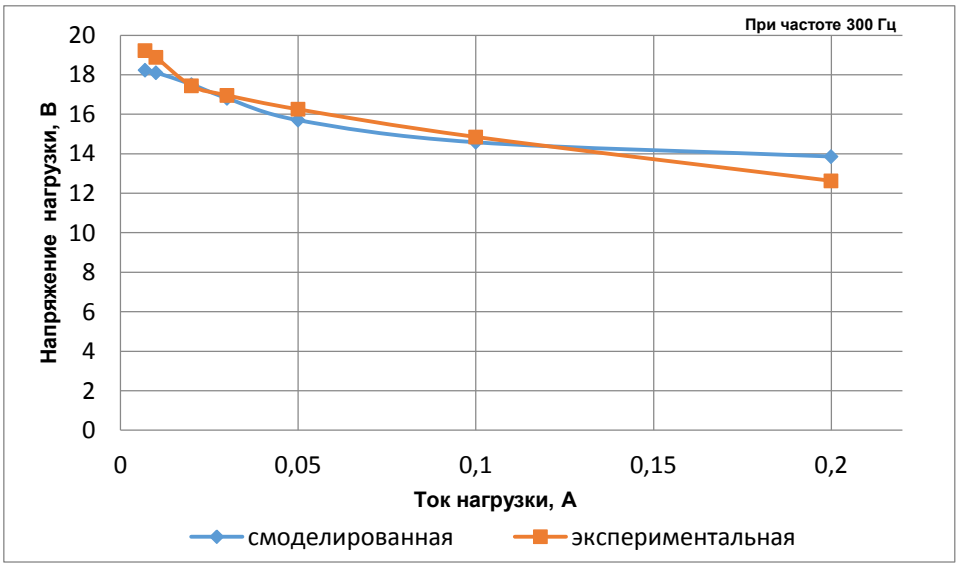


Рис. 7. Выходные характеристики ЧИП при частоте 300 Гц.

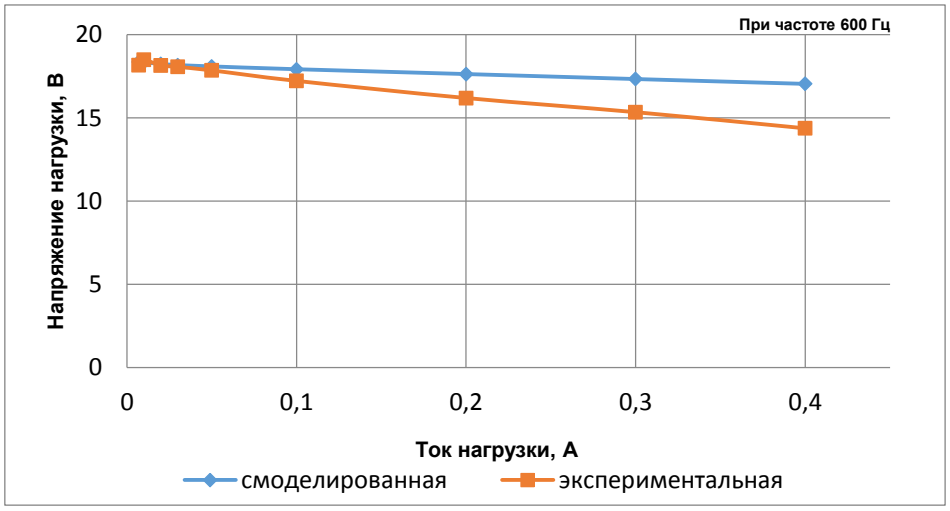


Рис. 8. Выходные характеристики ЧИП при частоте 600 Гц.

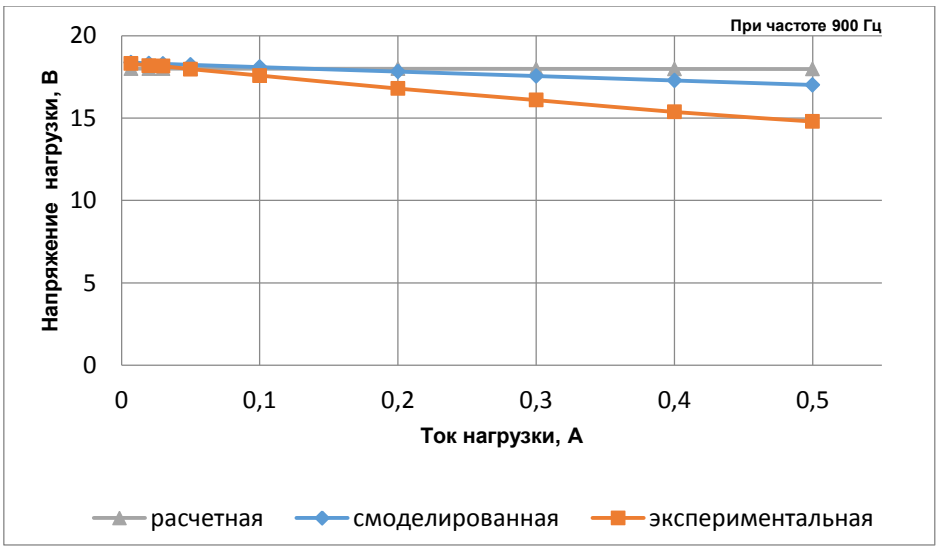


Рис. 9. Выходные характеристики ЧИП при частоте 900 Гц.

Отклонение характеристик модели ЧИП относительно эксперимента при частоте 300 Гц составляет 1,2 %; при частоте 600 Гц – 4,74%; при 900 Гц – 4,99%. Это показывает достаточно высокую адекватность модели ЧИП.

Заключение. Разработана имитационная модель ЧИП в среде Matlab. Получены регулировочные и выходные характеристики модели ЧИП. Анализ полученных статических характеристик модели ЧИП показал, что их отклонение от экспериментальных характеристик не превышает 5%, что свидетельствует о достаточно высокой адекватности модели ЧИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Равашдех А.Я. Особенности управления электроприводом постоянного тока с использованием широтно-импульсного преобразователя (ШИП) // Вестник ИрГТУ. №1(29). 2007. С. 58–61.
2. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7: Самоучитель. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 1104 с.
3. Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоатомиздат. 1982. 216 с.
4. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя // В трудах Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири». Иркутск: ИРНИТУ. 2019. С. 3–7.
5. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами. Иркутск. ИрГТУ. 2004. 103 с.
6. Дунаев М.П., Погорелов С.И. Тенденции развития резонансных инверторов // В трудах Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири». Иркутск: ИрГТУ. 2004. С. 32–35.
7. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2000. Ч. 2. 197 с.
8. Калашников Б.Е., Кривицкий С.О., Эпштейн И.И. Системы управления автономными инверторами. М.: Энергия. 1974. 103 с.
9. Ли Ф. Будущее – за резонансными источниками питания // Электроника. 1990. № 2.
10. Сандлер А.С, Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с ШИМ для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия. 1968. 96 с.
11. Anuja Namboodiri Harshal S. Wani. Unipolar and Bipolar PWM Inverter // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. Vol. 1. Issue 7. Dec-2014 ISSN (online) 2349-6010. Pp. 237–243.
12. Baljeet Singh, Rishabh Bhatt, Anubhav Sharma, Shreya Pandit, Harpreet Kaur Channi. Modeling and Designing of Matlab Based Speed Control of DC Motor Using PWM Technique // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. Vol. 3. Issue 7. Sep-Oct-2017. ISSN (Online) 2395-602X ISSN (Print) 2395-6011. Pp. 681–686.
13. Khan Masoom Raza, Mohd. Kamil1, Pushpendra Kumar. Speed Control of DC Motor by using PWM // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication

Engineering. Vol. 5. Issue 4. April 2016. ISSN (Online) 2278-1021 ISSN (Print) 2319 5940. Pp. 307–309.

14. Nandkishore P.Joshi, Ajay P.Thakar. Speed Control Of DC Motor Using Analog PWM Technique // International Journal of Engineering & technology. Vol. 1. Issue 9. (November 2012). e-ISSN:2278-0181. Pp. 1–5.

UDK 621.314

SIMULATION OF THE FREQUENCY-PULSE CONVERTER CIRCUIT

Mikhail P. Dunaev
Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mdunaev10@mail.ru
Sarfaroz U. Dovudov
Graduate student, e-mail: dsu_1991@mail.ru
Irkutsk National Research Technical University (ISTU)
83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the simulation of the pulse-frequency converter (PFC) circuit in the Matlab 7.5 environment. The authors described the principle of the PFC, carried experiment out got the adjustment and output characteristics of the PFC. The analysis of the characteristics obtained in the simulation and experiment. It is showed that the work of simulated PFC scheme is sufficiently adequate.

Keywords: pulse - frequency converter; pulse - width converter; model; characteristic.

References

1. A.Ya. Al-Ravashdex Osobennosti upravleniya dvigatelem postoyannogo toka s ispol'zovaniyem shirotno-impul'snogo preobrazovatelya (SHIP) [The peculiarities of DC motor control with a pulse-width converter (PWC) // Vestnik IrGTU = Bulletin of ISTU. No 1(29). 2007. Pp. 58–61. (in Russian)
2. Anufriyev I.Ye., Smirnov A.B., Smirnova E.H. MATLAB 7: Samouchitel' [MATLAB 7: Tutorial]. St. Petersburg. BKHV-Peterburg = Publishing House "BHV-Petersburg". 2005. 1104 p. (in Russian)
3. Bulatov O.G., Carenko A.I. Tiristorno-kondensatornyye preobrazovateli [Thyristor-capacitor converters]. Moscow. Energoatomizdat = Publishing house "Energoatomizdat". 1982. 216 p. (in Russian)
4. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy shirotno-impul'snogo preobrazovatelya [Pulse-width converter circuit simulation] // V trudax Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri» = In the works of the All-Russian scientific-practical conference «Improving the efficiency of production and application of electricity in Siberia». Irkutsk. IRNITU= Irkutsk National Research Technical University. 2019. Pp. 3–7. (in Russian)
5. Dunaev M.P. Rezonansnyye invertory dlya upravleniya elektroprivodami [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk. IrGTU = Irkutsk State Technical University. 2004. 103 p. (in Russian)

6. Dunaev M.P., Pogorelov S.I. Tendencii razvitiya rezonansnyx invertorov [Trends in the development of resonant inverters] // V trudax Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri» = In the works of the All-Russian scientific-practical conference «Improving the efficiency of production and use of electricity in Siberia». Irkutsk. IrGTU = Irkutsk State Technical University. 2004. Pp. 32–35. (in Russian)
7. Zinov'yev G.S. Osnovy silovoy elektroniki: Uchebnik [Power Electronics Basics: Textbook]. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGTU = Publishing House Novosibirsk State Technical University. 2000. Tom 2. 197 p. (in Russian)
8. Kalashnikov B.Ye., Krivitskiy S.O., Epshteyn I.I. Sistemy upravleniya avtonomnymi invertorami [Autonomous inverters control systems]. Moscow. Energiya = Publishing house “Energy”. 1974. 103 p. (In Russian).
9. Li F. Budushhee – za rezonansnymi istochnikami pitaniya [The future of resonant power sources] // Elektronika = Electronics. 1990. No 2. (in Russian)
10. Sandler A.S, Gusyatskiy YU.M. Tiristornyye invertory s SHIM dlya upravleniya asinkhronnymi dvigatelyami [PWM thyristor inverters for asynchronous motors controlling]. Moscow. Energiya = Publishing house “Energy”. 1968. 96 p**.** (in Russian)
11. Anuja Namboodiri Harshal S. Wani. Unipolar and Bipolar PWM Inverter // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. Vol. 1. Issue 7. Dec-2014 ISSN (online) 2349-6010. Pp. 237–243.
12. Baljeet Singh, Rishabh Bhatt, Anubhav Sharma, Shreya Pandit, Harpreet Kaur Channi. Modeling and Designing of Matlab Based Speed Control of DC Motor Using PWM Technique // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. Vol. 3. Issue 7. Sep-Oct-2017. ISSN (Online) 2395-602X ISSN (Print) 2395-6011. Pp. 681–686.
13. Khan Masoom Raza, Mohd. Kamil1, Pushpendra Kumar. Speed Control of DC Motor by using PWM // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. Vol. 5. Issue 4. April 2016. ISSN (Online) 2278-1021 ISSN (Print) 2319 5940. Pp. 307–309.
14. Nandkishore P.Joshi, Ajay P.Thakar. Speed Control Of DC Motor Using Analog PWM Technique // International Journal of Engineering & technology. Vol. 1. Issue 9. (November 2012). e-ISSN:2278-0181. Pp. 1–5.