

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№3(31)/2023

6+

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 3 (31)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
 Arshinskiy L.V.
 Berestneva O.G.
 Boukhanovsky A.V.
 Bychkov I.V.
 Woern H.
 Voevodin V.V.
 Wolfengagen V.E.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Zorina T.G.
 Kazakov A.L.
 Kalimoldaev M.N.
 Karpenko A.P.
 Komendantova N.P.
 Kureichik V.V.
 Lis R.
 Massel L.V.
 Moskvichev V.V.
 Ovtcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stennikov V.A.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
 Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
 Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
 Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
 Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумπος Π., Греция, University of Patras
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
 Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
 Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IASA
 Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог
 Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
 Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
 Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
 Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
 Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
 Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
 Executive Editor
 Bakhvalova Z.A.
 Editor Gaskova D.A.
 Editor Massel A.G.
 Techn. Editor Popova M.D.
 Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор	Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Техн. редактор	Попова М.Д.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
 (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - <https://www.imt-journal.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
 Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
 Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.
 Дата выхода 29.09.2023 г. Тираж 50 экз.

CC BY
 © Издательство ИСЭМ СО РАН
 Цена свободная. (6+)

Информационные и интеллектуальные технологии

Калянов Г.Н., Лукинова О.В. Методологические аспекты выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями	5
Хашпер Б.Л., Кантор О.Г. Применение методов случайного поиска и методов машинного обучения к задаче оптимизации в многомерном пространстве	15
Ерженин Р.В., Хребтова Т.П. Методика определения параметров выбора приоритетов при организации первичной медицинской помощи в сельской местности	27
Малимонов М.И., Якубайлик О.Э. Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилемера	41
Федотова О.А., Барахнин В.Б. Тезаурус по информационным технологиям в электронной библиотеке ФИЦ ИВТ	50

Математические и информационные технологии в энергетике

Панасюк В.В. Индикативный метод оценки энергетической безопасности регионов Республики Беларусь	60
Еделев А.В., Карамов Д.Н., Башарина О.Ю. Моделирование автономной микросети	74
Пискунова В.М., Крупенёв Д.С. Моделирование тестовой трехузловой энергосистемы для анализа эффективности применения нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании уровня энергетической безопасности и надежности энергоснабжения потребителей	86

Математическое моделирование

Дудаев М.А. Математическая модель балочного конечного элемента Тимошенко	94
Колесникова С.И. Применение принципов инвариантности для моделирования биоинженерных объектов управления	103
Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора	117
Иванько Я.М., Ковадло И.А., Федурин Н.И. О трех моделях линейного программирования применительно к производству аграрной продукции	124

Вычислительные технологии

Базилевский М.П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий	136
Когай А.Д., Дмитриева М.А. Экспериментально-теоретический подход к оценке параметров макрокинетики гидратации цементных систем	147
Фомин Д.А., Колесникова С.И. Алгоритм предобработки музыкального ряда для его продолжения на основе аппарата анализа нестационарных временных рядов	156

Information and intellectual technologies

Kalyanov G.N., Lukinova O.V. Methodological aspects of error detection in engineering network management processes	5
Khashper B.L., Kantor O.G. Application of random search methods and machine learning methods to optimization problems in multidimensional space	15
Erzhenin R.V., Hrebtova T.P. Methodology for determining of priorities in the organization primary medical care in the rural space	27
Malimonov M.I., Yakubailik O.E. Visualization and analysis of meteorological temperature profiler data	41
Barakhnin V.B., Fedotova O.A. Thesaurus for information technologies in the digital library of FRC ICT	50

Mathematical and information technologies in energy

Panasyuk V.V. Indicative method for assessing the energy security of the regions of the Republic of Belarus	60
Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Modelling autonomous microgrids	74
Piskunova V.M., Krupenev D.S. Analysis of the efficiency of non-linear models of thermal power plants in the study of the reliability of the power supply to the consumers security and reliability of power supply to consumers	86

Mathematical modeling

Dudaev M.A. Mathematical model of the Timoshenko beam finite element	94
Kolesnikova S.I. Application of the principles of invariance for modeling bioengineering control objects	103
Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of the electric drive control system of a walking excavator	117
Ivanyo Y.M., Kovadlo I.A., Fedurina N.I. About three models of linear programming in relation to the production of agricultural products	124

Computing technologies

Bazilevskiy M.P. Software for estimating modular linear regressions	136
Kogai A.D., Dmitrieva M.A. Experimental-theoretical approach to estimating the parameters of the macrokinetics of cement systems hydration	147
Fomin D.A., Kolesnikova S.I. Algorithm for pre-processing a music series for its subsequent generation on the basis of the apparatus for analysis of non-stationary time series	156

Информационные и интеллектуальные технологии

УДК 519.86

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.001

Методологические аспекты выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями

Калянов Георгий Николаевич, Лукинова Ольга Васильевна

Институт проблем управления им. Трапезникова РАН,

Россия, Москва, kalyanov@mail.ru

Аннотация. В работе предложен подход к управлению функционированием инженерной сети на основе интеграции структурных моделей управляющих процессов ресурсно-снабжающей организации и графовой модели самой сети. Особенность подхода заключается в том, что оценивается ущерб при авариях инженерных сетей, возникающий при ошибках в управляющих процессах ресурсно-снабжающей организации. Решается задача поиска ошибок в процессах, причем как статических, возникающих при проектировании процессов, так и в режиме их функционирования, т.е. динамических.

Ключевые слова: инженерная сеть, ресурсно-снабжающая организация, смешанный граф, ошибка в потоках данных, тестирование, статический анализ, динамический анализ

Цитирование: Калянов Г.Н. Методологические аспекты выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями / Г.Н. Калянов, О.В. Лукинова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 05-14. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.001.

Введение. Инженерные сети предназначены для обеспечения потребителей различными ресурсами: водой, теплом, электричеством и др. Нарушение функционирования таких сетей вследствие различных аварийных ситуаций может принести существенный ущерб потребителям. Поэтому актуальной является задача управления функционированием сети, а именно реализация двух основных управляющих процессов (далее – бизнес-процессов [1]): эксплуатации сети (прежде всего, проведение планового технического обслуживания) и ремонта сети (восстановление функционирования сети после различного рода аварий). Именно аварии инициируют наиболее существенный ущерб, который необходимо свести к минимуму. При этом на преодоление последствий аварии напрямую влияет качество процессов управления инженерной сетью. Ошибки в процессах управления могут привести (и, как правило, приводят) к серьезным негативным последствиям.

В работе выделяется и исследуется класс ошибок в процессах управления, получивших название «ошибки в потоках данных». Для обнаружения ошибок данного класса предлагается использование комплекса методов верификации процессов управления, а именно:

- метод статического анализа процессов управления, позволяющий обнаруживать различные типы «грубых» ошибок при исследовании графа процесса;
- метод генерации множества тестовых маршрутов (вариантов процесса управления), в совокупности гарантирующих обнаружение ошибок в потоках данных, а также позволяющих обнаруживать ошибки, выявление которых осуществляется известными методами тестирования, базирующимися на покрытии графа процесса;
- метод разбиения входных данных об авариях в сетях на «обнаруживающие подобласти», позволяющий сгенерировать множество входных тестов;
- метод динамического анализа вариантов процесса управления, позволяющий обнаруживать различные типы «тонких» ошибок при исследовании графа процесса.

Предлагаемый комплекс методов верификации позволит осуществлять более детальный анализ функционирования инженерной сети, а также расширить номенклатуру аналитических и прогнозных процедур. В частности, результатом такого анализа может быть уменьшение

стоимости ремонтов сетевых объектов, выявление критических для функционирования инфраструктуры элементов, оценка потенциального ущерба от аварий различных типов.

1. Интегрированная модель объекта и бизнес-процесса. В основе предлагаемого в данной работе методологического подхода лежит комплексный анализ моделей процессов управления инженерной сетью. В качестве примера инженерной сети будем рассматривать тепловые сети. На рис. 1 приведена схема моделирования предметной области, включающей в себя тепловую инженерную сеть в качестве объекта управления и ресурсо-снабжающую организацию (PCO) в качестве управляющей системы.

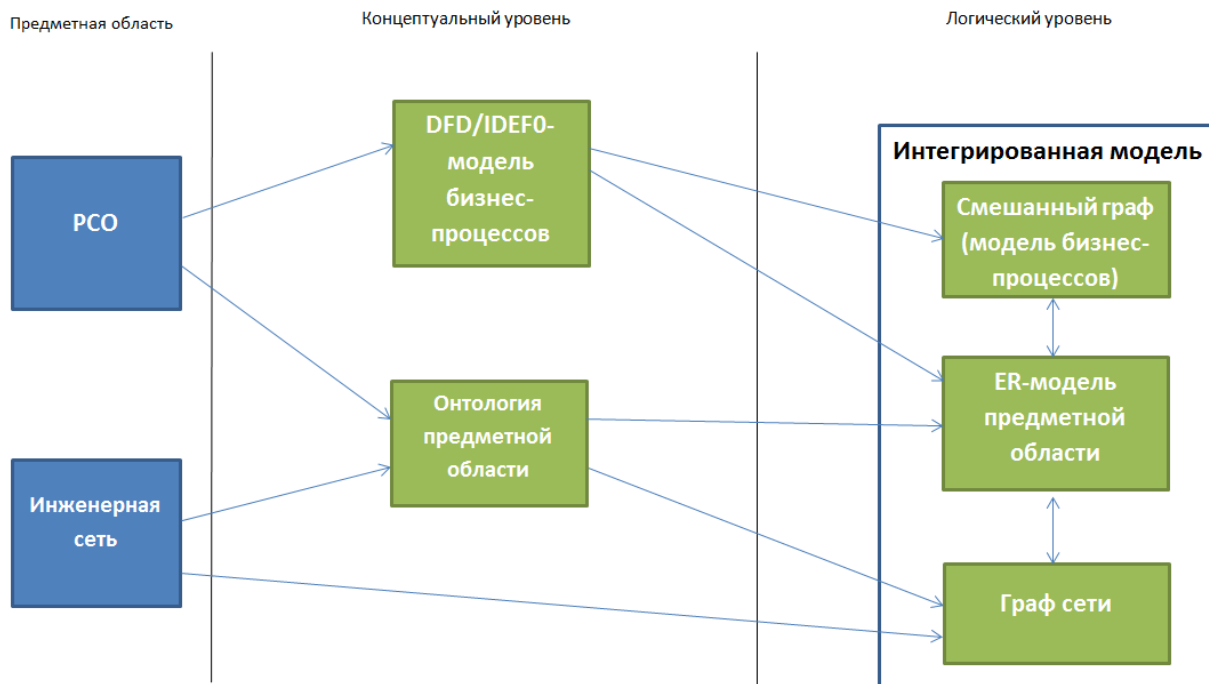


Рис. 1. Схема моделирования предметной области

Моделирование предметной области включает два этапа – построение концептуальных и логических моделей, соответственно. На концептуальном уровне строится функциональная модель процессов эксплуатации и ремонта с использованием одного из наиболее популярных языков визуального моделирования IDEF0 или DFD [2-4], а также онтология предметной области [5]. На логическом уровне строятся три компонента интегрированной модели, служащей основой для анализа и верификации процессов управления инженерной сетью: графовая (функциональная) модель бизнес-процессов, информационная модель предметной области с использованием диаграмм «сущность-связь» (ER-модель) [2, 3], а также графовая модель инженерной сети.

Предлагаемая функциональная модель бизнес-процесса описывается на языке смешанных графов, является многоуровневой и включает в себя 3 взаимосвязанные компоненты: организационно-штатную структуру PCO, собственно модель бизнес-процесса, а также данные об обеспечивающих ресурсах различного вида (материальные, людские и т.п.). В качестве входной информации при построении графа используется модель бизнес-процессов PCO в виде иерархии DFD-диаграмм или IDEF0-диаграмм (при этом нет ограничений на использование какого-либо другого языка визуального функционального моделирования). Данная иерархическая модель преобразуется в прототип одноуровневого графа, который далее дорабатывается вручную. Ручная доработка графа заключается в идентификации участков, которые могут выполняться параллельно, идентификации возможных вариантов продолжения (т.е. выбора бизнес-функции и указания ее возможных управляющих связей) и т.п.

Определим формально многоуровневую модель бизнес-процесса [6].

Нижний уровень модели содержит информационные объекты (ИО), представляемые с помощью кортежей $D_i(a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n)$, где D_i – идентификатор i -го ИО, a_i^j – j -ый атрибут i -го ИО. Бизнес-операция моделируется парой (T_i, D_j) , где T_i – тип операции с ИО. При этом выделяются следующие типы операций: создание, определение, использование, назначение прав доступа, архивирование, уничтожение, регистрация, ознакомление, редактирование, утверждение, вивирование, согласование, публикация для всеобщего доступа, передача на исполнение, привязка к другим ИО. При этом $T_i D_j = (T_i a_j^1, T_i a_j^2, \dots, T_i a_j^n)$, однако для ряда операций (например, операции редактирования) могут существовать такие индексы m , что $T_i a_j^m = a_j^m$, т.е. операция может применяться не ко всем атрибутам ИО. Бизнес-функция моделируется кортежом бизнес-операций $I_m((T_{1m}, D_{1l}), \dots, (T_{km}, D_{kl}))$, где

- I_m – должность или фамилия исполнителя,
- $T_{1m}, \dots, T_{km}$ – элементы множества $\{T_i\}$,
- $D_{1l}, \dots, D_{kl}$ – элементы множества $\{D_j\}$.

При этом, не нарушая общности, можно считать, что внутри бизнес-функции бизнес-операции имеют естественный порядок исполнения.

Модель бизнес-процесса представляет собой граф управления бизнес-функциями $G(N, \{n_0\}, \{n_\phi\}, E, M, EM, EN, R, EK)$, где

- N – множество узлов, каждый из которых соответствует бизнес-функции;
- $\{n_0\}$ и $\{n_\phi\}$ – множества входных и завершающих узлов, соответственно;
- E – множество управляющих дуг, такое, что $\forall n_i, n_j \in N \cup \{n_0, n_\phi\}: (n_i, n_j) \in E$, если возможна ситуация, когда за выполнением бизнес-функции n_i будет выполняться бизнес-функция n_j ;
- M – множество узлов, соответствующих структурным единицам предприятия (вплоть до роли конкретного исполнителя);
- EM – множество дуг подчиненности, такое, что $\forall m_i, m_j \in M: (m_i, m_j) \in EM$, если структурная единица m_i подчинена структурной единице m_j ;
- EN – множество дуг исполнения бизнес-функции, такое, что $\forall m_i \in M, n_j \in N: (m_i, n_j) \in EN$ если бизнес-функция n_j может быть выполнена в подразделении m_i ;
- R – множество ресурсов предприятия;
- EK – множество дуг использования ресурсов, такое, что $\forall r_i \in R, n_j \in N: (r_i, n_j) \in EK$, если бизнес-функция n_j использует при своем выполнении ресурс r_i .

Информационная модель бизнес-процесса представляет собой диаграмму «сущность-связь» в нотации Баркера, сущности которой соответствуют объектам инженерной сети. Для ее построения и приведения к Третьей нормальной форме (ЗНФ) могут использоваться известные алгоритмы выделения сущностей предметной области из функциональной модели процесса (в частности, из DFD-диаграмм).

Графовая модель инженерной сетевой системы описывает ее объекты и связи между ними (структуру системы) и представляет собой граф $G(V, E)$, где V – множество объектов инженерной сетевой системы, E – множество связей между объектами инженерной сетевой системы. В свою очередь множество V можно разделить на:

- V_s – подмножество объектов-источников ресурса;
- V_c – подмножество объектов-потребителей ресурса (промышленные предприятия, жилые дома и др.);

- Vd – подмножество объектов инженерной сетевой системы, распределяющих или преобразующих ресурсы).

Следует отметить, что узлами графа являются как точечные объекты сети (колодцы и др.), так и протяженные (участки трубопроводов и т.п.). Дуги графа отображают только соединения этих объектов между собой.

2. Методы анализа и верификации интегрированной модели

2.1. Понятие ошибки в потоках данных бизнес-процессов. Наиболее типичными для бизнес-процессов современного предприятия ошибками являются ошибки, связанные с информационными ресурсами (ошибки в потоках данных) и возникающие при некорректном построении последовательности вышеприведенных бизнес-операций работы с ИО. Примерами таких ошибок являются:

- создание информационных объектов (ИО) и/или их атрибутов, не используемых в дальнейшей деятельности;
- отсутствие ИО и/или их атрибутов;
- дублирование ИО и/или их атрибутов и, как следствие, их несогласованность и противоречивость и др.

Специфика этих ошибок для бизнес-процесса обусловливается наличием регламентов доступа к атрибутам ИО, запрещающих или ограничивающих доступ при выполнении ряда бизнес-операций. Так, например, такой атрибут сотрудника, как его зарплата, на ряде предприятий доступен только руководству и сотрудникам бухгалтерии.

Отметим, что ключевыми бизнес-операциями являются операции определения, использования и назначения прав доступа, остальные операции являются лишь вариациями вышеназванных. Исключение составляет операция привязки к другим информационным объектам, однако она может быть встроена в последовательность операций с помощью операций использования и определения обеих ИО (сначала того, к которому осуществляется привязка, а затем – привязываемого). Поэтому, не нарушая общности, в дальнейшем будем использовать три перечисленные выше операции.

Для обнаружения ошибок данного класса предлагается использование комплекса методов верификации процессов управления [7, 8, 9], базирующихся на теории зависимости по данным [10], а именно:

- метод генерации множества тестовых маршрутов (вариантов процесса управления), в совокупности гарантирующих обнаружение ошибок в потоках данных, а также позволяющих обнаруживать ошибки, выявление которых осуществляется известными методами тестирования, базирующимися на покрытии графа процесса;
- метод статического анализа процессов управления, позволяющий обнаруживать различные типы «грубых» ошибок при исследовании графа процесса;
- метод динамического анализа вариантов процесса управления, позволяющий обнаруживать различные типы «тонких» ошибок при исследовании графа процесса.

2.2. Тестирование бизнес-процессов. Основной проблемой при планировании процедуры тестирования является проблема выбора критерия (стратегии) тестирования, т.е. задача выделения тех частей объекта, которые необходимо тестировать. Известные критерии тестирования и соответствующие алгоритмы выбора стратегий тестирования, основанные на анализе графовой модели объекта, не обеспечивают обнаружения рассматриваемых ошибок в потоках данных бизнес-процессов. Следовательно, при создании критерия тестирования

бизнес-процесса необходимо учитывать не только его структуру управления, но и структуру его потоков данных.

Для целей тестирования введем трехуровневую модель. На первом уровне строится среда данных – множество всех определений всех атрибутов бизнес-операции, для которых существует маршрут из точки входа в бизнес-процесс в рассматриваемую точку, на котором все элементы множества не переопределяются. На втором уровне строится контекст данных – множество наборов из n определений различных атрибутов, для которых существует маршрут из точки входа в бизнес-процесс в рассматриваемую точку, на котором все элементы набора принадлежат среде данных (т.е. не переопределяются). На третьем уровне строится упорядоченный контекст данных – множество упорядоченных наборов из n определений различных атрибутов, для которых существует маршрут из точки входа в бизнес-процесс в рассматриваемую точку, на котором все элементы набора принадлежат среде данных и выполняются в порядке, предписываемом данным набором.

Соответствующие критерии тестирования выглядят следующим образом:

Критерий 1 требует, чтобы каждый элемент среды данных каждой бизнес-операции был проверен по крайней мере однажды.

Критерий 2 требует, чтобы каждый элемент контекста данных каждой бизнес-операции был проверен по крайней мере однажды.

Критерий 3 требует, чтобы каждый элемент упорядоченного контекста данных каждой бизнес-операции был проверен по крайней мере однажды.

Для удобства исследования предложенных критериев пронумеруем их следующим образом: C_2 - критерий 1, C_3 - критерий 2, C_4 - критерий 3. Известные критерии тестирования, основанные на анализе графовой модели объекта и требующие проверки каждой ветви или каждого функционального узла (оператора) графа по крайней мере однажды, обозначим традиционно C_1 и C_0 , соответственно.

Пусть M^B – множество, элементами которого являются все возможные подмножества множества маршрутов в некотором бизнес-процессе B . Тот факт, что некоторое $M_k \in M^B$ удовлетворяет требованиям некоторого критерия тестирования C_i , обозначим следующим образом: $M_k \leftrightarrow C_i$.

Будем говорить, что некоторый ИО является определенным в бизнес-процессе, если на каждом использующем его маршруте по крайней мере одному из его атрибутов присваивается некоторое значение. Тогда для бизнес-процессов, в которых отсутствуют неопределенные и неиспользуемые ИО, а также конструкции типа skip, справедлива следующая теорема иерархии критериев:

Теорема. Любое множество маршрутов $M_k \in M^B$, удовлетворяющее требованиям критерия C_i для $1 \leq i \leq 4$, также удовлетворяет и требованиям любого из критериев C_j при $1 \leq j < i$.

Таким образом, предложенные критерии тестирования позволяют:

- обеспечить обнаружение специфических для бизнес-процессов ошибок в потоках данных, связанных с их обработкой под различными масками, обеспечивающими регламенты доступа;
- обеспечить выявление всех тех ошибок, обнаружение которых может производиться с помощью традиционных критериев, основанных на анализе программных графов и применяемых к бизнес-процессам.

2.3. Статический анализ потоков данных бизнес-процессов. Метод статического анализа потоков данных основан на введении специальной дисциплины взаимодействия состояний информационных объектов (ИО) на любом этапе выполнения бизнес-процесса. Состояние ИО определяется последним обращением к нему и задается следующим образом:

$$S_i(A = (a_1, a_2, \dots, a_m)) = (i, Q = (q_1, q_2, \dots, q_m), D = (d_1, d_2, \dots, d_m)), \text{ где}$$

- i – номер узла графа бизнес-процесса;

- q_j – тип обращения к j -му атрибуту ИО: $q_j \in \{w, r, n\}$, где w – определение атрибута, r – использование атрибута, n – отсутствие обращения к атрибуту;
- d_j – элемент маски доступа к j -му атрибуту ИО: $d_j \in \{W, R, N\}$, где W – разрешение доступа на определение атрибута, R – разрешение доступа на использование атрибута, N – запрещение доступа к атрибуту.

Далее, не нарушая общности, будем считать, что ИО содержит единственный атрибут.

При анализе потоков данных основное внимание обращается на последовательность состояний ИО (т.е. фактически на последовательность определений/использований его атрибутов). Будем обозначать эту последовательность следующим образом:

$$d^{i1} q^{i1} d^{i2} q^{i2} \dots d^{ik} q^{ik},$$

где верхний индекс обозначает номер узла графа бизнес-процесса, в котором производится обращение к рассматриваемому ИО.

Для корректной работы бизнес-процесса по крайней мере должны удовлетворяться следующие 5 правил, касающихся построенной последовательности состояний ИО:

- 1) последовательность не должна содержать цепочек $\dots d^i q^i \dots$, в которых $d^i = N$, а $q^i \in \{w, r\}$;
- 2) последовательность не должна содержать цепочек $\dots d^i q^i \dots$, в которых $d^i = R$, а $q^i = w$;
- 3) $\forall i$ такого, что $(q^i = r) \wedge (d^i \neq N) \exists j < i$ такое, что $(q^j = w) \wedge (d^j = W)$.
- 4) $\forall i, j$, таких, что $(q^i = w) \wedge (d^i = W) \wedge (q^j = w) \wedge (d^j = W) \exists i < k < j$, такое, что $(q^k = r) \wedge (d^k \neq N)$.
- 5) $\forall i$ такого, что $(q^i = w) \wedge (d^i = W) \wedge (\neg \exists j > i, \text{ такого, что } (q^j = w) \wedge (d^j = W)) \exists k > i$, такое, что $(q^k = r) \wedge (d^k \neq N)$.

Нарушения перечисленных правил вызывают ошибки при выполнении бизнес-процесса (или, по крайней мере, являются симптомами ошибок) и могут происходить по следующим причинам:

- попытки использования неопределенных атрибутов ИО;
- повторные определения атрибутов без промежуточного их использования;
- некорректные определения прав доступа к ИО и их атрибутам;
- неиспользуемые ИО и/или их атрибуты;
- ошибки в маршрутизации ИО, приводящие к задержкам (например, график ремонта из-за неверной последовательности функций: формирование наряд-задания, накладных, заявок на запчасти);
- отсутствующие ИО и/или их атрибуты (например, уровень воды для плана восстановления после наводнения) и др.

2.4. Динамический анализ потоков ресурсов бизнес-процессов

Для целей динамического анализа в качестве модели ресурсов удобно использовать индексные множества, т.к. обычная интерпретация ресурса как пары (наименование, количество) не позволяет обнаруживать ошибки, связанные с их использованием. Под индексным множеством понимается пятерка $P(I, X, I, B, \Phi)$, где

- I – множество индексов;
- X – множество мест хранения данных о ресурсах («элементов памяти»), при этом $x \in X$ есть пара (x_1, x_2) , где x_1 – имя экземпляра сущности информационной модели предприятия (ER-модели), соответствующего конкретному ресурсу, x_2 – имя атрибута сущности, определяющего количество экземпляров ресурса данного вида;
- $I: I \longleftrightarrow X$ – взаимно-однозначное отображение идентификации;

- B – множество допустимых состояний элементов памяти, разбивающееся на непересекающиеся классы состояний;
- $\Phi: I \rightarrow B \cup \varepsilon$ – определяет допустимые состояния следующим образом (при этом f – функция классификации, ставящая в соответствие элементам каждого класса состояний определенное целое число, однозначно идентифицирующее данный класс):

$$\Phi(x) = \begin{cases} f(x_2), & \text{если } \exists j \in I: I(j) = x \\ \varepsilon & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Состояние индексного множества на любом этапе бизнес-процесса определяется последним обращением к нему и задается следующим образом: $S(P) = (n, Q, ACT)$, где

- $n \in N$ (множество узлов бизнес-функций в графе управления бизнес-функциями);
- Q – тип обращения (d – объявление, w – поступление на склад, r – получение со склада, b – бронирование, o – снятие брони);
- ACT – права доступа к ресурсу $r \in R$ исполнителя $m \in M$ (множества узлов ресурсов и исполнителей в графе управления бизнес-функциями, соответственно), при этом $ACT(m, r)=1$, если доступ разрешен, и $ACT(m, r)=0$, в противном случае.

Задается семантика различных типов обращения к индексному множеству. Например, семантика объявлений для каждого индексного множества задает вводимые им объекты и заключается в следующем:

- 1) выбор множества индексов I для объекта P ;
- 2) выбор множества элементов памяти X ;
- 3) проверка $X \cap Y = \emptyset \quad \forall Y$ для всех объявленных ранее объектов;
- 4) установление взаимно-однозначного соответствия $I: I \leftrightarrow X$;
- 5) обнуление всех элементов x_2 множества X ($\forall x=(x_1, x_2) \in X$): происходит установление $x_2 = 0$.

Предлагаемый метод динамического анализа потоков ресурсов основан на концепции абстрактной семантической машины, представляющей собой отладочный инструмент, работающий в автоматическом режиме. Эта машина моделирует бизнес-среду и способна в режиме интерпретации осуществлять выявление ошибок в потоках данных о ресурсах путем вызова подпрограмм, соответствующих различным типам операций обращений к индексному множеству.

Отметим, что предложенный метод динамического анализа восходит к работам Венской школы [11, 12] и является одной из первых попыток описания семантики визуального языка моделирования для автоматического обнаружения семантических ошибок в бизнес-процессах.

3. Методика выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями.

Схема предлагаемой методики приведена на рис. 2. Ниже прокомментированы ее ключевые моменты.

Динамический анализ также может осуществляться на каждом из сгенерированных маршрутов, обнаруживая при этом ошибки, связанные с наличием/использованием ресурсов в каждой конкретной ситуации. Отметим, что задача генерации тестовых наборов данных, обеспечивающих прохождение заданного маршрута, в общем случае является алгоритмически неразрешимой и выходит за рамки данного исследования.

Второй вариант генерации маршрутов тестирования базируется на методе разбиения входных данных на «обнаруживающие подобласти», позволяющем сгенерировать множество входных тестов. Соответствующие критерии тестирования требуют проверки лишь одного набора данных из каждой подобласти и, возможно, наборов на границах подобластей. В нашем случае в качестве входных данных выступает классификатор аварий, где каждый тип аварии

соответствует некоторой обнаруживающей подобласти. При этом каждому типу аварии соответствует некоторая часть процесса реакции на аварию, а в совокупности эти части составляют процесс ликвидации последствий аварий.

Последующие этапы методики на основании ошибок, обнаруженных на этапах статического и/или динамического анализа, осуществляют оценку потенциального ущерба и предлагают варианты послеаварийного восстановления сети. Соответствующие методы базируются на шкале ущербов, позиционирующей виды ущерба по значимости их последствий, а также логико-дифференциальных моделях технологических процессов, протекающих в объектах сети [5].

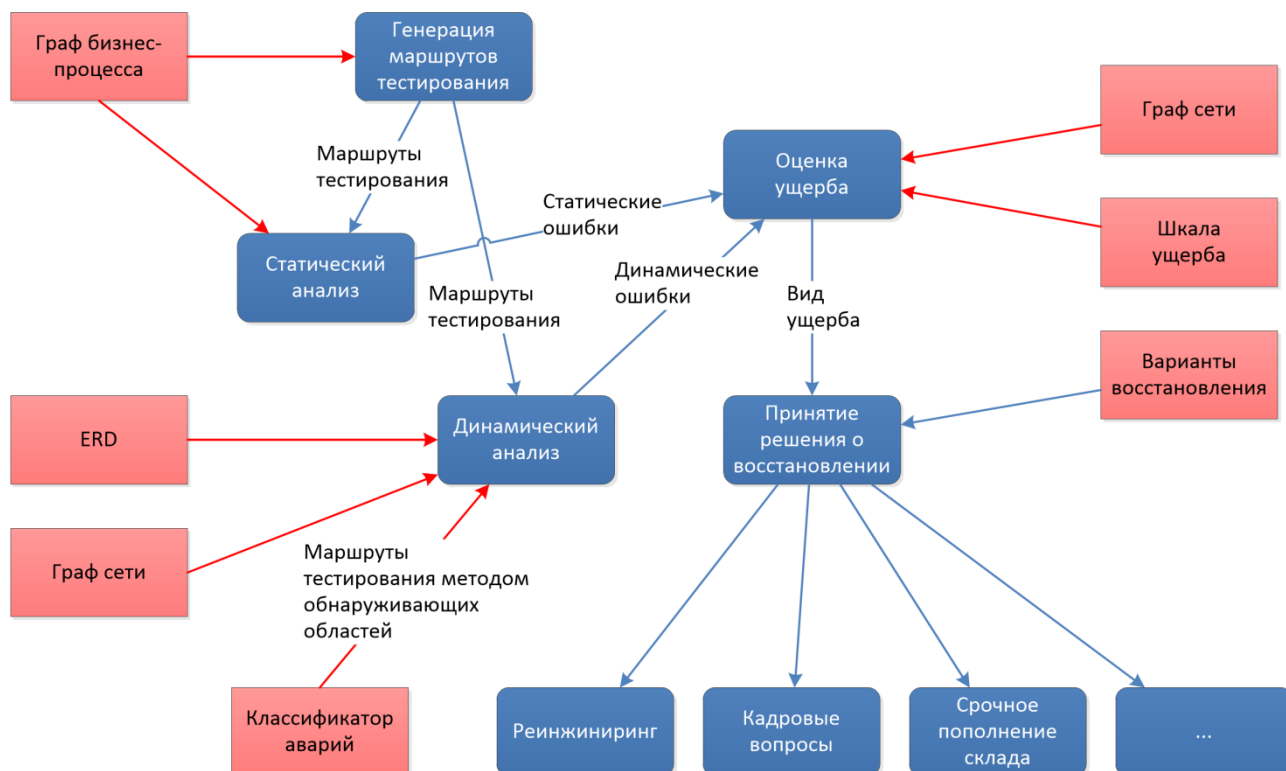


Рис. 2. Схема методики выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями

Заключение. В работе предложен подход к управлению функционированием инженерной сети на основе интеграции структурных моделей бизнес-процессов, реализуемых ресурсно-снабжающей организацией, а также графовой модели самой сети. Особенность подхода заключается в том, что оценивается ущерб при авариях инженерных сетей, возникающий при ошибках в бизнес-процессах ресурсно-снабжающей организации. Решается задача поиска ошибок в процессах, причем как статических, возникающих при проектировании процессов, так и в режиме их функционирования, т.е. динамических.

Для решения задачи описаны и классифицированы ошибки процессов управления, влияющие на функционирование сети; предложен способ преобразования структурных моделей процессов в смешанные графы; разработан ряд методов анализа и верификации смешанных графов процессов; на основе анализа графовой модели процессов рассмотрены критерии и стратегии, позволяющие строить маршруты их тестирования, обеспечивающие обнаружение ошибок определенных классов; предложена концептуальная схема методики выявления ошибок в процессах управления инженерными сетями.

Таким образом, описанный подход позволяет предложить способ принятия решений с целью минимизации ущерба от различных аварий инженерных сетей, базирующийся на методах поиска статических и динамических ошибок бизнес-процессов.

Список источников

1. Калянов Г.Н. Бизнес-процессы: от аморфного определения к формальной теории / Г.Н. Калянов // Автоматизация в промышленности, 2023. – № 1. – С. 25-30.
2. Калашян А.Н. Структурные модели бизнеса: DFD-технологии / А.Н. Калашян, Г.Н. Калянов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 256 с.
3. Черемных С.В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 208 с.
4. Калянов Г.Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 240 с.
5. Гребенюк Г.Г. Модели и методы управления технологической инфраструктурой на базе цифровых двойников / Г.Г. Гребенюк, Г.Н. Калянов, О.В. Лукинова [и др.]. // 14-я Международная конференция "Управление развитием крупномасштабных систем" (MLSD-2021): труды. – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 834-845.
6. Калянов Г.Н. Теория и практика реорганизации бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 212 с.
7. Калянов Г.Н. О теории бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. // Программная инженерия, 2018. – Т. 9. – № 3. – С. 99-109.
8. Калянов Г.Н. Теория бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2023. – 412 с.
9. Калянов Г.Н. Верификация бизнес-процессов / Г.Н. Калянов // 21-я научно-практическая конференция Инжиниринг предприятий и управление знаниями: труды. – М.: 2018. – С. 72-75.
10. Векторизация программ: теория, методы, реализация (сборник статей): пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 272 с.
11. Оллонгрэн А. Определение языков программирования интерпретирующими автоматами: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 288 с.
12. Семантика языков программирования (сборник статей): пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 395 с.

Калянов Георгий Николаевич. Профессор, доктор технических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, главный научный сотрудник. AuthorID: 2332, SPIN: 6015-4622, ORCID: 0000-0003-2429-0703, Kalyanov@mail.ru, ИПУ РАН, Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

Лукинова Ольга Васильевна. Доцент, доктор технических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ведущий научный сотрудник, Российский технологический университет МИПЭА, профессор кафедры информационной безопасности. AuthorID: 142037, SPIN: 4361-0837, ORCID: 0000-0002-5576-7749, lo-bars@mail.ru, ИПУ РАН, Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

UDC 519.86

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.001

Methodological aspects of error detection in engineering network management processes

Georgy N. Kalyanov, Olga V. Lukinova

Institute of Control Sciences RAS,
Russia, Moscow, kalyanov@mail.ru

Abstract. The paper proposes an approach to managing the functioning of an engineering network based on the integration of structural models of a resource-supplying organization managing processes and a graph model of the network itself. The peculiarity of the approach is that the damage in case of accidents of engineering networks arising from errors in the management processes of the resource-supplying organization is assessed. The problem of finding errors in processes is solved, both static, arising during the design of processes, and in the mode of their functioning, i.e. in dynamics.

Keywords: engineering network, resource supply organization, mixed graph, error in data flows, testing, static analysis, dynamic analysis

References

1. Kalyanov G.N. Biznes-protsessy: ot amorfnoy opredeleniya k formal'nyy teoriyam [Business processes: from amorphous definition to formal theory]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2023, no. 1, pp. 25-30.
2. Kalashyan A.N., Kalyanov G.N. Strukturnyye modeli biznesa: DFD-tekhnologii [Structural business models: DFD-technologies]. M., *Finansy i statistika* [Finance and Statistics], 2003, 256 p.
3. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. Strukturnyy analiz sistem: IDEF-tekhnologii [Structural analysis of systems: IDEF-technologies]. M., *Finansy i statistika* [Finance and Statistics], 2001, 208 p.
4. Kalyanov G.N. Modelirovaniye, analiz, reorganizatsiya i avtomatizatsiya biznes-protsessov [Business processes modeling, analysis, reorganization and automation]. M., *Finansy i statistika* [Finance and Statistics], 2006, 240 p.
5. Grebenyuk G.G., Kalyanov G.N., Kovalev S.P., Krygin A.A., Lukinova O.V., Nikishov S.M. Modeli i metody upravleniya tekhnologicheskoy infrastrukturoy na baze tsifrovyykh dvoynikov [Models and methods of technological infrastructure management based on digital doubles]. 14-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Upravleniye razvitiyem krupnomasshtabnykh system" (MLSR-2021): trudy. [Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-scale Systems Development" (MLSD-2021)], Moscow, IPU RAS, 2021, pp. 834-845.
6. Kalyanov G.N. Teoriya i praktika reorganizatsii biznes-protsessov [The theory and practice of business process reorganization]. Moscow, SINTEG, 2000, 212 p.
7. Kalyanov G.N. O teorii biznes-protsessov [On the theory of business processes]. *Programmnaya inzheneriya* [Software Engineering], 2018, vol. 9, no. 3, pp. 99-109.
8. Kalyanov G.N. Teoriya biznes-protsessov [Theory of business processes]. M., *Goryachaya liniya – Telekom* [Hotline – Telecom], 2023, 412 p.
9. Kalyanov G.N. Verifikatsiya biznes-protsessov [Business processes verification]. 21-ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Mashinostroyeniye predpriyatiy i upravleniye izmereniyami": trudy. [21st Scientific and practical conference "Enterprise Engineering and Knowledge management": proceedings], M., 2018, pp. 72-75.
10. Vektorizatsiya programm: teoriya, metody, realizatsiya (sbornik statey) [Vectorization of programs: theory, methods, implementation (collection of articles)]. M., Mir, 1991, 272 p.
11. Ollongren A. Opredeleniye yazykov programmirovaniya interpretiruyushchimi avtomatami [Definition of programming languages by interpreting automata]. M., Mir, 1977, 288 p.
12. Semantika yazykov programmirovaniya (sbornik statey) [Semantics of programming languages (collection of articles)]. M., Mir, 1980, 395 p.

Kalyanov Georgy Nikolaevich. Professor, doctor of technical sciences, Institute of control problems named after V.A. Trapeznikova RAS, chief researcher. AuthorID: 2332, SPIN: 6015-4622, ORCID: 0000-0003-2429-0703, Kalyanov@mail.ru, IPU RAS, Russia, 117997, Moscow, st. Profsoyuznaya, 65.

Lukina Olga Vasilievna Associate professor, doctor of technical sciences, Institute of control problems named after V.A. Trapeznikova RAS, leading researcher, Russian technological university MIREA, professor of the Department of information security. AuthorID: 142037, SPIN: 4361-0837, ORCID: 0000-0002-5576-7749, lobars@mail.ru, IPU RAS, Russia, 117997, Moscow, st. Profsoyuznaya, 65.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена после рецензирования 31.07.2023; принята к публикации 18.08.2023.

The article was submitted 06/20/2023; approved after reviewing 07/31/2023; accepted for publication 08/18/2023.

УДК 519.85

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.002

Применение методов случайного поиска и методов машинного обучения к задаче оптимизации в многомерном пространстве

Хашпер Белла Леонидовна, Кантор Ольга Геннадиевна

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Россия, Уфа, bellakhashper@gmail.com

Аннотация. В работе предложен алгоритм решения задачи условной оптимизации в многомерном пространстве с применением методов случайного поиска и методов машинного обучения. Алгоритм апробирован для задачи количественного анализа многокомпонентных смесей на основе данных ультрафиолетовой (УФ) спектрометрии. Методом случайного поиска в комбинации с методами машинного обучения получена информация, способствующая планированию физико-химических экспериментов, направленных на решение задачи параметрической идентификации системы уравнений Фирордта.

Ключевые слова: многомерная оптимизация, метод случайного поиска, статистические методы, методы машинного обучения, задача классификации, задача регрессии, дерево решений, метод Trust-region, число обусловленности

Цитирование: Хашпер Б.Л. Применение методов случайного поиска и методов машинного обучения к задаче оптимизации в многомерном пространстве / Б.Л. Хашпер, О.Г. Кантор // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 15-26. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.002.

Введение. Задачи многомерной оптимизации возникают в различных сферах. В частности, один из подходов к количественному анализу многокомпонентных смесей связан с использованием метода Фирордта, формальное представление которого сводится к системе линейных алгебраических уравнений [1]:

$$AX = B, \quad (1)$$

где A – квадратная матрица размерности $n \times n$, X и B – вектор-столбцы размерности $n \times 1$, n – количество компонентов смеси. Назначение системы (1) состоит в том, чтобы определять неизвестные концентрации элементов смеси X , зная физико-химические параметры, зафиксированные в элементах A и B , которые определяются на основе применения специальных методов обработки экспериментальных данных, что приводит к неустраняемым погрешностям. При этом погрешности элементов матрицы A существенно выше, и они значимо влияют на результаты определения концентраций X . Таким образом, возникает необходимость корректировки элементов матрицы A . В работах [1, 2] предложен подход, основанный на сведении данной проблемы к решению оптимизационных задач.

Так, используя идеи чебышевского приближения, математическую модель для определения элементов матрицы A при заданных векторах X и B можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \xi &\rightarrow \min, \\ |AX - B| &\leq \xi, \\ X &\in \Omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где ξ – предельно допустимая погрешность аппроксимации, Ω – множество решений, обусловленных физическим смыслом задачи. Таким образом, проблема идентификации матрицы A сводится к необходимости решения задачи условной оптимизации в многомерной области.

Искомая матрица A должна не только обеспечивать лучшее приближение имеющихся экспериментальных данных, но и учитывать специфику модели (1), где она в дальнейшем будет использоваться. Известно, что для линейных систем важным критерием является устойчивость получаемого решения. В данном контексте при определении матрицы A актуальным является использование числа обусловленности в качестве критерия ее оптимальности.

Для определения элементов матрицы A в настоящей работе разработаны алгоритмы, основанные на применении методов случайного поиска и машинного обучения.

1. Обзор методов поиска экстремального значения функции. Одним из самых простых способов поиска точки экстремума является задание равномерной сетки на области поиска и расчёт значений целевой функции в каждом узле сетки [3]. Для многомерного пространства задание равномерной сетки на области поиска и расчет значения целевой функции во всех узлах сетки может привести к очень большим затратам вычислительных ресурсов. По некоторым оценкам, время выполнения полного перебора растёт экспоненциально относительно размера входных данных. При высокой вычислительной сложности применения полного перебора для поиска оптимального значения целевой функции, зависящей от множества параметров, применяются различные алгоритмы поиска экстремума в многомерной области. Выбор метода зависит от постановки решаемой задачи, опыта исследователя, характеристик оптимизируемой функции, характеристик области. Не для всех классов задач есть готовые методы. Для некоторых задач оптимизации нужно применять специфические алгоритмы. С развитием информационных технологий стало возможным реализовывать и применять методы, использующие элемент случайности. Также для уточнения решения задачи оптимизации могут применяться алгоритмы машинного обучения.

1.1. Статистические методы или методы случайного поиска. Методы оптимизации можно разделить на детерминированные и статистические (методы случайного поиска) [4]. Детерминированные методы основаны на точных математических алгоритмах. Они обеспечивают гарантированную сходимость к оптимальному решению. С ростом размерности задач эффективность детерминированных методов поиска уменьшается [5]. На практике часто информация об оптимизируемом объекте слишком мала для того, чтобы можно было применить детерминированные методы. Поэтому в таких случаях часто применяют статистические методы. Статистические методы или методы случайного поиска – это методы, использующие элемент случайности. Случайным образом может выбираться направление спуска, длина шага, величина штрафа при нарушении ограничения [5].

Метод случайного поиска эффективен при решении задач большой размерности или при поиске глобального экстремума. Преимущества метода случайного поиска проявляются с ростом размерности задач, так как вычислительные затраты в детерминированных методах поиска с ростом размерности растут быстрее, чем в статистических алгоритмах [5].

В ходе метода случайного поиска произвольно выбираются точки из рассматриваемой области, и в каждой точке рассчитывается значение целевой функции. В качестве решения принимается точка, в которой значение функции минимально (максимально). Точки выбираются, пока не выполнится определённый критерий (будет выбрано определённое количество точек, пройдёт определённое время, будет найдено решение, удовлетворяющее требуемой точности и пр.).

Метод случайного поиска может быть применён в следующих случаях [6]:

- многомерная область содержит большой процент удовлетворительных решений;
- многомерная область не является однородной.

Метод случайного поиска может применяться к функциям, не имеющим аналитического выражения, и к функциям, у которых сложно вычислить градиент.

Алгоритм метода случайного поиска в общем случае включает следующие шаги:

- 1) определение области поиска;
- 2) определение критерия остановки генерации точек (количество точек, время, требуемая точность);
- 3) генерация случайной точки;
- 4) вычисление значения целевой функции в сгенерированной точке;
- 5) выбор точки с оптимальным значением целевой функции;
- 6) повторение шагов 3)-5) алгоритма, пока не выполнится критерий остановки.

Основные преимущества метода случайного поиска:

- простота программной реализации и отладки;
- надёжность и устойчивость к выбросам;
- универсальность;
- возможность введения операций обучения;
- возможность введения операций прогнозирования точки экстремума.

Основным недостатком метода случайного поиска является необходимость большого количества итераций для достижения точного результата. Этот недостаток может быть устранён применением метода случайного поиска вместе с методами машинного обучения [7].

1.2. Методы машинного обучения. Теория машинного обучения возникла в конце 1950-х гг. и развивается на стыке прикладной статистики, численных методов оптимизации, комбинаторики, дискретного анализа, вычислительной математики [8]. Машинное обучение – это раздел теории искусственного интеллекта, предметом которого является поиск методов решения задач путем обучения в процессе решения сходных задач. Для построения таких методов используются средства алгебры, математической статистики, дискретной математики, теории оптимизации, численных методов, и других разделов математики [9]. Распространёнными задачами, решаемыми методами машинного обучения, являются задача классификации и задача регрессии.

Задача классификации заключается в прогнозировании, к какому классу относится объект, основываясь на его характеристиках. Задача классификации часто решается с помощью алгоритмов машинного обучения. Эти алгоритмы обучаются на основе набора данных с известными метками классов, чтобы определить зависимости между характеристиками объектов и их принадлежности к определенному классу. Результатом работы алгоритма является модель, которая может применяться для классификации новых объектов.

Задача регрессии – это предсказание числового значения целевой переменной на основе характеристик объекта. Для ее решения используются алгоритмы машинного обучения, которые обучаются на данных с известными значениями целевой переменной. Результатом работы алгоритма является модель, которая может использоваться для предсказания значений целевой переменной для новых объектов.

Для решения задач классификации и регрессии часто используются деревья решений. Деревья решений моделируют неизвестные заранее правила и представляют их в иерархическом и последовательном виде, где каждому атрибуту соответствует свой узел, на основе которого дается решение [10]. В «листьях» дерева решений стоят значения целевой функции (регрессионное дерево решений) или номер класса (классификационное дерево решений), а в остальных узлах – условия перехода, определяющие, по какому из ребер осуществляется переход [11].

Таким образом, для решения задачи (2) методом случайного поиска в комбинации с методами машинного обучения:

- в пространстве поиска выбираются случайные точки;
- для каждой точки рассчитывается значение целевой функции;
- на основе полученных данных проводится статистический анализ;
- методами машинного обучения классифицируются полученные значения целевой функции;
- определяются ограничения на значения параметров, позволяющие получить минимальные значения целевой функции.

3. Апробация алгоритма. Разработать алгоритм случайного поиска в комбинации с методами машинного обучения в общем виде достаточно сложно, так как он будет зависеть от характеристик целевой функции, ограничений, области и других параметров. Для решения каждой задачи необходимо применять специфический подход с учётом всех условий.

Рассмотрим применение метода случайного поиска с методами машинного обучения на примере задачи количественного анализа многокомпонентных смесей на основе данных УФ спектроскопии. Эта задача сводится к задаче параметрической идентификации вида (3) [12]:

$$\begin{aligned} \gamma_{ij} &\rightarrow \min(\gamma_{ij} \rightarrow \max), i, j = \overline{1,5}, \\ |A'X - B| &\leq 0,01, \\ |\gamma_{ij} - 1| &\leq \xi^*, i, j = \overline{1,5}, \\ \gamma_{ij} &\geq 0, i, j = \overline{1,5}, \end{aligned} \quad (3)$$

где A – матрица молярных коэффициентов поглощения размерностью 5×5 , B – вектор оптических плотностей размерностью 5, γ_{ij} – поправочные коэффициенты, $\gamma_{ij} \geq 0$, A' – матрица молярных коэффициентов поглощения с учётом поправочных коэффициентов: $A' = (a'_{ij})$, $a'_{ij} = \gamma_{ij} \cdot a_{ij}$, X – вектор концентраций компонентов смеси, ξ^* – оптимальное решение задачи (2).

Решение задачи (3) позволяет получить интервалы значений параметров для каждого параметра γ_{ij} (минимальные и максимальные значения), $i, j = \overline{1,5}$. Нужно из этих интервалов найти значения параметров γ_{ij} , минимизирующие число обусловленности матрицы A' $\text{cond}(A')$:

$$\text{cond}(A') = \|A'\| \cdot \|A'^{-1}\|, \quad (4)$$

где $\|\cdot\|$ – обозначение нормы соответствующей матрицы. В качестве нормы выбрана евклидова норма. Таким образом, в 25мерном пространстве нужно найти точку (значения параметров γ_{ij} , $i, j = \overline{1,5}$), минимизирующую значение $\text{cond}(A')$. Известны интервалы для каждого параметра.

Рассмотрим схему решения поставленной задачи методом случайного поиска с применением методов машинного обучения (рисунок 1).

Рассмотрим алгоритм решения поставленной задачи методом случайного поиска с применением методов машинного обучения. На вход алгоритм принимает 25 интервалов для каждого параметра γ_{ij} , матрицу молярных коэффициентов поглощения A и число симуляций.

1. Проверяется, есть ли параметры γ_{ij} , для которых минимальные и максимальные значения совпали. Если есть, то эти параметры исключаются из рассмотрения. Размерность задачи уменьшается.

2. Выбирается точка случайным образом в качестве стартовой точки для алгоритма минимизации. Решается задача минимизации числа обусловленности. Находится точка минимума.

3. Повторяем пункт 2 для каждой симуляции.

4. Получаем набор точек минимума и соответствующих им чисел обусловленности.

5. Строим распределение значений числа обусловленности.

6. Рассчитываем парную корреляцию параметров γ_{ij} и числа обусловленности.

7. Исключаем из рассмотрения параметры, слабо коррелирующие с числом обусловленности.

8. По результатам, полученным в пункте 5, выбираем два значения числа обусловленности m_1 и m_2 ($m_1 < m_2$), которые будут делить выборку на три части. Будем считать, что значения числа обусловленности, которые меньше, чем m_1 , относятся к категории «Отлично», значения числа обусловленности, которые больше, чем m_1 , и меньше, чем m_2 , относятся к категории «Хорошо», значения числа обусловленности, которые больше, чем m_2 , относятся к категории «Плохо».

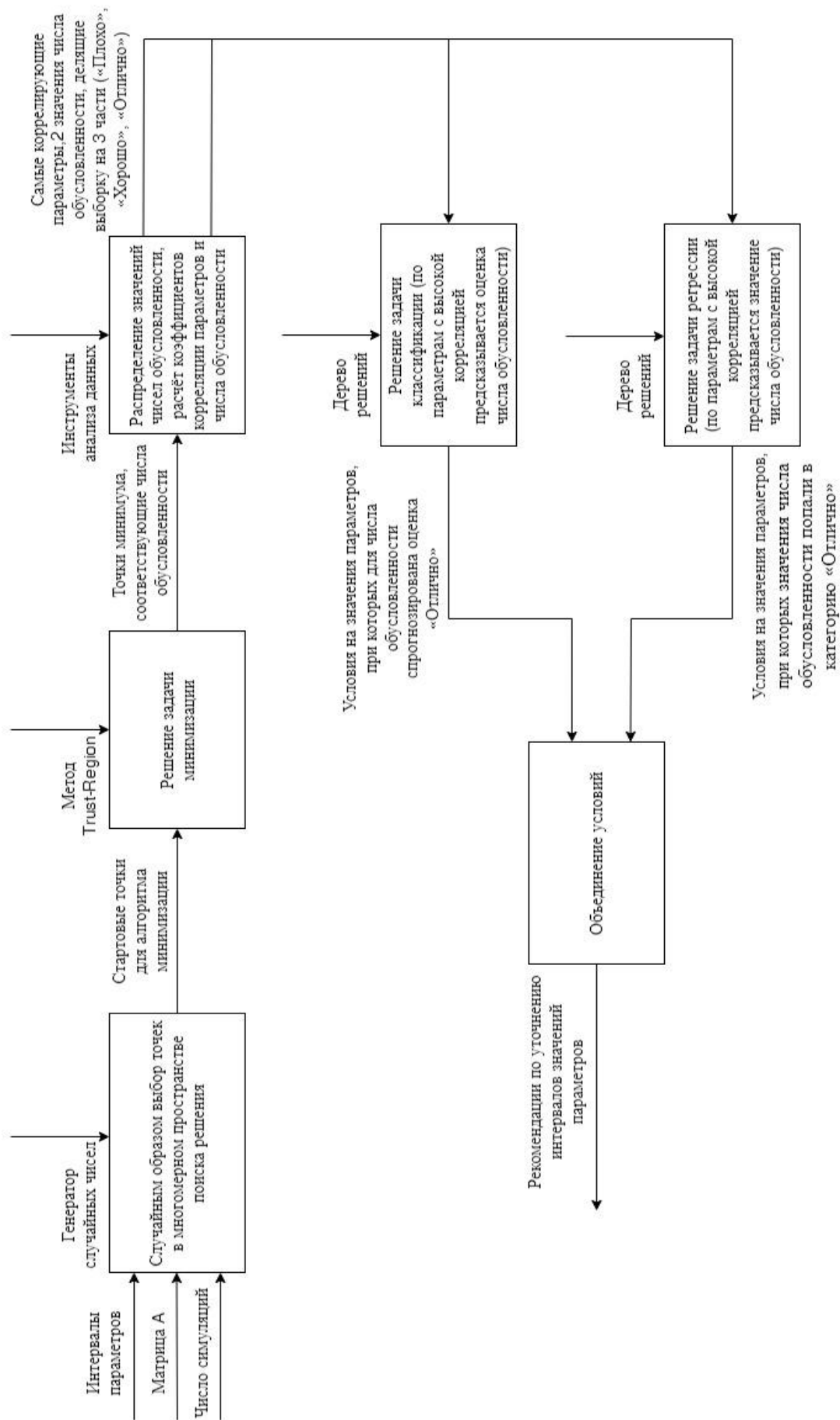


Рис. 1. Схема решения задачи

9. Строятся графики зависимости числа обусловленности от каждого параметра γ_{ij} с высокой корреляцией. Если по графикам можно определить граничные значения параметров, соответствующие значениям числа обусловленности из группы «Отлично», выдаются рекомендации по сужению диапазонов этих параметров для уменьшения значения числа обусловленности.

10. Решается задача классификации (по параметрам с высокой корреляцией предсказывается оценка числа обусловленности). Фиксируются условия на значения параметров γ_{ij} , при которых для числа обусловленности спрогнозирована оценка «Отлично».

11. Решается задача регрессии (по параметрам с высокой корреляцией предсказывается значение числа обусловленности). Фиксируются условия на значения параметров γ_{ij} , при которых значения числа обусловленности попали в категорию «Отлично».

12. Объединяются условия, полученные при решении задач классификации и регрессии. Если полученные значения числа обусловленности удовлетворяют требованиям к точности, в качестве рекомендаций к значениям параметров γ_{ij} выдаются найденные условия на значения параметров.

13. Алгоритм повторяется, пока получаемые значения числа обусловленности не будут удовлетворять требованиям.

4. Результаты вычислительного эксперимента. Экспериментальные данные:

$$A = \begin{pmatrix} 54000 & 30800 & 35800 & 28500 & 30900 \\ 30900 & 22800 & 28300 & 27900 & 28800 \\ 19600 & 21000 & 21800 & 18500 & 16050 \\ 50500 & 24370 & 17630 & 15070 & 11800 \\ 60780 & 24150 & 15350 & 13000 & 11700 \end{pmatrix}$$

Интервалы значений параметров, полученные при решении задачи (3), приведены в таблице 1.

Таблица 1. Интервалы значений параметров γ_{ij}

γ_{ij}	γ_{i1}	γ_{i2}	γ_{i3}	γ_{i4}	γ_{i5}
γ_{1j}	[0.973; 0.973]	[1.333; 1.4]	[1.312; 1.4]	[1.175; 1.4]	[1.057; 1.197]
γ_{2j}	[1.014; 1.014]	[1.277; 1.4]	[1.25; 1.4]	[1.09; 1.4]	[0.91; 1.114]
γ_{3j}	[1.048; 1.048]	[0.745; 0.892]	[1.185; 1.4]	[1.272; 1.4]	[1.3; 1.4]
γ_{4j}	[1.056; 1.056]	[0.747; 0.904]	[1.07; 1.4]	[1.206; 1.4]	[1.232; 1.4]
γ_{5j}	[0.779; 1.4]	[0.6; 1.4]	[0.6; 1.4]	[0.6; 1.4]	[0.6; 1.4]

В таблице выделены параметры, у которых совпали минимальные и максимальные значения диапазонов. У этих параметров фиксированные значения.

В качестве числа симуляций выбрано значение 2000. Экспериментально установлено, что с увеличением числа симуляций, больше 2000, существенно не изменяются статистические характеристики получаемых значений числа обусловленности и корреляций числа обусловленности с параметрами γ_{ij} (рис. 2).

2000 раз для случайно выбранной стартовой точки найдено минимальное значение числа обусловленности и точка минимизации. Решение задачи минимизации находилось функцией `minimize` из библиотеки `scipy.optimize`. Для решения нелинейной задачи условной оптимизации в многомерной области в функцию `minimize` требуется передать минимизируемую функцию, начальную точку, область поиска решения, ограничения, накладываемые на решение, и метод оптимизации. В качестве метода оптимизации выбран метод Trust-region, базирующийся на определении региона вокруг лучшего решения, в котором квадратичная модель ап-

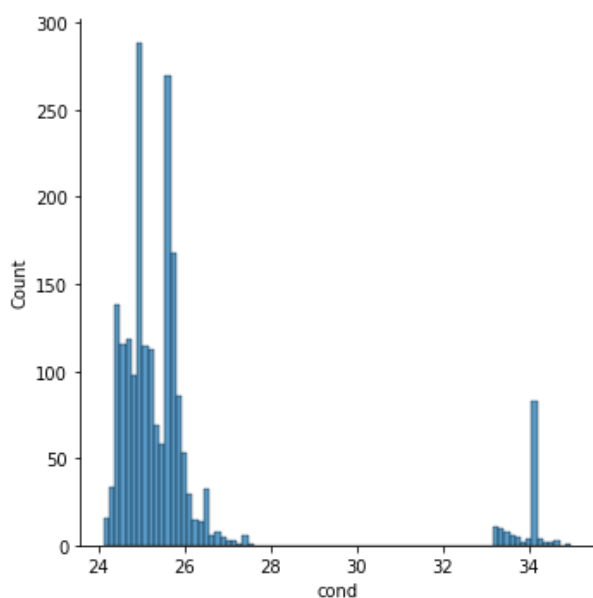
проксимирует целевую функцию. Trust-region методы надежны и устойчивы, могут быть применены к плохо обусловленным задачам и имеют хорошие свойства сходимости. Хорошая сходимость обусловлена тем, что размер области на каждой итерации зависит от улучшений, сделанных на предыдущих итерациях [13].

Построена корреляция каждого из незафиксированных параметров γ_{ij} и числа обусловленности $\text{cond}(A')$. В таблице 2 представлены параметры с высокими значениями корреляций.

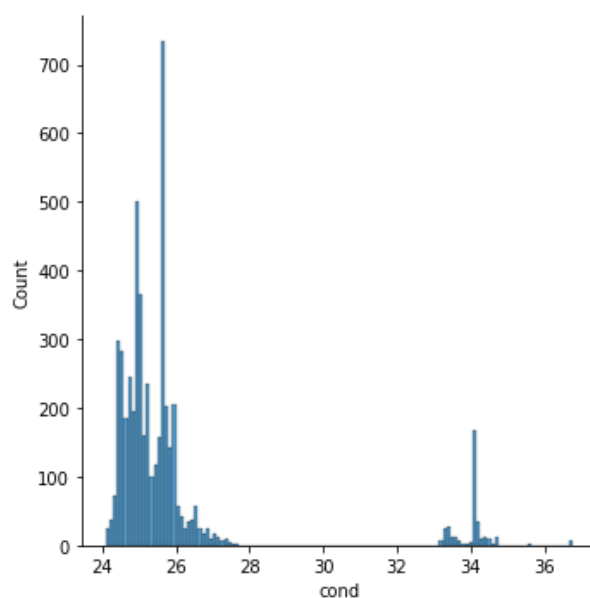
Таблица 2. Коэффициенты корреляций каждого из параметров γ_{ij} с числом обусловленности $\text{cond}(A')$

γ_{44}	-0.824142
γ_{24}	-0.659639
γ_{12}	-0.591375
γ_{14}	0.540963
γ_{32}	0.492502
γ_{15}	-0.488911
γ_{25}	0.441271
γ_{13}	0.408883
γ_{35}	-0.406343

На рисунке 2 представлена частотная диаграмма распределения полученных значений числа обусловленности. Все полученные значения принадлежат интервалу [24, 36]. Наиболее распространёнными оказались значения от 24 до 28. В диапазон от 28 до 32 не попало ни одного значения числа обусловленности. В интервале от 32 до 36 частота попадания значений выше, чем в интервале от 28 до 32, но ниже, чем в интервале от 24 до 28. На основании анализа результатов вычислительного эксперимента диапазон значений был разделен на 3 класса: от 24 до 28, от 28 до 32, от 32 до 36. В качестве границ классов выбраны значения 28 и 32. Таким образом, получены следующие категории значений числа обусловленности: $\text{cond}(A') \leq 28$ – категория «Отлично»; $28 < \text{cond}(A') \leq 32$ – категория «Хорошо»; $\text{cond}(A') > 32$ – категория «Плохо». На рисунке 2 видно, что в категории «Хорошо» нет значений.



a)



b)

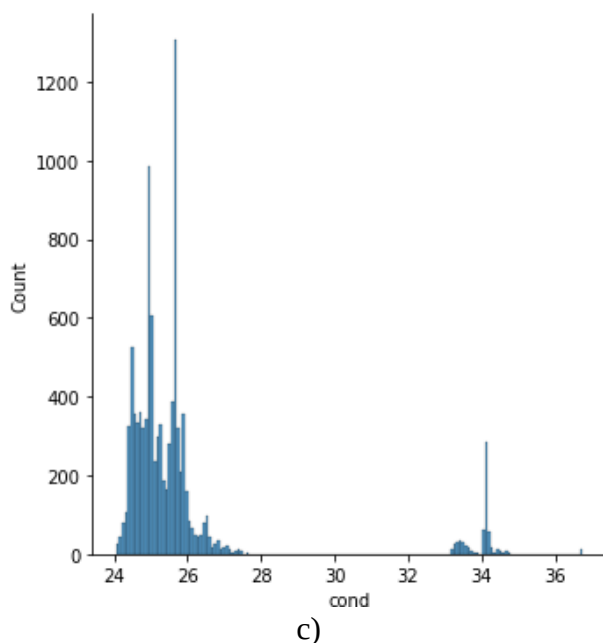


Рис. 2. Частотная диаграмма распределения значений числа обусловленности

а) для 2000 симуляций б) для 5000 симуляций с) для 10000 симуляций

На рисунке 3 представлен график зависимости $cond(A')$ от γ_{44} , параметра с самой высокой корреляцией.

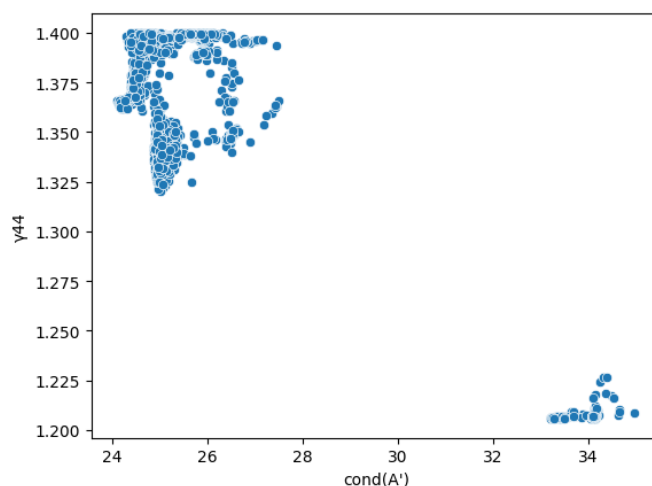


Рис. 3. График зависимости $cond(A')$ от γ_{44}

Видно, что если $\gamma_{44} > 1.3$, $cond(A') > 28$. То есть, если диапазону параметра γ_{44} задать нижнюю границу 1.3, значения $cond(A')$ получатся гарантированно хорошие (категория «Отлично»), обеспечивающие устойчивость решения.

Далее была решена задача классификации методом дерева решений с использованием функции DecisionTreeClassifier библиотеки sklearn.tree. 2000 значений числа обусловленности и соответствующих им наборов параметров поделены на обучающую (1500 значений) и тестовую (500 значений) выборки. Оценка предсказывалась по всем коэффициентам γ_{ij} , кроме зафиксированных. Числа обусловленности не использовались для предсказаний, только оценка. Глубина дерева варьировалась от 2 до 10. Во всех случаях получалось дерево глубины 2 (рисунок 4). Предсказывалось за проверку одного условия. В некоторых случаях предсказывалась оценка «Отлично», если $\gamma_{24}(x_9) > 1.176$ (рисунок 4а) В других случаях предсказывалась оценка «Отлично», если $\gamma_{44}(x_{19}) > 1.274$ (рисунок 4б).

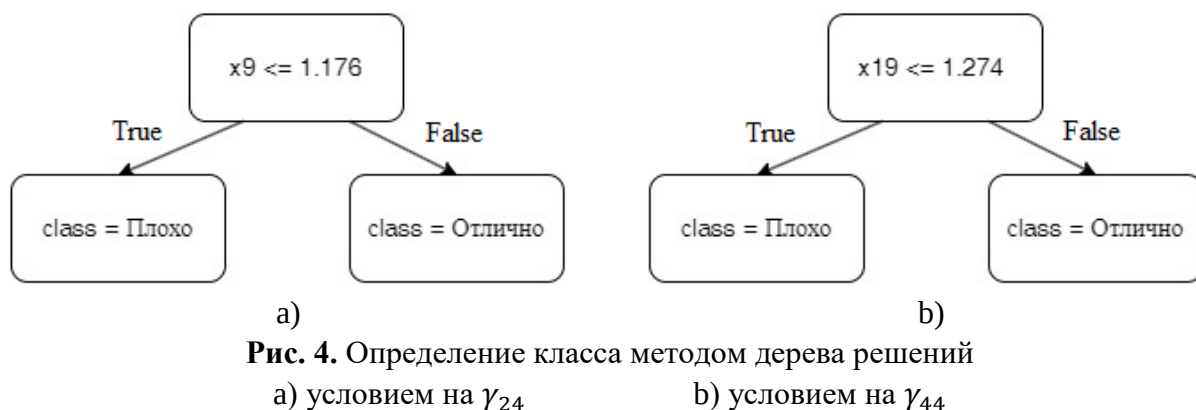


Рис. 4. Определение класса методом дерева решений

Все построенные деревья предсказали без ошибки. 468 значений тестовой выборки были отнесены к классу «Отлично», 32 значения были отнесены к классу «Плохо».

Затем была решена задача регрессии методом дерева решений с использованием функции `DecisionTreeRegressor` библиотеки `sklearn.tree`. 2000 значений числа обусловленности и соответствующих им наборов параметров поделены на обучающую (1500 значений) и тестовую (500 значений) выборки. Значение числа обусловленности предсказывалось по всем коэффициентам γ_{ij} , кроме зафиксированных. Глубина дерева варьировалась от 2 до 10. При глубине, равной 6, средняя абсолютная ошибка (насколько фактические числа обусловленности тестовой выборки в среднем отличаются от предсказанных) составила 0.09022.

На рисунке 5 представлен фрагмент дерева глубины 6, по веткам которого можно прийти к минимальному значению числа обусловленности. На первом уровне производилась дифференциация по условию $\gamma_{44} > 1.274$, как и при решении задачи классификации. В дереве решений параметры называются сквозными номерами ($x_1, x_2, \dots, x_{25}$).

Согласно дереву решений минимальное значение $cond(A')$ (24.239) получается при одновременном выполнении следующих условий на параметры: $\gamma_{44}(x_{19}) > 1.274$, $\gamma_{32}(x_{12}) \leq 0.756$, $\gamma_{33}(x_{13}) > 1.399$, $\gamma_{45}(x_{20}) > 1.399$, $\gamma_{24}(x_9) \leq 1.367$, $\gamma_{51}(x_{21}) \leq 0.969$.

С учётом ограничений на γ_{24} и γ_{44} , полученных деревом решений для задачи классификации, сгенерированы 200 стартовых точек и решена задача минимизации. Значения числа обусловленности для уточнённых интервалов уменьшились. Минимальное значение числа обусловленности – 24.304, максимальное – 27.333. Исходные интервалы (табл. 1) скорректированы по правилам, полученным деревом решений для задачи регрессии. Сгенерированы 200 стартовых точек. Для каждой стартовой точки решена задача минимизации числа обусловленности. Минимальное значение числа обусловленности составило 24.089, максимальное – 39.923.

По результатам применения деревьев классификации и регрессии определены интервалы значений корректирующих коэффициентов γ_{ij} , которые обеспечивают меньшие значения числа обусловленности матрицы A' .

Заключение. Решение задачи методами линейного программирования, полученное в работах [1], [11], улучшено при помощи применения алгоритма, основанного на комбинации статистических методов и методов машинного обучения. Уточнены интервалы параметров γ_{ij} , минимизирующих число обусловленности коэффициентной матрицы в модели (1). Полученная информация составляет основу для планирования физико-химических экспериментов, направленных на уточнение значений коэффициентов экстинций (элементов матрицы A). Так, наиболее приоритетными направлениями подобных экспериментов являются те, которые призваны уточнить значения коэффициентов экстинций, для которых значения γ_{ij} значительно отклоняются от единицы.

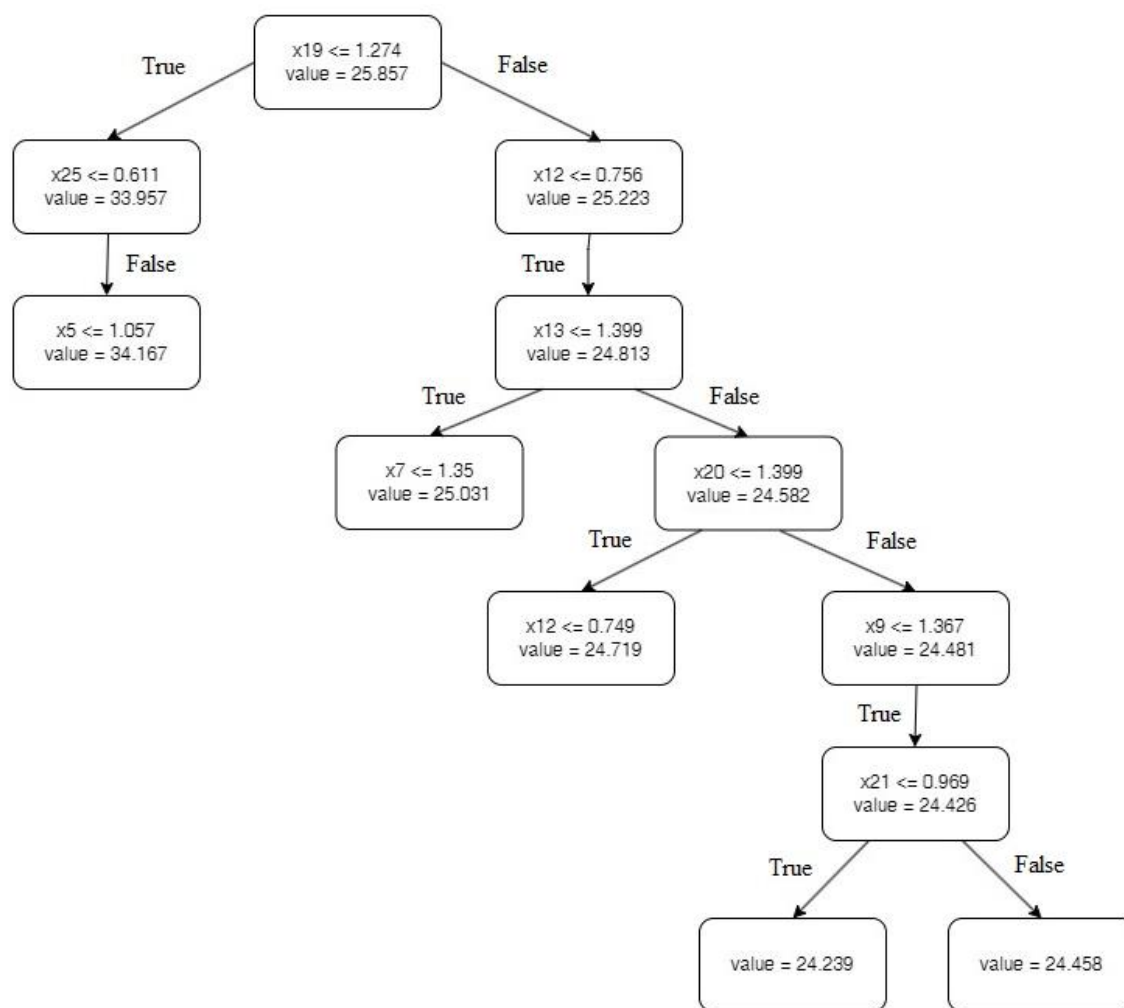


Рис. 5. Фрагмент дерева регрессии, ведущий к минимальному значению $cond(A')$

Список источников

1. Кузнецов С.И. Количественный УФ спектрометрический анализ смесей замещенных фуллеренов C_{60} / С.И. Кузнецов, Д.С. Юнусова, Р.Х. Юмагулова [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии, 2015. – Т. 82 – № 4. – С. 608 - 615.
2. Спивак С.И. Предельно допустимые оценки расчета параметров физико-химических моделей / С.И. Спивак, О.Г. Кантор, Д.С. Юнусова // Башкирский химический журнал, 2015. – Т. 22. – № 3. – С. 12-17.
3. Гончаров В.А. Методы оптимизации: учебное пособие // В.А. Гончаров. – М.: Изд-во Московского государственного института электронной техники, 2008. – 188 с.
4. Ахмадиев Ф.Г. Математическое моделирование и методы оптимизации: учебное пособие / Ф.Г. Ахмадиев, Р.М. Гильфанов. – Казань: Изд-во Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2017. – 178 с.
5. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций. / Б.Ю. Лемешко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 126 с.
6. Скиена С. Алгоритмы. Руководство по разработке: пер. с англ. / Стивен Скиена. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 720 с.
7. Матренин П.В. Методы стохастической оптимизации: учебное пособие / П.В. Матренин, М.Г. Гриф, В.Г. Секаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2016. – 67 с.
8. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
9. Миронов А.М. Машинное обучение. / А.М. Миронов. – М.: ООО «МАКС Пресс», 2018. – Часть 1. – 90 с.
10. Гусева А.И. Исследование алгоритмов многомерной классификации научных данных / А.И. Гусева, В.С. Киреев, И.А. Кузнецов, П.В. Бочкарев // Фундаментальные исследования, 2015. – № 11 (часть 5). – С. 868-874.

11. Минигалиева Г.И. Дифференциация пород терригенной толщи нижнего карбона по петрофизическим параметрам платформенной части республики Башкортостан / Г.И. Минигалиева, О.Р. Привалова, Т.В. Бурикова [и др.] // Материалы международной научно-практической конференции «ГеоСочи – 2019. Нефтегазовая геология и геофизика», 2019. – С. 149-152.
12. Кантор О.Г. Оценка погрешности экспериментальных данных в задачах параметрической идентификации линейных моделей / О.Г. Кантор, С.И. Спивак, Б.Л. Хашпер // Материалы XXII Международной научной конференции «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications». – Москва: Российский университет дружбы народов, 2019. – С. 389-397.
13. Byrd R.H., Schnabel R.B., Schultz G.A. A trust region algorithm for nonlinearly constrained optimization. SIAM J. Numer. Anal., 1987, vol. 24, pp. 1152-1170.

Хашпер Белла Леонидовна. Аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

AuthorID: 848754, SPIN: 2031-2622, bellakhashper@gmail.com, г. Уфа, ул. Космонавтов 8.

Кантор Ольга Геннадиевна. Доцент, профессор. д-р физ.-мат. наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет. AuthorID: 588782, SPIN: 5677-7494, ORCID: 0000-0002-3186-3285, o_kantor@mail.ru, г. Уфа, ул. Космонавтов 8

UDC 519.85

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.002

Application of random search methods and machine learning methods to optimization problems in multidimensional space

Bella L. Khashper, Olga G. Kantor

Ufa State Petroleum Technical University,

Russia, Ufa, bellakhashper@gmail.com

Abstract. The article discusses the application of random search method for finding the extremal value of a function that depends on multiple parameters. The advantages and disadvantages of the method are described, as well as the possibility of improving it using machine learning methods. Using the example of quantitative analysis of multicomponent mixtures, it is shown how random search method can be combined with machine learning methods to solve the problem of parametric identification.

Keywords: Multidimensional optimization, random search method, statistical methods, machine learning, classification task, regression task, decision tree, Trust-region method, condition number

References

1. Kuznetsov S.I., Yunusova D.S., Yumagulova R.Kh. [et al.] Kolichestvennyy UF spektrometricheskiy analiz smesey zameshchennykh fullerenov S60 [Quantitative UV spectrometric analysis of mixtures of substituted fullerenes C60]. Zhurnal prikladnoy spektroskopii [Journal of applied spectroscopy], 2015, vol. 82, no. 4, pp. 608-615.
2. Spivak S.I., Kantor O.G., Yunusova D.S. Predel'no dopustimyye otsenki parametrov fiziko-khimicheskikh modeley [Maximum permissible assessment parameters of physico-chemical models]. Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal [Bashkir chemical journal], 2015, vol. 22, no. 3, pp. 12-17.
3. Goncharov V.A. Metody optimizatsii: uchebnoe posobie [Optimization methods: textbook]. Moscow, Izd-vo Moskovskogo sluzhashchego elektronnoy instituta tekhniki [Moscow state institute of electronic technology publ.], 2008, 188 p.
4. Akhmadiev F.G., Gilfanov R.M. Matematicheskoe modelirovanie i metody optimizatsii: uchebnoe posobie [Mathematical modeling and optimization methods: textbook]. Kazan, Izd-vo Kazanskogo okhrany avariynostroyitel'nogo universiteta [Kazan state university of architecture and engineering publ.], 2017, 178 p.
5. Lemeshko B.Yu. Metody optimizatsii: Konspekt lektsii [Optimization methods: Lecture notes]. Novosibirsk Izd-vo NGTU [NSTU publishing house], 2009, 126 p.
6. Skiena S. Algoritmy. Rukovodstvo po razrabotke [The Algorithm. Design Manual]. St. Petersburg, BKHV-Peterburg [BHV-Petersburg Publ.], 2013, 720 p.

7. Matrenin P.V., Grif M.G., Sekaev V.G. Metody stokhasticheskoi optimizatsii: uchebnoe posobie [Stochastic optimization methods: textbook]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU [NSTU Publ.], 2016, 67 p.
8. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 320 p.
9. Mironov A.M. Mashinnoe obuchenie [Machine learning]. Moscow, MAX Press Publ., 2018, Part 1, 90 p.
10. Guseva A.I., Kireev V.S., Kuznetsov I.A., Bochkarev P.V. Issledovanie algoritmov mnogomernoi klassifikatsii nauchnykh dannykh [Research of algorithms for multidimensional classification of scientific data]. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental Research], 2015, no. 11 (part 5), pp. 868-874.
11. Minigalieva G.I., Privalova O.R., Burikova T.V. [et al.] Differentsiatsiya porod terrigennoi tolshchi nizhnego karbona po petrofizicheskim parametram platformennoi chasti respubliky Bashkortostan [Differentiation of rocks of the lower carboniferous terrigenous formation by petrophysical parameters of the platform part of the Republic of Bashkortostan]. In: Proceedings of the international scientific and practical conference "GeoSochi - 2019. Petroleum geology and geophysics", 2019, pp. 149-152.
12. Kantor O.G., Spivak S.I., Khasper B.L. Otsenka pogreshnosti eksperimentalnykh dannykh v zadachakh parametricheskoi identifikatsii lineinykh modelei [Estimation of experimental data error in problems of parametric identification of linear models]. XII International Conference on Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2019) [In: Proceedings of the XXII International scientific conference "Distributed computer and communication networks: control, computation, communications". Moscow, Peoples' friendship university of Russia publ.], 2019, pp. 389-397.
13. Byrd R.H., Schnabel R.B., Schultz G.A. A trust region algorithm for nonlinearly constrained optimization. SIAM Journal on numerical analysis, 1987, vol. 24, pp. 1152-1170.

Khashper Bella Leonidovna. Postgraduate student, Ufa state petroleum technical university. AuthorID: 848754, SPIN: 2031-2622, bellakhashper@gmail.com.

Kantor Olga Gennadievna. Associate Professor, Doctor of physical and mathematical sciences, Ufa state petroleum technical university, professor. AuthorID: 588782, SPIN: 5677-7494, ORCID: 0000-0002-3186-3285, o_kantor@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.06.2023; одобрена после рецензирования 08.09.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 06/19/2023; approved after reviewing 09/08/2023; accepted for publication 09/18/2023.

УДК 004.891.2: 519.23

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.003

Методика определения параметров выбора приоритетов при организации первичной медицинской помощи в сельской местности

Ерженин Роман Валерьевич¹, Хребтова Таисия Петровна²

¹ Иркутский государственный университет,

Россия, Иркутск, rerzhenin@gmail.com

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема приоритетного выбора сельских населенных пунктов, где необходимо улучшить условия оказания медицинской помощи. Для концептуального понимания проблемы выбора оптимального решения сформирован краткий тезаурус и разработана онтология предметной области. В качестве основного алгоритма выбора предлагается использовать алгоритм решения многокритериальной задачи на основе теории антагонистических игр, с учетом неполной информации о предпочтениях лица, принимающего решения. Авторами статьи предложена многопараметрическая модель принятия решений, включающая три основные группы критериев: доступность медпомощи, параметры здания и параметры медперсонала. Для подготовки данных с параметрами населенных пунктов используются методы кластеризации ближайшего соседа и центроидного отношения. Результатами обработки матрицы данных Оёкского куста Иркутской области стали табличные данные и графическое отображение кластеров и их центров на оси географических координат. Модифицированный алгоритм обработки двух матриц позволил рассчитать оптимальные расстояния внутри кластеров. Решение задачи многокритериального выбора на примере одного куста субъекта РФ по выбранным предпочтениям лица, принимающего решения, позволило обоснованно сформировать аргументы для принятия решения. Разработанная модель данных и алгоритмы определения параметров выбора могут использоваться в качестве основы для формирования технического задания для разработки полнофункциональной экспертно-ориентированной системы, способной поднять качество принятия решений на более высокий уровень.

Ключевые слова: фап; лпр; принятия решений; многокритериальный выбор; кластерный анализ; здравоохранение; экспертно-ориентированная система

Цитирование: Ерженин Р.В. Методика определения параметров выбора приоритетов при организации первичной медицинской помощи в сельской местности / Р.В. Ерженин, Т.П. Хребтова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 27-40. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.003

Введение. В целях улучшения состояния сельского здравоохранения в рамках Национального проекта «Здравоохранение» (федеральный проект «Модернизация первичного звена здравоохранения РФ») в ближайшие годы планируется построить, реконструировать и отремонтировать более 11 тыс. медицинских пунктов. Таким образом ежегодно в сельской местности должно вводиться в эксплуатацию в среднем 1-2 тыс. медицинских пункта (фельдшерско-акушерских пунктов (ФАП), амбулаторий и т.п.) [1]. В тоже самое время эксперты подсчитали, что увеличение числа медицинских пунктов в селе одновременно сопровождается ростом количества пунктов, переходящих в аварийное состояние и требующих сноса [2]. Схожая картина складывается и с капитальным ремонтом.

Таким образом, при решении вопросов первоочередного финансирования мероприятий, связанных с организации медицинской помощи в сельской местности, наиболее трудным является выбор тех населенных пунктов, где здания медпунктов имеют наихудшее состояние, а население территориально удалено от доступа к медицинской помощи. Такие решения принимаются в условиях, когда также необходимо учитывать еще и показатели укомплектованности медицинским персоналом, наличия необходимого медоборудования и коммунальной инфраструктуры.

Во всех перечисленных задачах ЛПП может столкнуться с трудностями оценки приоритетов, где основные сложности связаны со значительным количеством показателей, которые необходимо учитывать при оценке условий оказания первичной медико-санитарной помощи (ПМСП) в каждом населенном пункте. При этом следует отметить, что каждый показатель и каждая характеристика одного и того же объекта могут рассматриваться разными ЛПП с различной степенью важности и относительной предпочтительности. В подобной ситуации многокритериального выбора возникает необходимость в разработке понятного логического механизма и инструмента определения рационального варианта, способного обеспечивать принятие обоснованных решений, в короткие сроки и ориентированные на удовлетворение потребности в оказании ПМСП наиболее широкому кругу населения [3].

1. Концептуальное описание предметной области. Для описания функциональных структур и представления компонентов технических систем в контексте задач функционального проектирования наиболее часто используются специализированные объектно-ориентированные тезаурусы [4]. Основные термины тезауруса, используемого в данном исследовании, указаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные термины предметной области

<i>Термин</i>	<i>Описание</i>
Медицинский пункт	Учреждение, предназначенное для оказания медицинской помощи немногочисленным жителям населенных пунктов, удалённых от больницы или поликлиники
Населенный пункт	Застроенная жилыми домами территория, где постоянно живут люди. Населённые пункты различаются между собой размерами, а также количеством жителей и образом их жизни. Самые распространённые населённые пункты — город, село и деревня. В современном мире появились ещё посёлки городского типа и городские округа, которые объединяют сразу несколько населённых пунктов.
Первичная медикосанитарная помощь (ПМСП)	Общемедицинская помощь, направленная на лечение наиболее распространенных болезней, травм, отравлений и других неотложных состояний преимущественно по месту жительства граждан, а также проведение санитарных, противоэпидемических, профилактических мероприятий, гигиенического обучения, мер по охране семьи, материнства, отцовства и детства.
Скорая медицинская помощь (СМП)	Вид медицинской помощи, оказываемой гражданам при заболеваниях, несчастных случаях, травмах, отравлениях и других состояниях, требующих срочного медицинского вмешательства.
Фельдшерско-акушерский пункт (ФАП)	Амбулаторное лечебно-профилактическое учреждение, в котором оказывают медицинскую помощь населению сельской местности. Находится в ведении амбулатории или участковой больницы. ФАПом заведует фельдшер, который проводит лечебные и профилактические мероприятия: ведет прием, оказывает доврачебную помощь, занимается профилактикой заболеваемости; проводит санитарный надзор в детских образовательных учреждениях, на предприятиях общепита, торговли, водоснабжения; производит анализ заболеваемости населения, состояния окружающей среды. Фельдшерско-акушерский пункт является структурным подразделением медицинской организации.
Передвижной медицинский пункт	Мобильный ФАП - предназначен для проведения доврачебной первичной медико-санитарной помощи в сельской местности. Медицинский пункт состоит из одного или более специализированных вагон-домов.

При разработке современных интеллектуальных систем и основной базы данных, ее каркасом, как правило, являются прикладные онтологии, обеспечивающие эффективное функционирование систем [5]. Их построение – наиболее ответственный и сложный этап в разработке ИС [6].

Концептуальная модель сущностей и отношений предметной области принятия решений отображена на рисунке 1. В модели выделены четыре ключевые сущности (населенный пункт, медпомощь, здание и медик), обозначены отношения между ними и выделены основные характеристики.

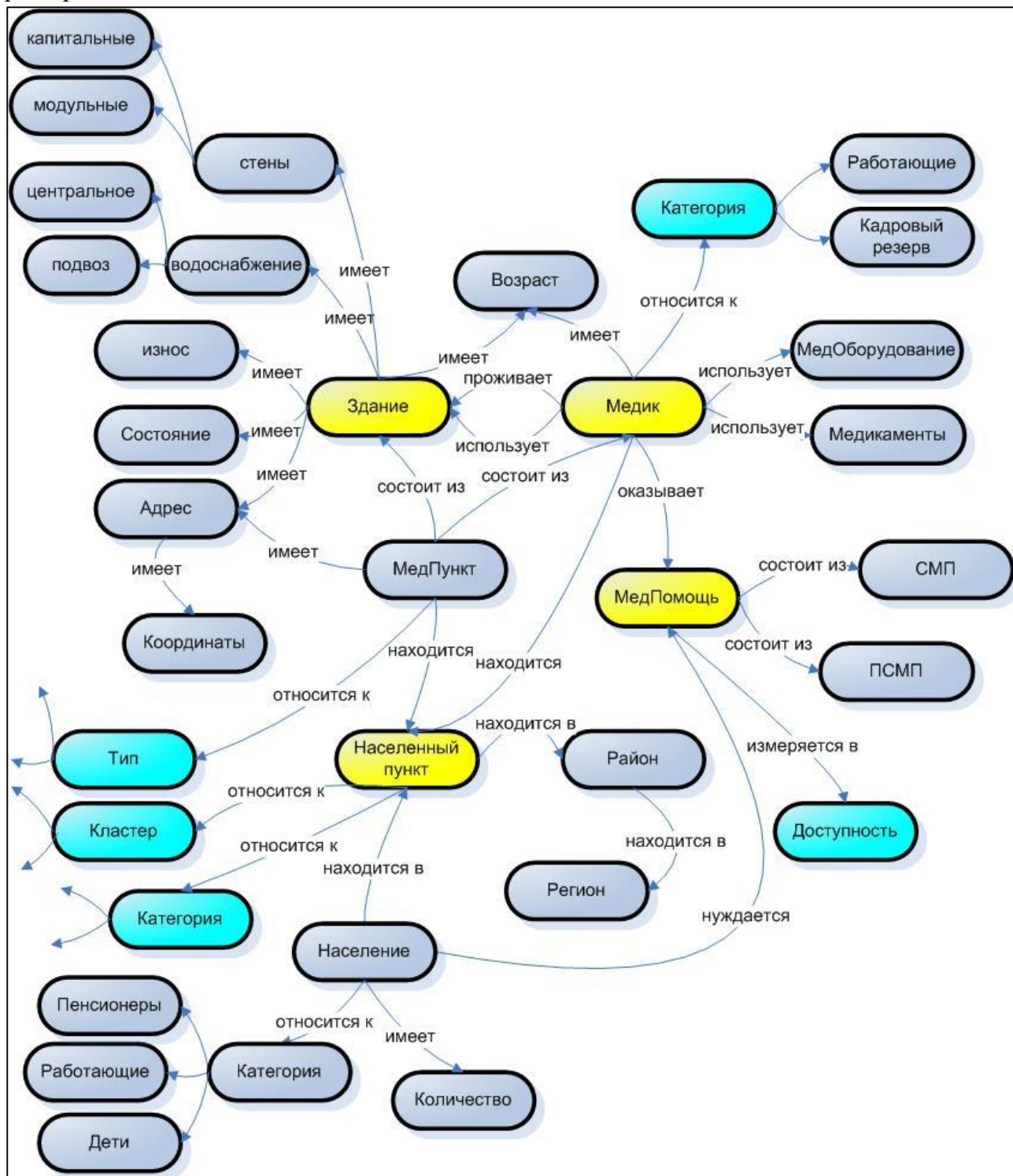


Рис. 1. Онтология предметной области

2. Методика решения многокритериальной задачи на основе гарантированного результата. Выбор эффективных решений в ситуациях, когда наблюдается конфликт интересов участников, характеризуются антагонистическими отношениями [7, 8]. С позиции выбора населенного пункта, где необходимо организовать оказание первичной медицинской помощи, интересы групп населения этих территорий являются антагонистическими: «выигрыш одного участника конфликта всегда равен проигрышу другого».

Таким образом, следуя теории антагонистических игр [9], у нас дано:

Множество альтернатив, состоящее из антагонистических объектов – групп населения населенных пунктов: $x_i \in X, i = \overline{1, n}$;

Множество критериев, которыми руководствуется ЛПР для сравнения объектов: $q_i \in Q, j = \overline{1, m}$;

Значения критериев: q_{ij} ;

Предпочтения ЛПР на множестве частных критериев: $q_k > q_l, k, l \in \overline{(1, m)}$;

Предпочтения ЛПР на множестве альтернатив $x_p > x_l, p, q \in \overline{(1, n)}$

Таким образом, мы имеем матрицу значений $Q = [q_{ij}]$, где q_{ij} – оценка i-го объекта по j-му критерию $q_{ij} = q_j(x_i)$.

Для получения обобщённого критерия оптимального принятия решения будем использовать аддитивный метод:

$$F(\vec{Q}(x_i), \vec{\omega}) = \sum_{j=1}^n \omega_j q_j(x_i) = \sum_{j=1}^n \omega_j q_{ij};$$

где ω_j - значение весовых коэффициентов.

В качестве нормирующих делителей принимаются максимальные значения критериев оптимальности, достигаемые в области допустимых решений:

$$\min_i F(Q(x_i), \omega) \rightarrow \max$$

Предложенная модель решения многокритериальной задачи на основе гарантированного результата использует принципы решения задачи линейного программирования с некоторыми ограничениями на области допустимых значений весовых коэффициентов важности.

3. Решение задачи многокритериального выбора с учетом неполной информации о предпочтениях ЛПР. Для решения многокритериальной задачи выбора приоритетного населенного пункта будем использовать модель, предложенную в работе [10], которая одновременно учитывает дополнительную качественную информацию как на множестве частных критериев, так и на множестве альтернатив. Такой подход позволяет различным ЛПР комбинированно использовать дополнительную информацию о критериях и альтернативах, в том числе с учетом весовых коэффициентов, и принимать решения, с одной стороны, исходя из своих предпочтений, а с другой – в рамках установленных моделью границ.

Сформулируем задачу многокритериального выбора (МКВ). Медицинские пункты обозначим, как $x_1, \dots, x_n$. Множество критериев, которыми руководствуется ЛПР, представим в виде:

q_1 – параметры доступности медицинской помощи;

q_2 – параметры здания;

q_3 – параметры медперсонала.

Весовые коэффициенты критериев зададим, как $\omega_1, \dots, \omega_n$.

Задача МКВ:

	x_1	x_2	x_3
q_1	$\omega_1 q_{11}$	$\omega_1 q_{12}$	$\omega_1 q_{13}$
q_2	$\omega_2 q_{21}$	$\omega_2 q_{22}$	$\omega_2 q_{23}$
q_3	$\omega_3 q_{31}$	$\omega_3 q_{32}$	$\omega_3 q_{33}$

Выбранные критерии характеризуют степень достижения поставленной цели и общую ценность принятия решений, однако выбранные критерии являются достаточно емкими для измерения и сложными для анализа. Поэтому каждый из них разобьем на подкритерии, таким образом, получим три подзадачи МКВ. Смысл каждой из них, с учетом предпочтений ЛПР, заключается в определении оптимального варианта (либо множества оптимальных вариантов).

Определим параметры доступности медицинской помощи (см. табл. 2), параметры здания (см. табл. 3) и характеристики персонала (табл. 4.)

Таблица 2. Параметры доступности медицинской помощи

		q_i	x_1	x_2	x_3
Доступность первичной помощи	Транспортная доступность	AP_1			
	Расстояние до пункта ПМСП	AP_2			
	Время на дорогу	AP_3			
	Автобусное сообщение	AP_4			
	Транспортные расходы пациента	AP_5			
Доступность скорой помощи	Транспортная доступность	AE_1			
	Расстояние до пункта СМП	AE_2			
	Среднее время ожидания	AE_3			
Доступность к передвижным медицинским комплексам		AK			
Интернет-доступ к телемедицине		AI			

Таблица 3. Параметры здания

	Критерий	q_i	x_1	x_2	x_3
Параметры сооружения	Состояние	BB_1			
	Год постройки здания	BB_2			
	Износ здания	BB_3			
Обеспечивающая инфраструктура	Холодное водоснабжение	BI_1			
	Горячее водоснабжение	BI_2			
	Канализация	BI_3			
	Отопление	BI_4			
Инфраструктура связи	Мобильная связь	BC_1			
	Высокоскоростной Интернет-канала	BC_2			
Коэффициент удорожания строительства (капремонта)		BK			

Таблица 4. Характеристики медперсонала

	Критерий	q_i	x_1	x_2	x_3
Характеристики медицинских кадров	Укомплектованность	PS_1			
	Максимальный возраст	PS_2			
	Средний возраст	PS_3			
Жилье	Холодное водоснабжение	PH_1			
	Горячее водоснабжение	PH_2			
	Канализация	PH_3			
	Отопление	PH_4			
	Мобильная связь	PH_5			
	Высокоскоростной Интернет-канала	PH_6			

Весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты решения задачи МКВ связаны с демографическими показателями населенного пункта, поэтому будем считать, что эти показатели и определяют весовые коэффициенты. Численность населения также влияет и на объем необходимой медицинской помощи. Установим строгую логическую связь между количеством жителей и необходимым объемом оказания им медицинской помощи посредством весовых коэффициентов, при этом значение самого весового коэффициента задается ЛПР.

Весовые коэффициенты рассчитываются по формуле:

$$\omega_j = p_i k_j,$$

где p_i – показатель численности населения x_i -го населенного пункта,

k_j – коэффициент важности, устанавливаемый для каждой из групп критериев.

4. Алгоритм выбора данных для определения расстояния до пункта ПМСП. Расстояние до пункта ПМСП является одним из ключевых параметров, т.к. это в первую очередь влияет на время, в пределах которого пациент получит первичную помощь. При этом не следует забывать и о финансовых затратах, который несет пациент, преодолевая это расстояние для получения медицинской помощи.

Рассмотрим качестве примера данные по Оёкскому кусту – группе населенных пунктов, определенных в Аналитической записке к схемам размещения объектов здравоохранения¹ (см. таблицу 5).

Как видно из таблицы, некоторые населенные пункты имеют здания, но не укомплектованы кадрами, а некоторые населенные пункты не имеют и зданий. Подготовим данные для дальнейшего анализа.

Таблица 5. Данные по населенным пунктам Оёкского куста

Населенный пункт, x	Население (p), ед.	AP1, 1/0	AP2, км	AP3, мин	AE1, 1/0	BB2, год	PS1, %
д. Бургаз	309	1	0	0	1	1980	100
д. Бутырки	673	1	10	12	1	2008	0
д. Галки	682	1	10	12	1	1980	0
д. Егоровщина	401	1	0	0	1	1921	100
д. Жердовка	321	1	0	0	1	1980	100
д. Зыкова	178	1	11	13	1	2021	0
д. Каштак	62	1	2	5	1	-	-
д. Коты	624	1	13	15	1	1985	0
д. Кыцигировка	506	1	8	13	1	1975	0
д. Максимовщина	290	1	23	28	1	-	-
д. Мишонкова	102	1	15	18	1	-	-
д. Ревякина	769	1	0	0	1	2012	100
д. Рязановщина	210	1	11	20	1	1994	0
д. Сосновый Бор	1689	1	4	6	1	-	-
д. Турская	309	1	0	0	1	2019	100
д. Черемушка	553	1	37	42	1	2012	0
с. Никольск	1142	1	0	0	1	1989	94
с. Оек	4094	1	0	0	1	1990	72

На первом этапе определим расстояния по дорогам между населенными пунктами по принципу – «каждый с каждым» (таблица 6).

¹ Приложение № 5 к региональной программе модернизации первичного звена здравоохранения Иркутской области на 2021 -2025 годы

Таблица 6. Расстояния между населенными пунктами Оекского куста

Населенный пункт, х	д. Бургаз	д. Бутырки	д. Галки	д. Егоровщина	д. Жердовка	д. Зыкова	д. Каштак	д. Коты	д. Кыцигировка	д. Максимовщина	д. Мишонкова	д. Ревякина	д. Рязановщина	д. Сосновый Бор	д. Турская	д. Черемушка	с. Никольск	с. Оек
д. Бургаз	0	17	27	32	31	26	9	20	45	20	32	7	42	31	26	15	42	22
д. Бутырки	17	0	10	14	14	10	8	4	28	9	14	10	24	14	9	18	26	5
д. Галки	27	10	0	5	11	7	17	10	24	18	5	20	15	11	10	27	16	4
д. Егоровщина	32	14	5	0	16	12	23	15	20	23	10	25	11	16	15	32	11	9
д. Жердовка	31	14	11	16	0	13	22	15	14	23	16	24	26	4	16	32	26	10
д. Зыкова	26	10	7	12	13	0	17	10	28	18	12	21	22	14	11	27	23	4
д. Каштак	9	8	17	23	22	17	0	11	36	11	22	3	33	22	16	10	33	13
д. Коты	20	4	10	15	15	10	11	0	29	12	15	14	25	15	9	20	26	6
д. Кыцигировка	45	28	24	20	14	28	36	29	0	37	29	38	30	17	30	45	8	24
д. Максимовщина	20	9	18	23	23	18	11	12	37	0	23	13	34	23	17	20	33	14
д. Мишонкова	32	14	5	10	16	12	22	15	29	23	0	25	20	16	17	32	20	9
д. Ревякина	7	10	20	25	24	21	3	14	38	13	25	0	35	25	19	8	36	16
д. Рязановщина	42	24	15	11	26	22	33	25	30	34	20	35	0	26	26	43	22	19
д. Сосновый Бор	31	14	11	16	4	14	22	15	17	23	16	25	26	0	16	32	27	10
д. Турская	26	9	10	15	16	11	16	9	30	17	17	19	26	16	0	26	26	11
д. Черемушка	15	18	27	32	32	27	10	20	45	20	32	8	43	32	26	0	43	23
с. Никольск	42	26	16	11	26	23	33	26	8	33	20	36	22	27	26	43	0	20
с. Оек	22	5	4	9	10	4	13	6	24	14	9	16	19	10	11	23	20	0

Для практического решения задачи кластеризации будем использовать Google Colaboratory – бесплатную интерактивную облачную среду для работы с кодом.

5. Данные для принятия решений при нулевой укомплектованности. Сформируем данные для принятия решений без учета информации об укомплектованности кадрами, т.е. примем, что во всех медицинских пунктах нет медицинского персонала и нам необходимо определить, где наиболее приоритетно нужно организовать такой пункт и обеспечить его кадрами.

Сформируем кластеры на основе матрицы расстояний. Так как нам неизвестно число кластеров, воспользуемся агломеративной иерархической кластеризацией², так как число данных небольшое и этот метод подходит для работы с симметричными матрицами расстояний. Визуализация результата решения задачи кластеризации по методу ближайшего соседа [11], когда кластеры формируются на основе наименьшего расстояния между точками внутри кластеров, представлена на рисунке 2, т.е.:

$$d(u, v) = \min(\text{dist}(u[i], v[j])),$$

для всех точек i в кластере u и всех точек j в кластере v .

Дендрограмма позволяет отобразить взаимные связи между объектами из заданного множества [12].

Визуализации результата решения задачи кластеризации по методу Центроидное расстояние (центры кластеров) UPGMC-algorithm³ [13] представлена на рисунке 3.

² Агломеративная иерархическая кластеризация – это тип неконтролируемого алгоритма машинного обучения, используемого для кластеризации немаркированных точек данных, где точки группируются с использованием восходящего подхода, начиная с отдельных точек, заканчивая их полным объединением

³ UPGMC – unweighted pairgroup method using arithmetic averages

Из рисунков 2-3 предварительно можно выделить 4 кластера, однако, необходимо оценить, насколько точно определено число кластеров, для этого воспользуемся Silhouette Score⁴. Из графика на рис. 4 видно, что 4 кластера являются наилучшим решением.



Рис. 2. Метод ближайшего соседа

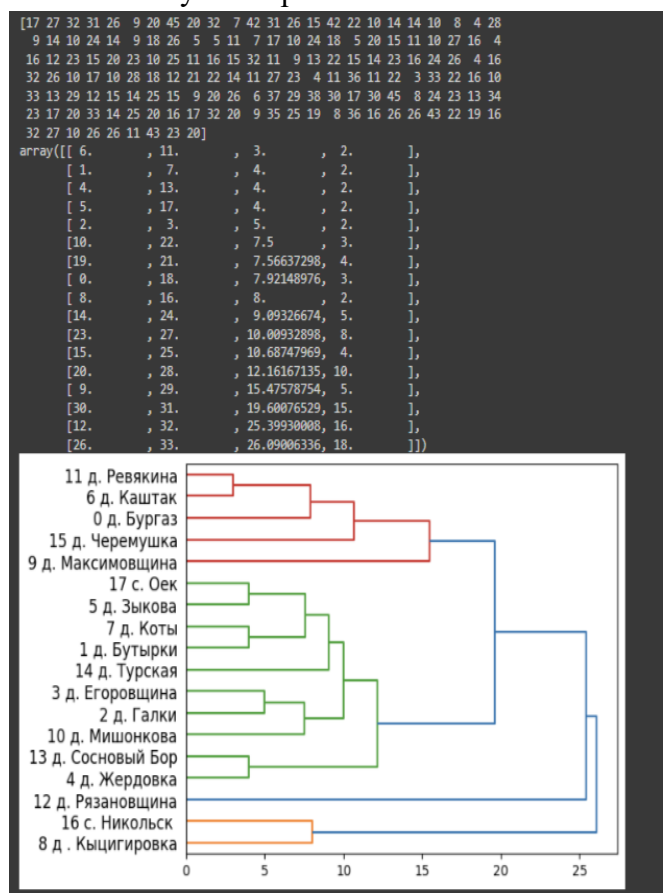


Рис. 3. Метод UPGMC-algorithm

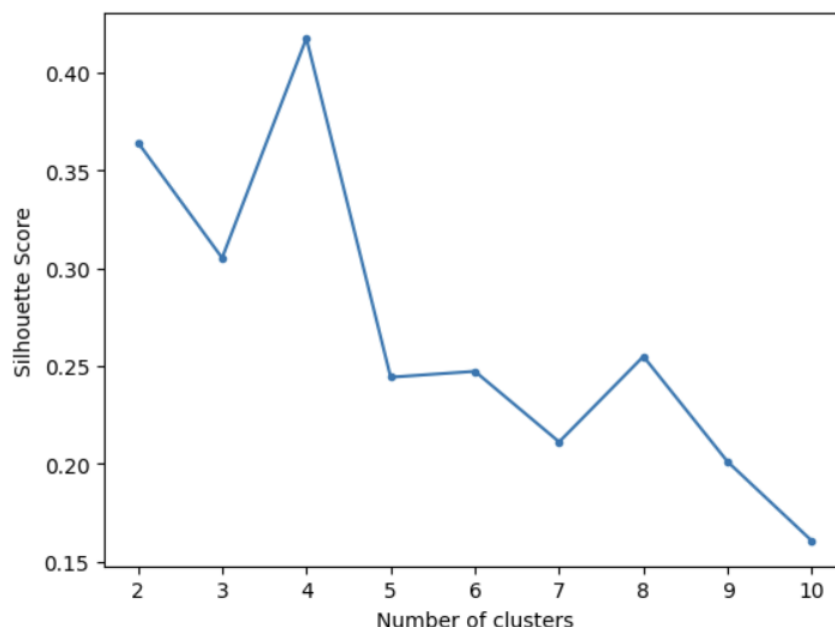


Рис. 4. Silhouette score metric

⁴ Silhouette Score – это инструмент для оценки соответствия результатов кластеризации, предоставляющий количественный показатель того, насколько четко определены и отчетливы кластеры

Отображение результата решения задачи кластеризации по методу UPGMC-algorithm в пространстве координат представлено на рисунке 5. Кластеры сформированы по методу центроидного расстояния (по среднему для широты и долготы), зеленым выделены населенные пункты, наиболее благоприятные для размещения медицинского пункта, т.к. вокруг этой точки сосредоточено наибольшее количество населения. Следуя этим данным, процедура выбора объектов упростилась, т.к. количество объектов снизилось с 18 до 4-х населенных пунктов – центров кластеров (см. таблицу 7).

Таким образом, мы кластеризовали данные для принятия решений, связанные с определением минимальных расстояний до оптимальных точек расположения пунктов ПМСП на выбранном участке местности (Оёкский куст).

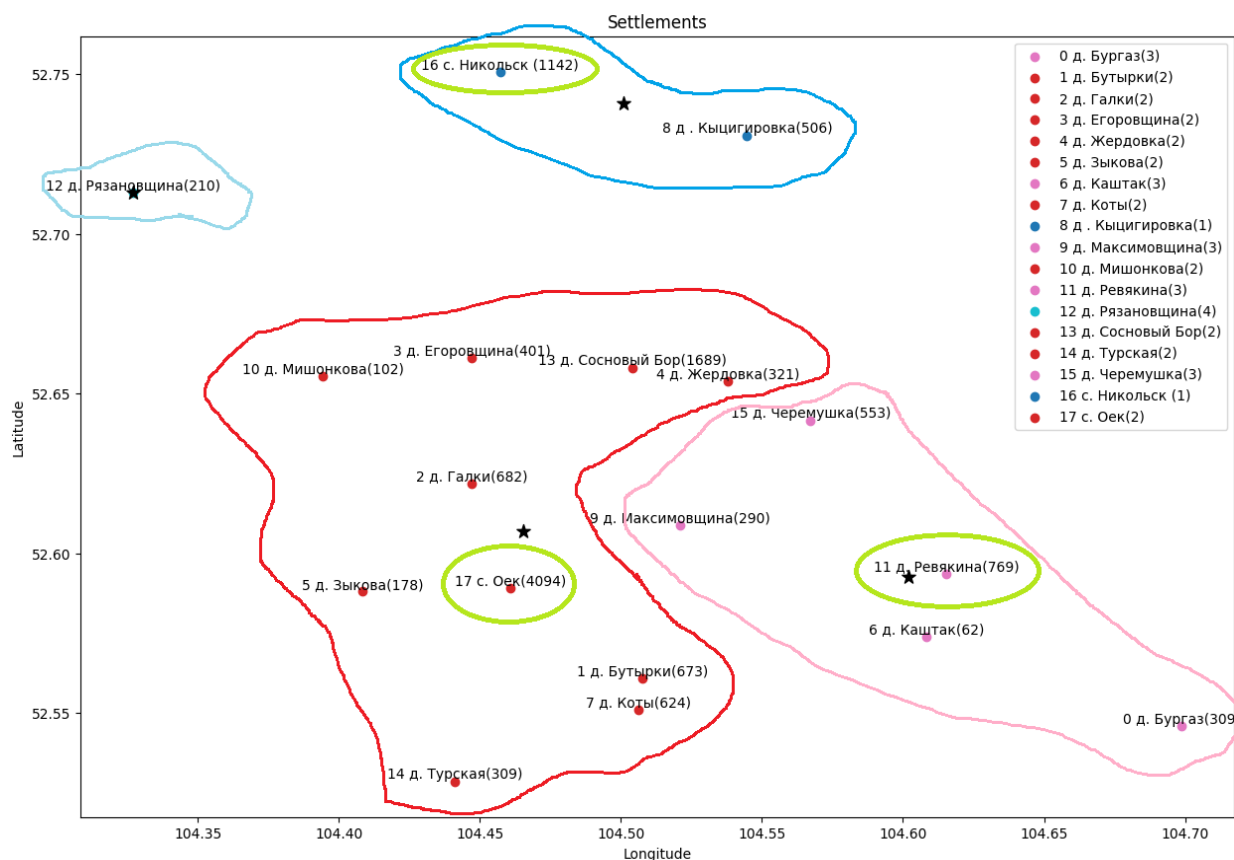


Рис. 5. Кластеры Оекского куста

Таблица 7. Центры кластеров и их параметры при нулевой укомплектованности

Кластер, х	Центр кластера - населенный пункт	Население кластера (р), ед.	ВВ2, год постройки здания	PS1, укомплект., %
1	с. Никольск	1 648	1989	94
2	с. Оек	9 073	1990	72
3	д. Ревякина	1 983	2012	100
4	д. Рязановщина	210	1994	0

6. Данные для принятия решений с учетом информации об укомплектованности. Полученные в предыдущем разделе результаты кластеризации были построены на матрице данных, в которую мы не включали информацию об наличии пунктов ПМСП. Из данных таблицы 5 видно, что только 7 из 18 населенных пунктов имеют укомплектованные медицинским персоналом медицинские пункты. Примем это за основание, и сформируем вторую матрицу населенных пунктов, где медицинские пункты укомплектованы медицинским персоналом.

Блок-схема кластеризации по двум матрицам по алгоритмам, предложенным в предыдущем разделе, отображена на рисунке 6. Результаты кластеризации по двум матрицам отображены на рисунке 7 и 8.

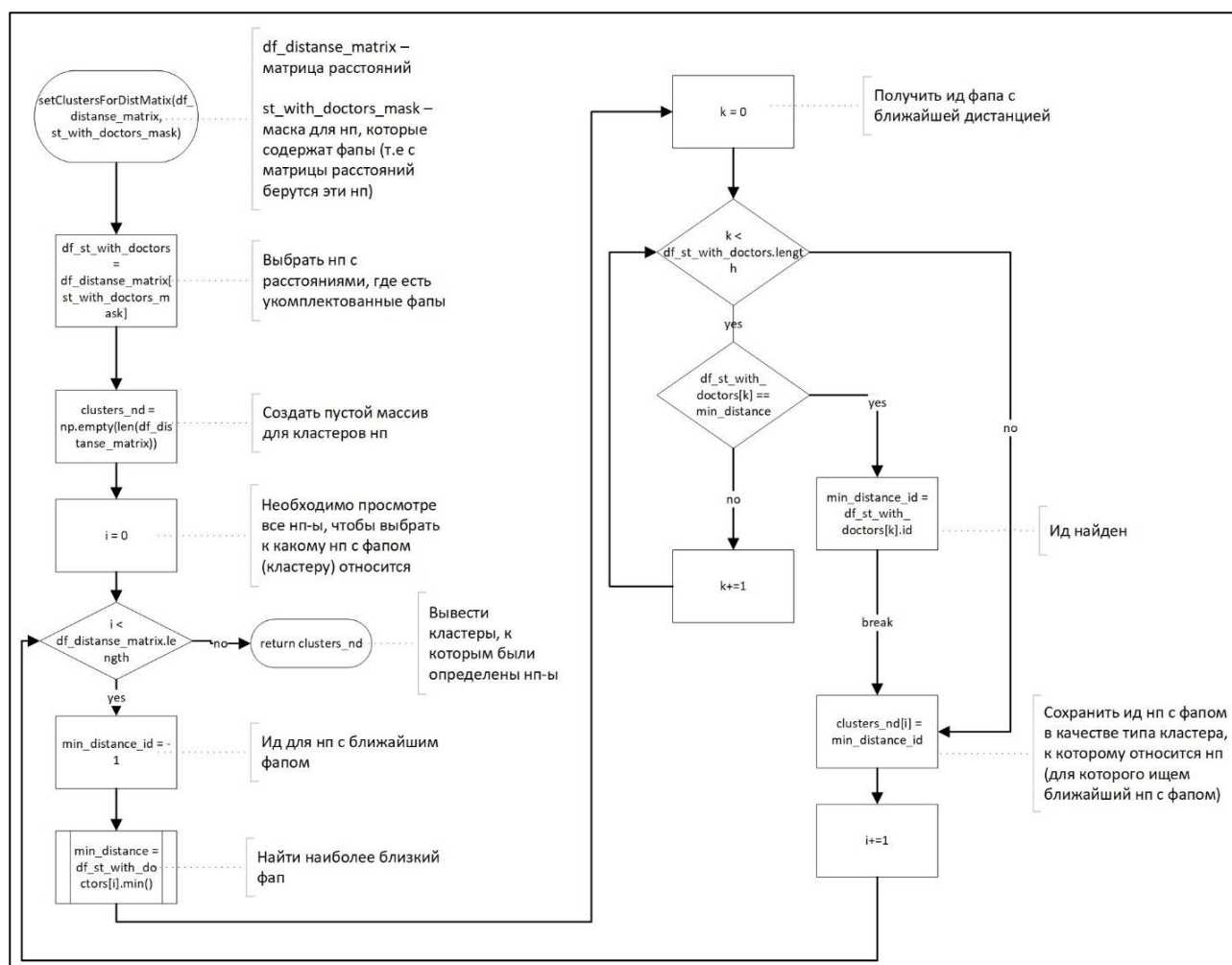


Рис. 6. Блок схема кластеризации по двум матрицам

```

0 д. Бургаз to_id 0 min_distance 0
1 д. Бутырки to_id 17 min_distance 5
2 д. Галки to_id 17 min_distance 4
3 д. Егоровщина to_id 3 min_distance 0
4 д. Жердовка to_id 4 min_distance 0
5 д. Зыкова to_id 17 min_distance 4
6 д. Каштак to_id 11 min_distance 3
7 д. Коты to_id 17 min_distance 6
8 д. Кыцигировка to_id 16 min_distance 8
9 д. Максимовщина to_id 11 min_distance 13
10 д. Мишонкова to_id 17 min_distance 9
11 д. Ревякина to_id 11 min_distance 0
12 д. Рязановщина to_id 3 min_distance 11
13 д. Сосновый Бор to_id 4 min_distance 4
14 д. Турская to_id 14 min_distance 0
15 д. Черемушка to_id 11 min_distance 8
16 с. Никольск to_id 16 min_distance 0
17 с. Оек to_id 17 min_distance 0
array([ 0., 17., 17.,  3.,  4., 17., 11., 17., 16., 11., 17., 11.,  3.,
        4., 14., 11., 16., 17.])
  
```

Рис. 7. Данные кластеров

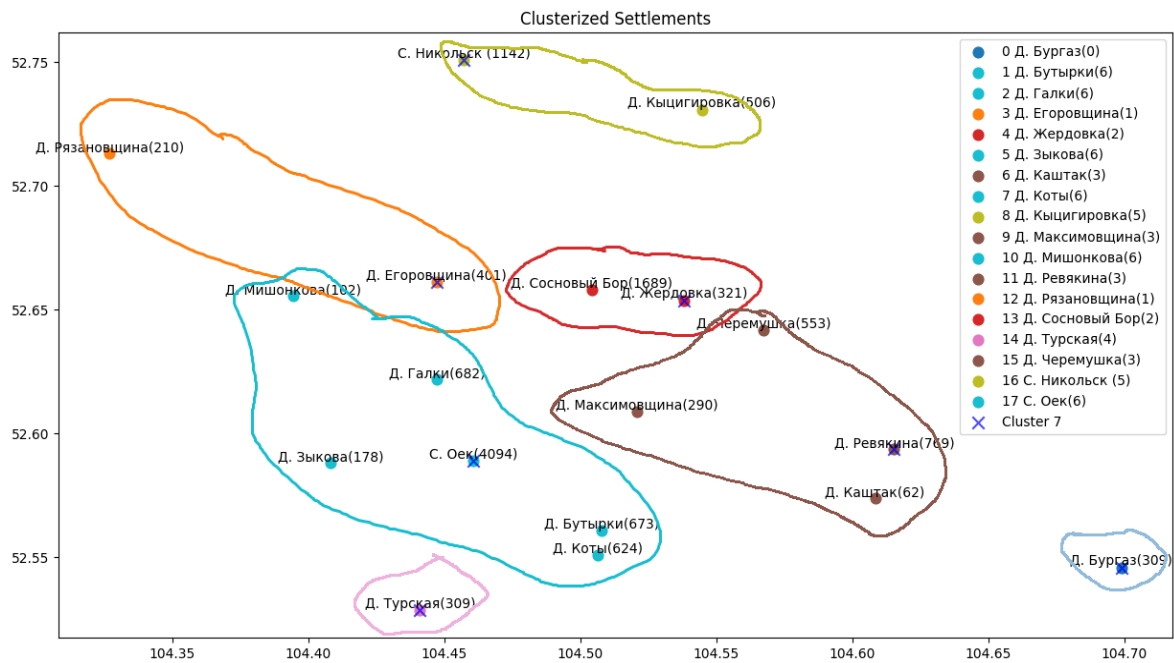


Рис. 8. Населенные пункты и кластеры на осях графических координат

Полученные результаты кластеризации по двум матрицам можно использовать в качестве параметров расстояний до ближайших медицинских пунктов ПСМП.

7. Результаты решения задачи МКВ. Для решения задачи МКВ будем использовать следующие предпочтения ЛПР:

- выбор населенных пунктов осуществим на основе критерия отсутствия медицинского персонала и наличия здания – всего таких объектов в Оёкском кусте – семь (см. таблицу 8);
- в качестве предпочтительных критериев выбора населенных пунктов определим: год постройки (реконструкции); расстояние до ближайшего пункта ПМСП (до центра кластера); расстояние до ближайшего пункта скорой медицинской помощи; наличие автобусного сообщения;

Весовой коэффициент для параметров возраста здания и расстояний установим, исходя из показателя численности населения, в расчете на 1 тыс. человек, кроме показателя «автобусное сообщение». Коэффициент важности параметра k – установим индивидуально для каждого из параметров (см. таблицу 8).

Результатом решения задачи МКВ при выбранных предпочтениях ЛПР являются д. Черемушка и д. Кыцигировка:

- в первом населенном пункте ключевыми параметрами, влияющими на конечный результат выбора, стали численность населения, расстояние до пункта ПМСП, а особенно расстояние до ближайшего пункта СМП и отсутствие автобусного сообщения;
- во втором населенном пункте – возраст здания и расстояния до пунктов ПМСП и СМП стали определяющими для выбора.

Произведенный выбор по разработанной методике вполне логичен – чем больше населения в населенном пункте, тем больше вероятность обращений за медицинской помощью. Чем дальше населенный пункт от первичной помощи, тем больше тратится времени и денег (бюджетных и/или гражданина). В части оказания скорой медицинской помощи действует правило «золотого часа», поэтому в предложенной методике расстояние для связанного параметра играет ключевое значение. Наличие или отсутствие автобусного сообщения определяет возможность жителя добраться до ближайшего пункта ПСМП.

Таблица 8. Данные для решения задачи МКВ

Кластер	Населенный пункт	Население	Критерии												Итого баллов
			ВВ2, год	к	Баллы	АР2, км	к	Баллы	АЕ2, км	к	Баллы	АР4, км	к	Баллы	
	(х)	(р), ед.	(Год постройки здания)			Расстояние до пункта ПМСП			Расстояние до пункта СМП			Автобусное сообщение с ЦРБ			
6	д. Бутырки	673	2008	0,3	3	5	1	34	40	0,7	19	1	4	0	56
6	д. Галки	682	1980	0,3	9	4	1	27	42	0,7	20	1	4	0	56
6	д. Зыкова	178	2021	0,3	0	4	1	7	42	0,7	5	1	4	0	12
6	д. Коты	624	1985	0,3	7	6	1	37	40	0,7	17	1	4	0	62
5	д. Кысигировка	506	1975	0,3	7	8	1	40	60	0,7	21	1	4	0	69
1	д. Рязановщина	210	1994	0,3	2	11	1	23	65	0,7	10	0	4	4	38
3	д. Черемушка	553	2012	0,3	2	8	1	44	57	0,7	22	0	4	4	72

При наличии данных о физическом состоянии здания результат выбора может быть и другим. При наличии информации о предпочтении медика в выборе населенного пункта результат также может быть другим.

Таким образом, добавляя (либо отменяя) предпочтения ЛПР, можно получать различные результаты, которые при определённых комбинациях могут оказаться одинаковыми или близкими. В этом случае у ЛПР появляется больше качественных оснований для принятия окончательного решения.

Заключение. Для решения задачи поиска оптимального решения при выборе населенного пункта, наиболее нуждающегося в организации медицинской помощи, в данном исследовании использовались полу-ручные методы сбора и обработки информации и сторонние программные решения. На данный момент, по нашему мнению, успешно прошла сама апробация методики выбора и алгоритмов многокритериального выбора, и алгоритма кластеризации. Для более полной автоматизации процесса обработки данных, а также создания удобного для пользователя интерфейса, в дальнейшем планируется разработать отдельную программную систему, для которой структура параметров выбора ЛПР станет требованием к структуре базы данных, а предложенные алгоритмы решения задачи МКР и решения задачи кластеризации – функциональными требованиями к системе. Созданная полнофункциональная экспертно-ориентированная система позволит осуществлять выбор населенных пунктов на новом – более качественном уровне, достичь который без использования средств вычислительной техники не представляется возможным.

Список источников

1. Анна Шушкина. Минздрав: за два года в России открыли 1752 фельдшерско-акушерских пункта. Парламентская газета, – URL: <https://www.pnp.ru/social/minzdrav-za-dva-goda-v-rossii-otkryli-1752-feldshersko-akusherskikh-punkta.html> (дата обращения: 06.07.2023).
2. Количество ФАП продолжает снижаться. Медвестник. – URL: <https://medvestnik.ru/content/news/Kolichestvo-FAP-prodoljajet-snijatsya.html> (дата обращения: 06.07.2023)
3. Еругина М.В. Современные проблемы организации медицинской помощи сельскому населению / М.В. Еругина, И.Л. Кром, О.В. Ермолаева, Е.П. Ковалев, Г.Н. Бочкарева // Современные проблемы науки и образования, 2016. – № 5. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=25246> (дата обращения: 05.07.2023).
4. Фоменков С.А. Представление физических знаний для автоматизированных систем обработки информатизации: Монография. / С.А. Фоменков, А.В. Петрухин, В.А. Камаев, Д.А. Давыдов. – Волгоград: ТОО “Принт”, 1998. – 152 с.

5. Темникова Е.А. Онтологическое моделирование предметной области учреждения дополнительного профессионального образования / Е.А. Темникова, В.С. Асламова, О.Г. Берестнева // Онтология проектирования, 2015. – Т. 5. – № 4(18). – С. 369-386.
6. Загорюлько Г.Б. Разработка онтологии задач и методов для инструментария построения интеллектуальных СППР / Г.Б. Загорюлько // Информационные и математические технологии в науке и управлении: труды XVII Байкальской Всероссийской конференции, Иркутск, 2012 / Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН; ответственный редактор Л. В. Массель. Том 3. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, 2012. – С. 43-50.
7. Friedman A., Miles S. Stakeholders: theory and practice. Oxford: Oxford University Press, 2006, 360 p., available at: <https://readli.net/stakeholders-theory-and-practice>.
8. Петров М.А. Теория заинтересованных сторон: пути практического применения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент, 2004. – № 2. – С. 51-67.
9. Юрлов Ф.Ф. Выбор эффективных решений в конфликтных ситуациях с учетом интересов стейкхолдеров / Ф.Ф. Юрлов, С.Н. Яшин, А.Ф. Плеханова // Вестник Самарского университета. Экономика и управление, 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 137-146.
10. Аношина С.В. Модель и методика многокритериального выбора с учетом неполной информации о предпочтениях ЛПР / С.В. Аношина // Информация и космос, 2015. – № 4. – С. 88-98.
11. Hastie T. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction: with 200 full-color illustrations. New York, Springer, 2001, 533 p.
12. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю. – М.: Финансы и статистика, 1988. 345 с.
13. Sneath P.H.A., Sokal R.R. Numerical Taxonomy. The principles and practice of numerical classification. W.H. Freeman and Co, San Francisco, 1973.

Ерженин Роман Валерьевич. Кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического менеджмента, Байкальская международная бизнес-школа, Иркутский государственный университет. ScopusID: 57204457721, ORCID: 0000-0001-9380-0987, SPIN: 6438-1418, AuthorID: 752554, rerzhenin@gmail.com, 664003, Россия, Иркутск, Карла Маркса, 1.

Хребтова Таисия Петровна. Студентка института информационных технологий и анализа данных, Иркутского национального исследовательского технического университета. tasya132002@gmail.com, 664074, Россия, Иркутск, Лермонтова, д. 83.

UDC 004.891.2: 519.23

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.003

Methodology for determining of priorities in the organization primary medical care in the rural space

Roman V. Erzhenin¹, Taisiya P. Hrebtova²

¹ Irkutsk State University, Russia, Irkutsk, rerzhenin@gmail.com

² Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The article deals with the urgent problem of the priority choice of rural settlements, where it is necessary to improve the conditions for the provision of medical care. For a conceptual understanding of the problem of choosing the optimal solution, a brief thesaurus has been formed and an ontology of the subject area has been developed. As the main selection algorithm, it is proposed to use an algorithm for solving a multicriteria problem based on the theory of antagonistic games, taking into account incomplete information about the preferences of the decision maker. The authors of the article proposed a multi-parameter decision-making model, which includes three main groups of criteria: the availability of medical care, the parameters of the building and the parameters of the medical staff. To prepare data with settlement parameters, nearest neighbor clustering and centroid ratio methods are used. The results of processing the data matrix of the Oeksky bush of the Irkutsk region were tabular data and a graphical display of clusters and their centers on the axis of geographical coordinates. The modified algorithm for processing two matrices made it possible to calculate the optimal distances within the clusters. The solution of the problem of multi-criteria choice on the example of one cluster of the subject of the Russian Federation according to the chosen preferences of the decision maker made it possible to reasonably formulate

arguments for making a decision. The developed data model and algorithms for determining the selection parameters can be used as the basis for the formation of the terms of reference for the development of a full-featured expert-oriented system that can raise the quality of decision making to a higher level.

Keywords: fap; lpr; decision making; multi-criteria choice; cluster analysis; healthcare; expert-oriented system

References

1. Anna Shushkina Minzdrav: za dva goda v Rossii otkryli 1752 fel'dshersko-akusherskih punkta [Ministry of Health: 1,752 feldsher-obstetric points were opened in Russia in two years]. Parliamentary newspaper, available at: <https://www.pnp.ru/social/minzdrav-za-dva-goda-v-rossii-otkryli-1752-feldshersko-akusherskih-punkta.html> (access date: 07/06/2023).
2. Kolichestvo FAP prodolzhaet snizhat'sya [The number of FAPs continues to decline]. Medvestnik, available at: <https://medvestnik.ru/content/news/Kolichestvo-FAP-prodolzaet-snijatsya.html> (access date: 07/06/2023)
3. Erugina M.V., Krom I.L., Ermolaeva O.V. [et al.] Sovremennye problemy organizacii medicinskoj pomoshchi sel'skomu naseleniyu [Modern problems of organizing medical care for the rural population]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education], 2016, no. 5, available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=25246> (accessed: 07/05/2023).
4. Fomenkov S.A., Petrukhin A.V., Kamaev V.A. [et al.] Predstavlenie fizicheskikh znaniy dlya avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatizacii: Monografiya [Physical knowledge representation for automated informatization processing systems: Monograph]. Volgograd: Print LLP, 1998, 152 p.
5. Temnikova E.A., Aslamova V.S., Berestneva O.G. Ontologicheskoe modelirovanie predmetnoj oblasti uchrezhdeniya dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya [Ontological modeling of the subject area of an additional professional education institution]. Ontologia proektirovaniya [Ontology of design], 2015, vol. 5, no. 4(18), pp. 369-386.
6. Zagorulko G. B. Razrabotka ontologii zadach i metodov dlya instrumentariya postroeniya intellektual'nykh SPPR [Development of an ontology of tasks and methods for tools for building intelligent DSS]. Information and mathematical technologies in science and management: Proceedings of the XVII Baikal All-Russian conference, Irkutsk, June 30, 2012. Institute of Energy Systems. L. A. Melent'eva SB RAS; executive editor L. V. Massel. Volume 3. Irkutsk, Institute of Energy Systems. L.A. Melent'eva SB RAS, 2012, pp. 43-50.
7. Friedman A., Miles S. Stakeholders: theory and practice. Oxford: Oxford university press, 2006. 360 p., available at: <https://readli.net/stakeholders-theory-and-practice>.
8. Petrov M.A. Teoriya zainteresovannykh storon: puti prakticheskogo primeneniya [Stakeholder theory: ways of practical application]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment [Bulletin of St. Petersburg university. Management], 2004, no. 2, pp. 51-67.
9. Yurlov F.F., Yashin S.N., Plekhanova A.F. Vybory effektivnykh reshenij v konfliktnykh situatsiyah s uchetom interesov stejkkholderov [The choice of effective solutions in conflict situations, taking into account the interests of stakeholders]. Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravleniye [Bulletin of the Samara university. Economics and management], 2021, vol. 12, no 3, pp. 137-146.
10. Anoshina S.V. Model' i metodika mnogokriterial'nogo vybora s uchetom nepolnoy informatsii o predpochteniyakh LPR [Model and methodology of multi-criteria choice taking into account incomplete information about the preferences of the decision maker]. Informatsiya i kosmos [Information and space], 2015, no. 4, pp. 88-98.
11. Hastie Trevor. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction: with 200 full-color illustrations. New York, Springer, 2001, 533 p.
12. Zhambyu M. Ierarhicheskij klaster-analiz i sootvetstviya [Hierarchical cluster analysis and correspondences]. M.: Finansy i statistika [Finance and statistics], 1988, 345 p.
13. Sneath P.H.A., Sokal R.R. Numerical Taxonomy. The principles and practice of numerical classification. W.H. Freeman and Co, San Francisco, 1973.

Erzhenin Roman Valerievich. Ph. D, associate professor of the Department of strategic management, Baikal International business school, Irkutsk state university. ScopusID: 57204457721, ORCID: 0000-0001-9380-0987, SPIN: 6438-1418, AuthorID: 752554, erzhenin@gmail.com, 664003, Russia, Irkutsk, Karla Marx, 1.

Khrebtova Taisiya Petrovna. Student Institute of information technologies and data analysis Irkutsk National research technical university. tasya132002@gmail.com, 664074, Russia, Irkutsk, Lermontova, 83.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023; одобрена после рецензирования 18.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 07/11/2023; approved after reviewing 09/18/2023; accepted for publication 09/25/2023.

УДК 004.422.81

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.004

Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилера

Малимонов Максим Игоревич¹, Якубайлик Олег Эдуардович²

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,

²Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, malimonov.mi@ksc.krasn.ru

Аннотация. В статье рассматривается программная структура веб-приложения для отображения данных температурного профилера. Описаны модули для формирования и получения данных, которые используются для построения графических материалов и проиллюстрированы примеры построенных графиков. Также рассмотрены инструменты и библиотеки, которые были использованы для создания данного веб-приложения.

Ключевые слова: визуализация данных, фреймворк, температурный профилер, JavaScript, vue

Цитирование: Малимонов М.И. Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилера / М.И. Малимонов, О.Э. Якубайлик // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 41-49. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.004.

Введение. Мониторинг состояния атмосферного воздуха позволяет выявлять негативные воздействия различных факторов на качество воздуха. Метеорологические факторы влияют на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, что приводит к ухудшению качества воздуха [1-4].

На данный момент существуют множество различных систем для обработки и визуализации метеорологических и климатических данных, которые используют свои подходы. Некоторые из таких систем опираются на смоделированные данные, например, на GFS или ECMWF, которые предоставляют информацию о состоянии планеты на различных высотах. В таких моделях содержится информация о температуре, облачности, скорости и порыве ветра, атмосферном давлении, влажности и т.д. Основной решаемой задачей является реализация механизмов обработки и отображения данных модели. Модель содержит огромное количество информации, которое невозможно одновременно передать и визуализировать. Для этого необходима предобработка.

Например, веб-система Ventusky строит монохромные карты для каждого из показателей и хранит их на сервере. Монохром представляет собой набор оттенков серого цвета, значения которого варьируются от 0 до 255. В соответствии с настройками пользователя данные карты подгружаются и раскрашиваются уже в приложении. Такой подход позволяет снизить размер передаваемых кусков карты, что увеличивает скорость загрузки и отображения.

Веб-система Windy не использует карты с показателями, а передает все данные в формате JSON, а затем накладывает сетку со значениями на карту мира и раскрашивает в соответствии с настройками.

Обе системы имеют разные подходы, но их решения обеспечивают быстрые загрузки данных при переключении показателей и даты отображения данных. Скорость работы очень важна при отображении метеорологической информации на карте в реальном времени.

Также существуют настольные геоинформационные системы (ГИС) для работы с метеоданными, которые используются для визуализации. Для таких решений важны инструменты анализа и обработки, а не скорость отображения данных для пользователя. ПК «ГИС МЕТЕО» – это универсальный инструмент, предназначенный для создания, обработки и документирования метеорологических карт, организации работы метеорологов, аэропортов, аэродромов и

центров воздушного управления. ПК имеет множество инструментов, использует как общепринятые форматы и подходы для обработки и хранения данных, так и свои собственные. «ГИС МЕТЕО» использует как форматы `cdb`, `grib` для хранения данных, так и различные форматы спутниковых изображений `.art` или `.hrp`, принятых с орбитальных станций. Формат `cdb` представляет собой базу данных констант, быстрый файловый пакет для чтения и записи, скорость работы достигается путем использования хеш-таблиц и хеш-ключей, где можно указать прогностические значения метеорологических параметров, такие, как температура, осадки, облачность и т.д. Формат `grib` – математический формат сжатия данных для хранения прогнозируемых данных о погоде. Данная система имеет один недостаток: вся ее работа связана с существующими базами данных на серверах разработчика продукта и теряет все свои возможности при отключении интернета.

Национальные институты Норвегии и Швеции используют систему DIANA (Digital Analysis). DIANA является основной системой визуализации метеорологической и океанической информации в этих странах [5]. Система распространяется свободно, в связи с этим для неё вышло множество различных расширений и модулей, в том числе модуль CGI (Common Gateway Interface – стандарт интерфейса для внешнего управления и получения данных от программы) – оболочка, которая позволяет отобразить интерфейс программы и ее данные в браузере в формате `.png`. DIANA использует различные форматы для передачи и хранения данных. Для записи и хранения анализа и прогноза погоды данные хранятся в формате `netcdf`, этот формат представляет собой двоичный файл и является стандартом для обмена научными данными. Данные различных стационарных наблюдений хранятся в формате `bufr`. Это удобный формат, так как данные предоставляются с временными и пространственными метаданными. Также к файлам в формате `bufr` можно прикрепить любые метаданные по желанию пользователя. С 2011 года данная система была запущена в Гидрометцентре России.

Некоторые системы строятся на специальных комплексах для наблюдения за атмосферой [6-7]. Например, «МОСЭКОМОНИТОРИНГ» использует один из таких комплексов – температурный профилемер МТР-5, который позволяет отображать термическую структуру километрового слоя атмосферы и получать ее динамику. Данное оборудование предназначено для экологического мониторинга городов, а также для проведения научных экспериментов, связанных с метеорологическими параметрами нижних слоев атмосферы. Для отображения данных был создан веб-интерфейс, который показывает температурную инверсию. К сожалению, данный сервис не предоставляет интерактивного просмотра и анализа информации, также использует неудачное решение с 3D-отображением, что ухудшает восприятие.

Вышеперечисленные примеры используют в работе картографические материалы и не предлагают информацию в ином виде. К сожалению, такой вид не подходит для анализа временных рядов. Настольные же ГИС имеют огромные возможности, что является и минусом, и плюсом одновременно, тратится много времени на обучение работе с программой, также эти программы необходимо покупать и устанавливать.

В 2021 году в городе Красноярск был установлен температурный профилемер МТР-5. Для отображения данных температурного профилемера существует программа, которая поставляется вместе с профилемером. К сожалению, программа работает только с файлами и не позволяет работать с базами данных, динамически обновлять данные для анализа, и имеет слабую интерактивность работы с графиками.

Для качественной работы с данными температурного профилемера необходимо разработать программное обеспечение, которое обеспечит возможность динамически загружать данные за определённые промежутки времени, предложит удобный инструмент для отображения температурных инверсий, позволит интерактивно работать с графическими материалами и не будет нуждаться в установке на какие-либо устройства.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи отлично подходят веб-технологии. Были выбраны следующие инструменты и программное обеспечение: программная платформа Node.js, фреймворк Vue.js, графическая библиотека Plotly.js и UI-компоненты Buefy.

Node.js – программная платформа на движке V8, написанная на C++, превращает JavaScript в язык общего назначения. Позволяет создавать серверы, компилировать проекты, есть свой менеджер пакетов для установки и публикации библиотек, является ядром практически всех проектов.

Vue.js – JavaScript-фреймворк с открытым исходным кодом для создания пользовательских интерфейсов. В Vue.js реализуется шаблон проектирования MVVM, что позволяет связывать данные и представления этих данных. При изменении данных в компоненте данные автоматически обновляются в модели, и наоборот, если данные изменяются в модели – автоматически обновляется компонент. Для адаптации к большим проектам в Vue.js используется модульность. Существуют свои файлы со своим расширением «vue», которые хранят в себе разметку html, javascript-сценарии и стилистику. Данный фреймворк был выбран из-за простоты работы в нем.

Plotly.js – JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом, которая была создана на основе D3.js. D3.js представляет собой набор инструментов для создания динамических визуализаций в веб-браузере, но не представляет готовые графические решения. Plotly.js как раз является оболочкой для D3.js, с множеством различных типов и видов графиков (линейные графики, тепловые карты, радиальные диаграммы и т.д.). Данная библиотека была выбрана, потому что может работать с огромным количеством объектов. Если взять суточные данные с шагом 5 минут и построить линейный график по каждой доступной высоте (24 высоты), то получится 6912 значений, что довольно много. Не все программные продукты могут в режиме реального времени и без задержек обработать такое количество данных при интерактивном взаимодействии (Например, приблизить график или отдалить график, выбрать нужный диапазон в любом месте на графике и приблизить его). Также данная библиотека поддерживает динамическое создание своих фигур и сущностей на графике, что позволяет изменять стандартные виды графиков под себя. Минус библиотеки в том, что она весит в сборке 20 мегабайт.

Buefy – это библиотека готовых компонентов пользовательского интерфейса для фреймворка Vue.js, основанная на библиотеке Bulma. Была выбрана из-за своей легкости, чтобы компенсировать размеры Plotly.js, размер библиотеки всего 80 килобайт.

Внутри веб-приложения есть несколько блоков, которые отвечают за загрузку данных, формирование данных для отображения и локальное хранилище со стартовыми настройками. При взаимодействии с графическими оболочками их состояния записываются в локальное хранилище и на основе этих изменений обновляются данные для отображения. Так как веб-приложения позволяет менять местами окна внутри себя, то необходимо следить и за их положением и размерами, которые также хранятся в локальном хранилище.

Получение данных. Веб-приложение работает с базой данных через специальное API, которое связано с базой данных, где хранятся все данные температурного профилера с минимальным шагом пять минут [8-10]. На рис. 1 ниже представлена схема обмена данными между сервисами.

Обмен между API и веб-приложением осуществляется по технологии REST API. Все данные приходят в формате XML. API может агрегировать данные и выдавать их с различным шагом (5 минут, 20 минут, 1 час, 1 день и т.д.).

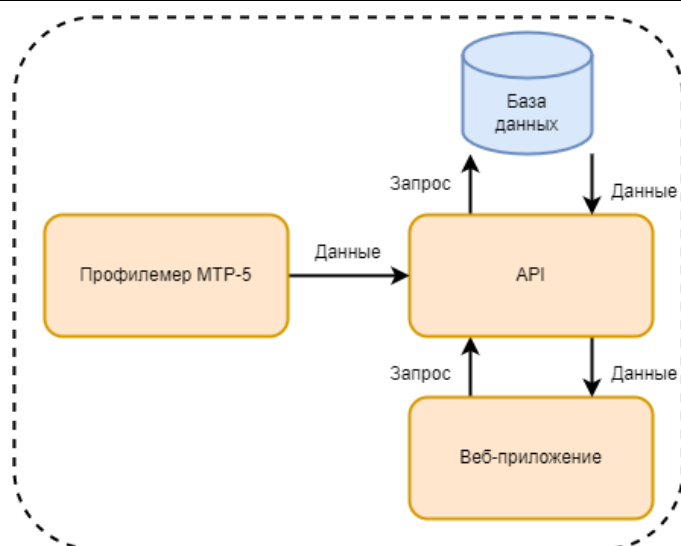


Рис. 1. Схема обмена данными

Веб-приложение имеет меню управления, которое позволяет менять параметры и получать данные, исходя из этих параметров. Например, выбирая разные диапазоны отображения данных (день, двое суток, неделя или месяц), веб-приложение автоматически запросит данные с необходимым шагом (5 минут, 20 минут, 1 час, 1 день соответственно).

Каждая запись из базы данных содержит:

- координаты размещения устройства;
- значение;
- уникальный идентификатор;
- время регистрации значения

После получения данных их необходимо обработать и представить в графическом виде. На рис. 2 ниже представлена схема обработки и формирования данных для отображения.

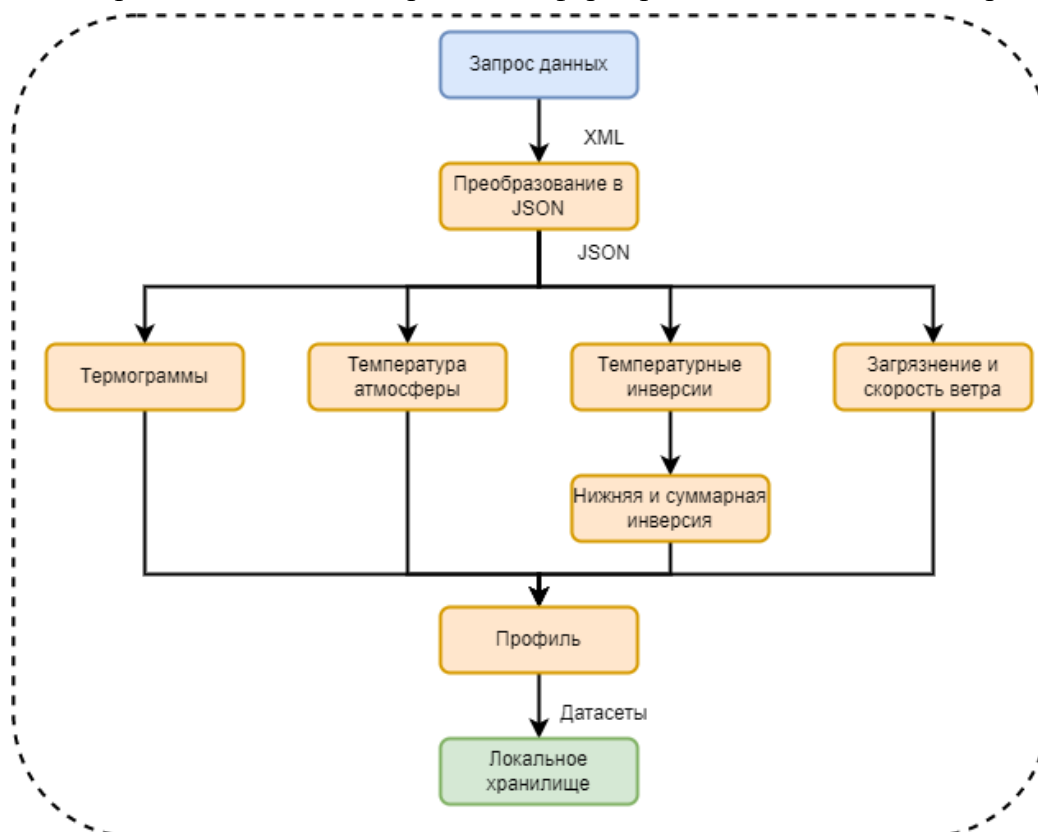


Рис. 2. Схема формирования данных внутри приложения

Ниже описаны модули формирования данных для разных графических представлений. После обработки XML и преобразования в JSON необходимо рассчитать и сформировать «датасеты» для графической библиотеки.

Модуль «Термограммы» формирует линейный график всех доступных высот с температурного профилера и каждую высоту помечает своим цветом. По оси x – время, по y – температура.

Модуль «Температуры атмосферы» формирует контурный график для всех доступных высот и показывает распределение температуры. Для этого типа графика формируется отдельная палитра, которая высчитывается от минимальных и максимальных значений температуры за выбранный период. По оси x – время, по y – высота, z – значение температуры.

Модуль «Температурные инверсии» формирует график «Тепловая карта». Такой тип графика представляет собой сетку значений. В каждой ячейке записывается значение температурной инверсии и в зависимости от мощности инверсии красится в соответствующий цвет. По оси x – время, по y – высота, z – значение температурной инверсии. Также на данном графике отображается сумма инверсии.

Модуль «Загрязнение и скорость ветра» формирует гистограмму, показывающая загрязнение в городе Красноярск, и линейный график, отображающий скорость ветра. По оси x – время, по y – концентрация частиц PM2.5, z – скорость ветра

Модуль «Профиль» формирует линейный график и показывает значениями температур по всем возможным высотам за конкретную выбранную точку. По оси x – значение температуры, по y – высоты.

На рис. 3 показаны сформированные графики каждым модулем.

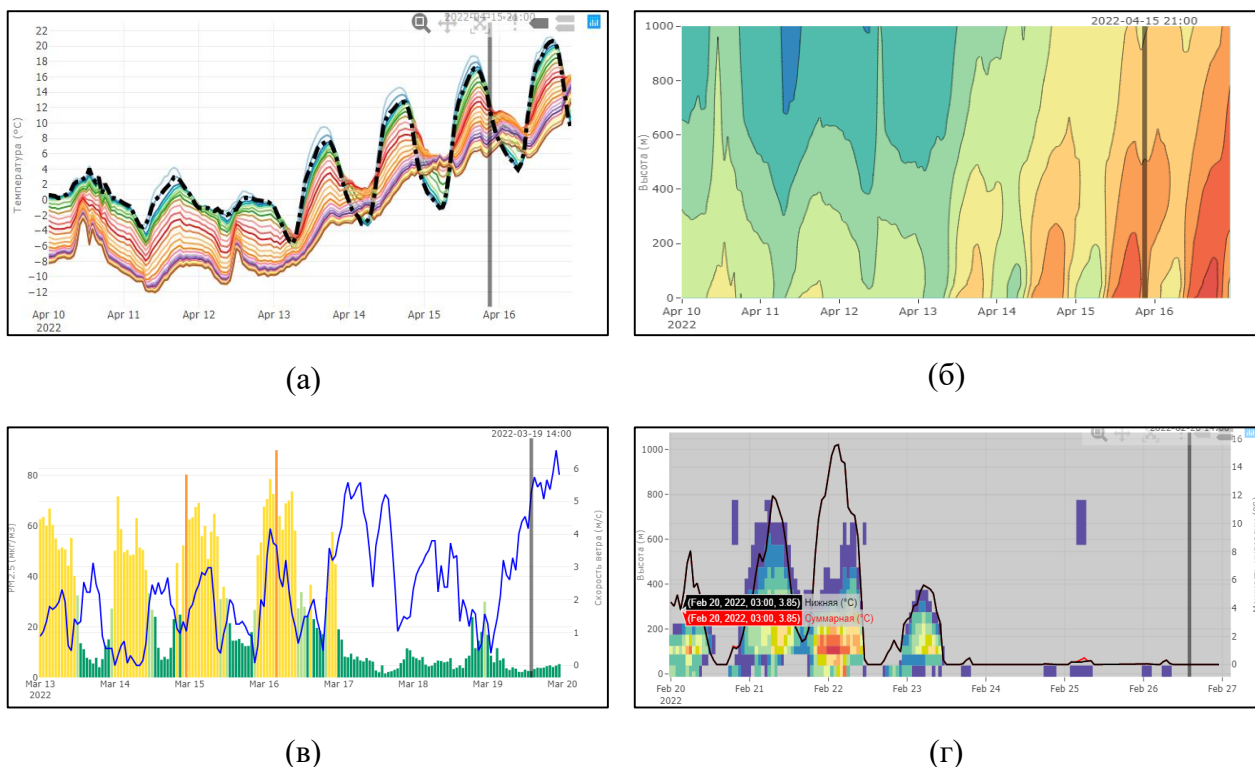


Рис. 3. Сформированные графики: термограммы (а), температура атмосферы (б), загрязнение и скорость ветра (в), температурные инверсии (г)

Как уже было сказано, все графики имеют программную оболочку, которая работает с локальным хранилищем. При изменении типа графика необходимо показать данные, соответствующие этому типу. На рис. 4 представлена схема обмена данными между графиком и локальным хранилищем.

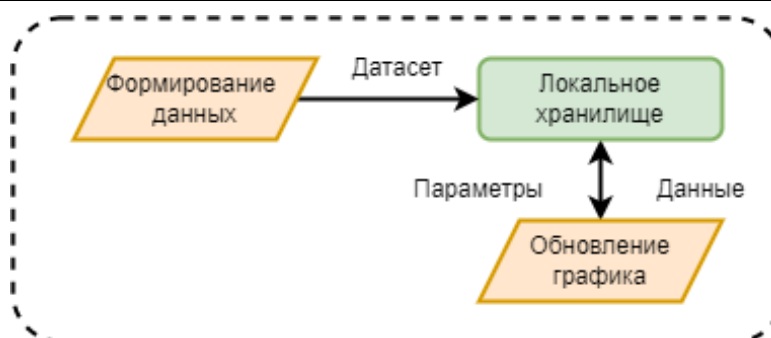


Рис. 4. Обмен данными между локальным хранилищем и графическими оболочками для отображения графических материалов

Программная оболочка при изменении передает свои параметры в локальное хранилище, по этим параметрам выдаются необходимые данные для отображения. Также при перемещении окон веб-приложения осуществляется автоматическое отслеживание положения этих окон. При перемещении легенды запоминаются координаты экрана, при перемещении графика запоминается его позиции в сетке. Веб-приложение представляет собой сетку с множеством ячеек, в локальном хранилище указано, сколько ячеек занимает каждый график и в каком порядке.

Отображение инверсии. Основной упор в веб-приложении направлен на отображение и анализ температурной инверсии. На рис. 5 ниже показана температурная инверсия с 19 декабря 2021г. по 30 декабря 2021г. На данном графике можно увидеть аномальную мощность инверсии в 25 градусов, также показана приподнятая и приземная инверсия.

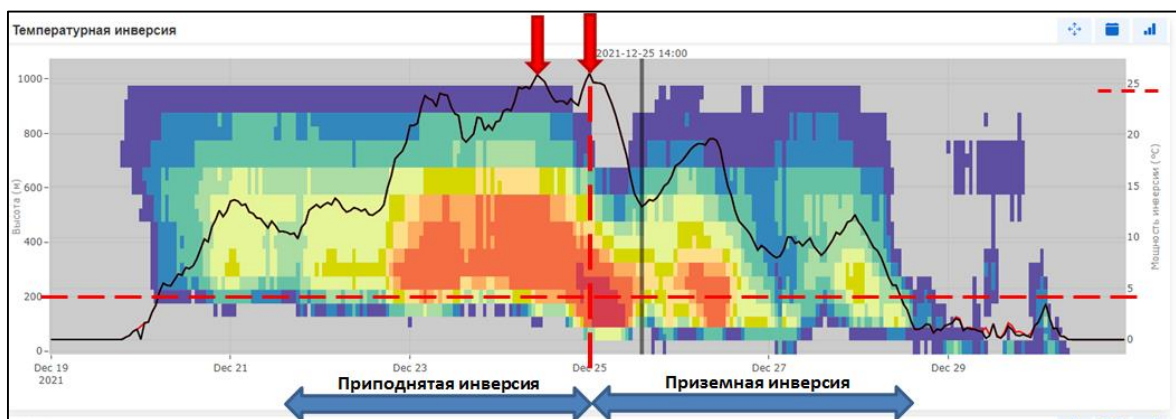


Рис. 5. Отображение приподнятой и приземной инверсии. Красные стрелки указывают на температурную инверсию в 25 градусов

При выборе определенной точки на графике строится профиль. Отдельно для профиля рассчитываются температурные инверсии. С помощью разработанного инструмента создаются определённые сущности для визуального отображения температурной инверсии на профиле. Если между соседними высотами есть инверсия, то между этими высотами строится прямоугольник, для которого указываются координаты по оси y . Справа от прямоугольника указывается значение температурной инверсии. Если на определенном участке множественные температурные инверсии, то считается сумма температурных инверсий и выводится на график в виде суммирующего синего прямоугольника. Сверху него отображается сумма температурных инверсий за этот промежуток. На рисунке 6 показаны примеры профиля и температурной инверсии.

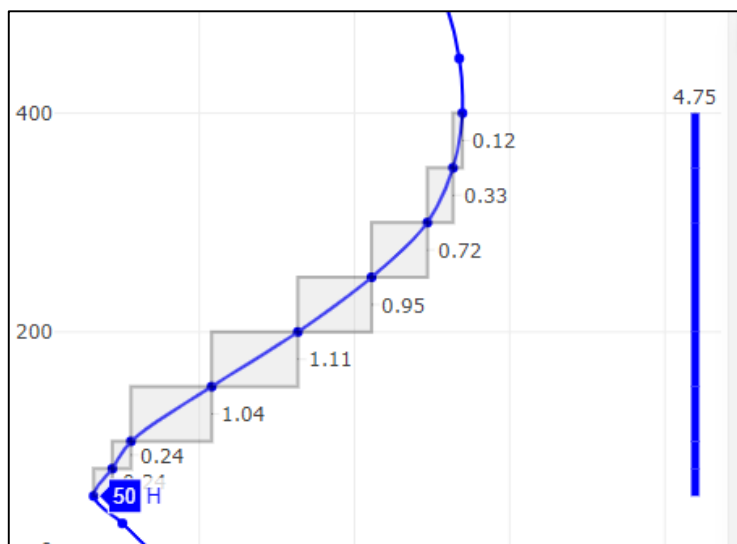


Рис. 6. Отображение температурной инверсии на профиле. Серыми прямоугольниками выделены температурные инверсии между высотами. Синий прямоугольник справа показывает сумму инверсий за этот промежуток

С помощью данных профиля и графика «Температурные инверсии» можно определить приподнятую и приземную инверсию, установить мощность температурной инверсии и высоты, на которых наблюдается данный феномен.

Все сформированные графики были взяты из готового приложения. На рисунке 7 продемонстрирован интерфейс приложения.

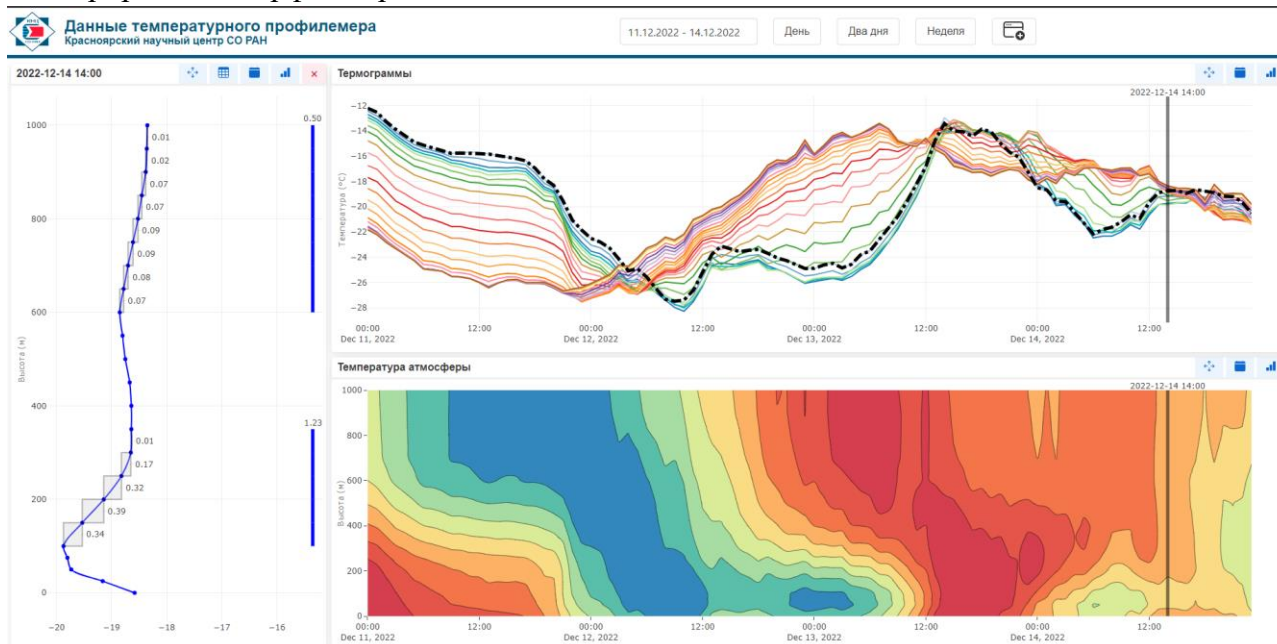


Рис. 7. Интерфейс приложения

Интерфейс содержит элементы управления для запроса данных, каждый график имеет кнопки для перемещения, отображения легенды и выбора типа графика.

Заключение. В результате этой работы было создано веб-приложение для отображения и анализа данных температурного профилера. Данное веб-приложение позволяет определить типы термической устойчивости, продолжительность температурной инверсии, прохождение холодных и теплых атмосферных фронтов и т.д. Приведены схемы работы приложения и описания программных модулей, отвечающих за формирование данных.

Список источников

1. Chen J., Zhao C.S., Ma N. [et al.] A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China plain. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, no. 12, pp. 4935-4950.
2. Lin M., Tao J., Chan C.Y. [et al.] Characterization of regression relationship between recent air quality and visibility changes in megacities at four haze regions of China. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2012, no. 12, pp. 1049-1061.
3. Luvsan M., Shie R., Purevdorj T. [et al.] The influence of emission sources and meteorological conditions on SO₂ pollution in Mongolia. *Atmos. Environ.*, 2012, no. 61, pp. 542-549.
4. Заворуев В.В. Влияние температуры и атмосферного давления на концентрацию взвешенных частиц в приземном воздушном слое поселков Дрокино и Милино (красноярский край) в зимний период / В.В. Заворуев, Е.Н. Заворуева, Н.В. Грубенко // Тенденции развития науки и образования, 2020. – № 59. – С. 23-27.
5. Зарипов Р.Б. Система визуализации метеорологической информации DIANA / Р.Б. Зарипов // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2014. – № 352. – С. 55-73.
6. Кадыгров Е.Н. Микроволновые радиометрические комплексы для мониторинга температуры пограничного слоя атмосферы / Е.Н. Кадыгров, Е.А. Миллер, В.В. Фоломеев // Мир измерений, 2010. – № 4. – С. 41-45.
7. Жукова В.А. Анализ температурных инверсий нижнего слоя атмосферы по данным микроволнового температурного профилера МТП-5 в городе Томске / В.А. Жукова, Н.П. Красненко, К.Н. Пустовалов, А.С. Раков // Распространение радиоволн, 2021. – С. 816-821.
8. Кадочников А.А. Разработка программных средств сбора и визуализации данных наблюдений для геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН / А.А. Кадочников, О.Э. Якубайлик // Вестн. НГУ. Информационные технологии, 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 23-31.
9. Кадочников А.А. Особенности построения геопространственных веб-приложений и сервисов для систем мониторинга состояния окружающей природной среды / А.А. Кадочников // Журнал СФУ. Серия: Техника и технология, 2015. – Т. 8. – № 7. – С. 908-916.
10. Малимонов М.И. Использование javascript-библиотек в подсистеме визуализации экологических данных / М.И. Малимонов // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН, 2020. – 65 с.

Малимонов Максим Игоревич. Младший научный сотрудник КЦН СО РАН. Основное направление – программирование. SPIN: 7645-6804, malimonov.mi@ksc.krasn.ru, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44.

Якубайлик Олег Эдуардович. Кандидат физико-математических наук. Заместитель директора по научной работе ИВМ СО РАН. Основное направление – геоинформационные технологии. SPIN: 7820-4178, oleg@icm.krasn.ru, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44.

UDC 004.422.81

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.004

Visualization and analysis of meteorological temperature profiler data

Maksim I. Malimonov¹, Oleg E. Yakubailik²

¹Federal researcher center “Krasnoyarsk scientific center SB RAS”,

²Institute of computer modeling SB RAS,

Russia, Krasnoyarsk, malimonov.mi@ksc.krasn.ru

Abstract. The article discusses the software structure of a web application for displaying data from a temperature profiler. Modules for data formation and retrieval are described, which are used to create graphical materials, and examples of constructed graphs are illustrated. Also considered are the tools and libraries that were used to create this web application.

Keywords: data visualization, framework, temperature profiler, JavaScript, vue

References

1. Chen J., Zhao C.S., Ma N. [et al.] A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China plain. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, no. 12, pp. 4935-4950.
2. Lin M., Tao J., Chan C.Y. [et al.] Characterization of regression relationship between recent air quality and visibility changes in megacities at four haze regions of China. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2012, no. 12, pp. 1049-1061.

3. Luvsan M., Shie R., Purevdorj T. [et al.] The influence of emission sources and meteorological conditions on SO₂ pollution in Mongolia. *Atmos. Environ.*, 2012, no. 61, pp. 542-549.
4. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Grubenko N.V. Vliyaniye temperatury i atmosfernogo davleniya na kontsentratsiyu vzveshennykh chastits v prizemnom vozdushnom sloye poselkov Drokino i Minino (Krasnoyarskiy kray) v zimniy period [The influence of temperature and atmospheric pressure on the concentration of suspended particles in the lower atmosphere of the Drokino and Minino settlements (Krasnoyarsk region) in winter]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in science and education], 2020, no. 59, pp. 23-27.
5. Zaripov R.B. Sistema vizualizatsii meteorologicheskoy informatsii DIANA [DIANA meteorological information visualization system]. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of the hydrometeorological research center of the Russian Federation], 2014, no. 352, pp. 55-73.
6. Kadygrov E.N., Miller E.A., Folomeev V.V. Mikrovolnovyye radiometricheskiye komplekсы dlya monitoringa temperatury pogranichnogo sloya atmosfery [Microwave radiometric complexes for monitoring the temperature of the atmospheric boundary layer]. *Mir izmereniy* [World of Measurements], 2010, no. 4, pp. 41-45.
7. Zhukova V.A., Krasnenko N.P., Pustovalov K.N., Rakov A.S. Analiz temperaturnykh inversiy nizhnego sloya atmosfery po dannym mikrovolnovogo temperaturnogo profilemera MTP-5 v gorode Tomske [Analysis of temperature inversions in the lower atmosphere using data from the MTDP-5 microwave temperature profiler in Tomsk]. *Rasprostraneniye radiovoln* [Radiowave propagation], 2021, pp. 816-821.
8. Kadochnikov A.A., Yakubaylik O.E. Razrabotka programmnykh sredstv sbora i vizualizatsii dannykh nablyudeniya dlya geoportala Instituta vychislitel'nogo modelirovaniya SO RAN [Development of observation data collection and visualization software for the geoportal of the institute of computational modeling SB RAS]. *Vestn. NGU. Informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of Novosibirsk State University. Information Technologies], 2014, vol. 12, no. 4, pp. 23-31.
9. Kadochnikov A.A. Osobennosti postroyeniya geoprostranstvennykh veb-prilozheniy i servisov dlya sistem monitoringa sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy [Features of building geospatial Web applications and services for environmental monitoring systems]. *Zhurnal SFU. Seriya: Tekhnika i tekhnologiya* [Journal of SFU. Engineering & Technologies], 2015, vol. 8, no. 7, pp. 908-916.
10. Malimonov M.I. Ispol'zovaniye JavaScript-bibliotek v podsisteme vizualizatsii ekologicheskikh dannykh [Using JavaScript libraries in the environmental data visualization subsystem]. *Mezhdistsiplinarnaya konferentsiya molodykh uchonykh FITS KNTS SO RAN* [Interdisciplinary Conference of Young Scientists FIC KNC SB RAS], 2020, 65 p.

Malimonov Maxim Igorevich. Junior Researcher of the CCC SB RAS. The main direction is programming. SPIN: 7645-6804, malimonov.mi@ksc.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, 50/44.

Yakubailik Oleg Eduardovich. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Deputy director for scientific work, INM SB RAS. The main direction is geoinformation technologies. SPIN: 7820-4178, oleg@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, 50/44.

Статья поступила в редакцию 02.06.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к публикации 18.08.2023.

The article was submitted 06/02/2023; approved after reviewing 08/16/2023; accepted for publication 08/18/2023.

УДК 004.912

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.005

Тезаурус по информационным технологиям в электронной библиотеке ФИЦ ИВТ

Барахнин Владимир Борисович, Федотова Ольга Анатольевна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Россия, Новосибирск, *of@ict.nsc.ru*

Аннотация. Статья посвящена описанию тезауруса по информационным технологиям, разработанному в рамках целевой программы развития информационных ресурсов Отделения «Электронная библиотека Сибирского отделения РАН». Тезаурус активно используется в учебном процессе студентов НГУ, а также для автоматической связи документов в электронной библиотеке, созданной и эксплуатируемой в Федеральном исследовательском центре информационных и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ). Для реализации тезауруса была выбрана схема данных Zthes, главное преимущество которой состоит в ее соответствии модели сетевого протокола Z39.50, что позволяет не только работать с собственным локальным тезаурусом, но и подключать при необходимости тезаурусы, расположенные в сети. В схему данных Zthes разработчиками были добавлены новые элементы. В настоящий момент тезаурус реализован на трех языках (русском, казахском и английском) и содержит свыше 20 000 терминов.

Ключевые слова: информационная система, электронная библиотека, словарь-справочник, классификация, информационно-поисковый тезаурус, Z39.50, схема данных, Zthes, метаданные

Цитирование: Барахнин В.Б. Тезаурус по информационным технологиям в электронной библиотеке ФИЦ ИВТ / В.Б. Барахнин, О.А. Федотова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 50-59. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.005.

Введение. В 1998 году в Сибирском отделении РАН была сформирована целевая программа развития информационных ресурсов Отделения под общим названием «Электронная библиотека Сибирского отделения РАН».

Для решения проблемы информационной обеспеченности научных исследований начались работы по созданию Интегрированной Распределенной Информационной Системы (ИРИС СО РАН) [1], являющейся полнофункциональной системой информации об интеллектуальном потенциале Сибирского отделения РАН (т.е. информационной системой об институтах, сотрудниках, достижениях и др.) и системой электронной поддержки сбора и накопления научной информации (электронных атласов, электронных коллекций, баз данных и т.п.).

Основные направления программы были связаны с информационной поддержкой научных исследований, проводимых в Отделении, а также с формированием и развитием собственных электронных ресурсов по основным отраслям наук, с управлением этими ресурсами, с созданием и поддержкой электронных коллекций, публикаций и библиографических ресурсов.

Несмотря на определенные противодействия, благодаря поддержке академиков Ю.И. Шокина, В.К. Шумного и И.Ю. Корапачинского были созданы первые коллекции.

На сегодняшний день наиболее эффективным способом решения проблем организации доступа к распределенным информационным ресурсам является организация информации о них в системах, облаченных в форму электронных библиотек. В рамках нашего подхода электронные библиотеки рассматриваются как средства поддержки отдельной конкретной технологии работы с цифровой информацией, образующие новый класс информационных систем (ИС), предназначенных для управления информационными ресурсами [2].

Под термином электронная библиотека (ЭБ) в настоящей работе понимается система управления структурированными каталогизированными коллекциями разнородных электронных (цифровых) объектов (ресурсов). ЭБ не только обеспечивает многосторонний поиск и навигацию по каталогам (в отличие от печатных изданий, микрофильмов и других носителей),

но и непосредственно предоставляет пользователю найденный ресурс (публикацию, документ, фотографию, описание факта и др.), а также дополнительные сведения о нем, например, географическую привязку, информацию об авторах, информацию о фактах, библиографию, перечень организаций и т.д.

В работе [3] представлены основные принципы реализации ИРИС, основанные на использовании идеи ЭБ, а в [4] определены основные цели, стоящие перед ЭБ:

- управление информационными ресурсами;
- обеспечение и управление доступом к информации;
- долговременное хранение информации;
- сохранение научного и культурного наследия;
- поддержка аналитической работы с информацией;
- повышение эффективности научных исследований и обучения.

Исходя из целей ЭБ и анализа существующих систем, направленных на поддержку научных исследований, в работе [5] сформулированы следующие функциональные требования к модели ЭБ:

- надежное долговременное и защищенное от исчезновения хранение информации;
- актуальность, полнота, достоверность происхождения документов;
- географическая привязка информации;
- наличие большого числа словарей-классификаторов (справочников) для обеспечения идентификации и классификации ресурсов;
- поддержка неоднородных и слабо структурированных информационных ресурсов;
- поддержка взаимосвязей информационных ресурсов;
- наличие интеллектуальных служб обслуживания запросов пользователя;
- наличие программных интерфейсов для поддержки аналитической работы пользователя с помощью программных приложений;
- поддержка требований интероперабельности как на программном, так и на семантическом уровне;
- поддержка работы с внешними источниками.

С учетом целей и требований была разработана модель ЭБ [6, 7, 8]. Основным выводом стало то, что она должна быть многоуровневой и состоять как минимум из следующих компонентов: распределенное хранилище данных – репозиторий, сервер метаданных, сервер приложений, словари-справочники (рис. 1).

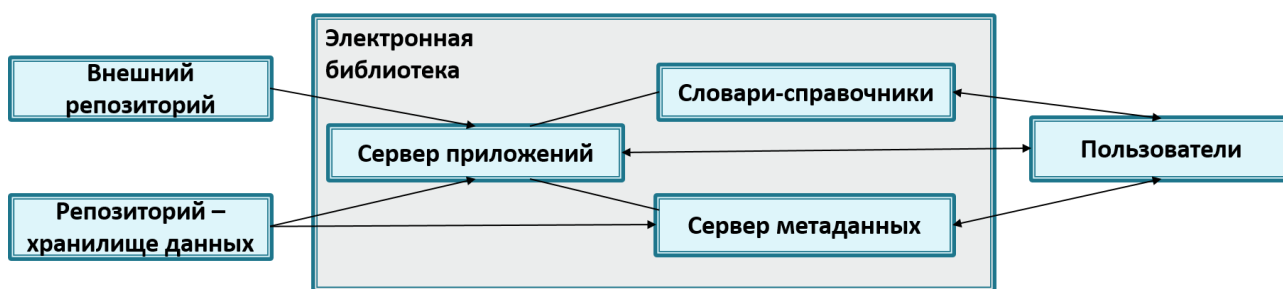


Рис. 1. Архитектура ЭБ

Разработанная модель ЭБ была реализована в виде Системы Управления Электронными Библиотеками (СУЭБ ИРИС) и эксплуатируется в ФИЦ ИВТ с 2004 года.

В работе использовались СУБД MySQL и PostgreSQL. Поддержка интероперабельности обеспечивается использованием открытых стандартов. Основные интерфейсы ЭБ (шаблоны представления документов библиотеки, формирование списков документов, агенты, определяющие связи документов и т. п.) написаны на языке PHP. Для осуществления логического и

визуального контроля ввода значений некоторых элементов метаданных написаны процедуры на языке Java Script. Для обработки регулярных выражений для задач поиска было принято решение об использовании поисковой машины протокола Z39.50, входящей в состав СУЭБ.

На сегодняшний день ЭБ включает свыше 60 коллекций. Среди них: научно-образовательный ресурс «Вычислительные системы» (свыше 1500 статей), ЭБ учебных пособий по курсам «Современные проблемы информатики и вычислительной техники», «Информатика», «Экология» и др., ЭБ по моделям динамики биосферы, по теплофизическим свойствам и фазовым превращениям теплоносителей и др., тезаурусы по «Информационным технологиям» (свыше 20000 терминов), «Горнорудной терминологии» и др., персоны (около 800 записей), коллекции учебных курсов по информатике и полные тексты публикаций, а также контролируемые словари и классификаторы. На рисунке 2 приведен пример из электронного ресурса «Вычислительные системы», иллюстрирующий материалы о наследии Джона фон Неймана: архитектура ЭВМ, биография, ссылки на репозиторий. Справа представлена словарная статья с ключевыми словами, ссылки на литературу и персону, слева – фрагменты биографии и ссылки на репозиторий.

Архитектура фон Неймана

Синонимы: Неймановская архитектура; Принстонская архитектура;

В статье фон Неймана «First Draft of a Report on the EDVAC» определены основные устройства ВМ, с помощью которых реализованы его принципы. Большинство современных ВМ по своей структуре отвечают принципу программной неймановской ВМ: содержит: память, устройство управления, арифметико-логическое устройство и устройство ввода-вывода.

Ключевые термины, связанные с термином "Архитектура фон Неймана":

1. Архитектура вычислительной машины
2. Вычислительная машина с непосредственными связями
3. Гарвардская архитектура
4. Машина Тьюринга
5. Принципы фон Неймана
6. Последовательный язык
7. Управление последовательностью команд

Литература

Дополнительная:

1. John von Neumann First Draft of a Report on the EDVAC // Journal IEEE Annals of the History of Computing October 1993 Page 27-75
2. Черняк И. Архитектура фон Неймана, реконфигурируемые компьютерные системы и автоматы // Открытые системы. 1998. № 1. С. 10-15
3. Цильбер Б.Я. Организация ЭВМ и систем : Учебник для вузов / Б.Я. Цильбер, С.А. Орлов. - 2-е изд., стер. - М.: СПб.: 978-5-49807-862-5.

Ссылки на персону:

1. Нейман Джон фон

Ключевые термины (головные): Архитектура вычислительной машины, Принципы фон Неймана.

Контекстный поиск: Задайте образец для поиска:

Джон фон Нейман
28 декабря 1903, Будапешт — 8 февраля 1957, Вашингтон



Основные достижения:

Джон фон Нейман (John von Neumann) сделал важный вклад в квантовую физику, квантовую логику, функциональный анализ, теорию множеств, теорию автоматов, кибернетику, информатику, экономику и другие отрасли науки.

Наиболее известен как создатель современной архитектуры компьютеров (архитектура фон Неймана), применением теории операторов к квантовой механике (алгебра фон Неймана), а также как участник Манхэттенского проекта и как создатель теории игр и концепции клеточных автоматов.

В 1946 году Джон фон Нейман на основе критического анализа конструкции ENIAC предложил ряд новых идей организации ЭВМ, в том числе концепцию хранения в памяти программы. В результате реализации идей фон Неймана была создана архитектура ЭВМ, во многих чертах сохранившаяся до настоящего времени.

В 1951 году Джон фон Нейман, используя идеи Эккерта формулирует принципы организации вычислительных систем (Принципы фон Неймана), которые легли в основу всех современных компьютеров:

1. Универсальная вычислительная машина должна содержать несколько основных компонент, таких как арифметическое устройство, память, устройство управления и связи с оператором.
2. Вычислительная машина должна быть полностью автоматической, т.е. после начала вычисления, работа машины не должна зависеть от человеческого оператора.

John von Neumann First Draft of a Report on the EDVAC // Journal IEEE Annals of the History of Computing archive Volume 15 Issue 4, October 1993 Page 27-75

The first draft of a report on the EDVAC written by John von Neumann is presented. This first draft contains a wealth of information, and it had a pervasive influence when it was first written. Most prominently, Alan Turing cites it in his proposal for Pilot automatic computing engine (ACE) as the definitive source for understanding the nature and design of a general-purpose digital computer.

Ссылка на адрес в репозитории: First Draft of a Report on the EDVAC
URL-адрес источника ресурса: First Draft of a Report on the EDVAC
Ссылка на репозиторий DSpace: First Draft of a Report on the EDVAC

Ссылки на авторов публикации:
Нейман Джон фон

Рис. 2. Пример электронного ресурса «Вычислительные системы»

В 2015 году для поддержки этих научно-образовательных ресурсов был создан трехязычный тезаурус предметной области «Информатика», содержащий термины на русском, английском и казахском языках (21672 термина). В качестве платформы реализации тезауруса была использована вышеуказанная СУЭБ. Тезаурус активно используется в учебном процессе студентов НГУ, а также для автоматической связи документов в электронной библиотеке.

1. Проблемы классификации. Стандартным подходом к систематизации информации является классификация документов с помощью таксономий, т.е. предметной классификации, которая группирует термины в виде управляемого словаря (тезауруса) и упорядочивает их (словари) в виде иерархических структур. Для описания какой-либо предметной области обычно используется определенный набор ключевых терминов, каждый из которых обозначает или описывает какое-либо понятие из данной предметной области [9]. Основу классификации составляет выделение понятий (ключевых терминов), установление парадигматических отношений (например, типа родитель – потомок) между ними и сопоставление анализируемого документа выделенным понятиям.

Основная проблема состоит в высокой трудоемкости и стоимости ручного составления тезауруса, малой гибкости процесса его построения. В тезаурусах для ручного индексирования совокупности близких понятий сводятся к одному, наиболее представительному понятию для уменьшения субъективности индексирования. В автоматизированных тезаурусах семантически близкие понятия представлены в виде отдельных единиц, что позволяет использовать при поиске синонимические ряды. Трудность построения тезауруса, соответствующего всему тематическому многообразию индексируемой информации, является основной причиной его непопулярности в современных информационных системах. Но если рассматривать вопрос об эффективности информационных систем в определенных областях знаний, то создание и использование специализированных тезаурусов в таких системах представляет несомненный интерес и переводит систему в совершенно другой качественный класс.

Эффективность информационно-поисковых систем для поддержки научно-образовательной деятельности напрямую зависит от использования специализированных тезаурусов. Дополнительной особенностью при создании информационной системы поддержки в научно-образовательной деятельности для таких стран, как Казахстан или Россия, является необходимость поддерживать поисковые и классификационные процессы одновременно на нескольких языках: для России, в основном, на двух языках (русском и английском), а для Казахстана – как минимум на трех (русском, английском и казахском) языках. Следовательно, документы должны индексироваться в трех различных пространствах, соответствующих трем языкам, между элементами которых должны быть установлены отношения эквивалентности, либо в интегрированном пространстве, который задается многоязычным тезаурусом.

Отметим, что элементы признаков пространств могут быть представлены в документе в различных словоформах, поэтому важнейшей проблемой является учет морфологии конкретного языка при индексации документов.

2. Тезаурусы в информационном поиске. Согласно определению международной организации по стандартизации (ISO), тезаурус является словарем, управляемым языком индексации, формально организованным для того, чтобы установить явные априорные отношения между понятиями [10, 11]. Это определение устанавливает лексические единицы и семантические отношения между этими единицами в качестве элементов, составляющих тезаурус. Тезаурусные отношения (род – вид, часть – целое и др.) налагаются на структуру таксономии, т.е. идентифицируются основные таксономии предметной области.

Исторически тезаурусы создавались для ручного индексирования документов и при их создании не принимались во внимание вопросы, связанные с автоматической индексацией.

Один из первых в истории и наиболее известных на сегодня тезаурусов (идеографических словарей) составлен британским лексикографом Питером Марком Роже и опубликован в 1852 г. Оригинальное название тезауруса Роже – *Thesaurus of English Words and Phrases* (Тезаурус английских слов и фраз).

В области машинного перевода впервые тезаурус был использован М. Мастерман (M. Masterman). В 1961 г. появилась работа [12], в которой определялся базовый словарь для 15000 понятий. При помощи тезаурусов устанавливалось соответствие между языком запросов пользователя и документами в информационной системе.

Ю.А. Шрейдер [13] предлагал рассматривать тезаурус как систему знаний, отраженных языком, тогда тезаурус становится интересным сам по себе, а не только как вспомогательный инструмент.

Среди универсальных автоматизированных тезаурусов следует отметить интеллектуальный электронный тезаурус для английского языка WORDNET, разработанный в Принстон-

ском университете, аналогичный тезаурус RussNet для русского языка, разрабатываемый сотрудниками кафедры математической лингвистики Санкт-Петербургского государственного университета, многоязычный тезаурус ЮНЕСКО.

Среди специализированных тезаурусов, реализованных уже на машинных носителях с программной поддержкой для пользователей, можно отметить следующие: многоязычный тезаурус EuroVOC, специально разработанный для индексирования и поиска информации в документальных и библиографических базах данных Европейского Союза; тезаурусы и контролируемые словари Исследовательской службы Библиотеки Конгресса США; тезаурусы Американского общества индексирования ASI; известный тезаурус AGROVOC, охватывающий терминологию сельского и лесного хозяйства; компьютеризированный тезаурус медицинской терминологии SNOMED и др.

Среди российских тезаурусов следует отметить тезаурус парламентской библиотеки РФ, разработанный как средство индексирования и поиска документов в автоматизированной информационно-библиотечной системе.

3. Тезаурусы в описании информации. Информационно-поисковый тезаурус (в соответствии с определениями стандартов) – это нормативный (контролируемый) словарь ключевых терминов на естественном языке с явно указанными семантическими отношениями между терминами, предназначенный для описания содержания документов и поисковых запросов [14]. Тезаурус предназначен для описания конкретной предметной области, каждый термин которой обозначает или описывает какое-либо понятие из данной предметной области.

Термины, составляющие тезаурус, подразделяются на дескрипторы (авторизованные термины) и недескрипторы (аскрипторы). Дескрипторы однозначно соответствуют понятиям предметной области. Отношения между дескрипторами обычно разделяются на два типа: иерархические и ассоциативные. Иерархические отношения обычно рассматриваются как несимметричные и транзитивные.

В соответствии с ГОСТ 7.25-2001 [15] иерархические отношения обладают свойствами транзитивности и антисимметричности, которые могут быть использованы при избыточном индексировании в интересах повышения эффективности информационного поиска.

Применяемые в информационно-поисковых тезаурусах иерархические отношения могут дифференцироваться на отдельные виды. Основным иерархическим отношением, используемым в информационно-поисковых тезаурусах, является родовидовое отношение (родитель – потомок). Родовидовая связь устанавливается между двумя дескрипторами, если объем понятия нижестоящего дескриптора входит в объем понятия вышестоящего дескриптора. Также в качестве иерархического отношения в информационно-поисковых тезаурусах может устанавливаться отношение «часть – целое». Отношение ассоциации является неиерархическим и ассоциативным. Основное назначение установления ассоциативных отношений между дескрипторами информационно-поискового тезауруса – указание на дополнительные дескрипторы, полезные при индексировании или поиске [16].

Отметим, что описанная в национальных и международных стандартах модель информационно-поискового тезауруса предназначена для его использования в процессе ручного, экспертного анализа документов.

Главной целью разработки традиционных информационно-поисковых тезаурусов является использование их единиц (дескрипторов) для описания основных тем документов в процессе ручного индексирования. Поэтому важно, чтобы набор дескрипторов информационно-поискового тезауруса позволял описывать тематику документов предметной области. При этом сам процесс индексирования по такому тезаурусу базируется на лингвистических, грамматических знаниях, а также знаниях о предметной области, которые имеются у профессио-

нальных индексаторов текстов. Индексатор сначала должен прочитать текст, понять его и затем изложить содержание текста, пользуясь дескрипторами, указанными в информационно-поисковом тезаурусе. Индексатор должен хорошо понимать всю терминологию, использованную в тексте, тогда для описания основной темы текста ему понадобится значительно меньшее количество терминов [9, 16].

4. Схема данных Zthes. Для реализации тезауруса была выбрана схема данных Zthes, главное преимущество которой состоит в ее соответствии модели сетевого протокола Z39.50, что позволяет не только работать с собственным локальным тезаурусом, но и подключать при необходимости тезаурусы, расположенные в сети [17].

Исходя из общей идеологии Z39.50, доступ к любой базе данных должен осуществляться через единую стандартную схему данных, на которую должны быть корректно отображены все частные структуры. Схема Zthes впервые была описана в стандарте ISO 25964-1:2011 [14]. Стандарт предназначен для использования в приложениях для информационного поиска. Он применим в отношении словарей, используемых для поиска и извлечения информации из информационных ресурсов всех видов, независимо от вида носителей (текст, звук, фотографии и видеозаписи, физические или мультимедийные объекты), включая базы знаний и порталы, библиографические базы данных, текстовые, музейные и мультимедийные коллекции и содержащиеся в них объекты. Стандарт используется в отношении одно- и многоязычных тезаурусов. Последняя версия стандарта утверждена в 2022 году.

Схема Zthes предполагает использование весьма ограниченного набора типов отношений между терминами. Это сделано преднамеренно для большей совместимости.

Между терминами, в соответствии с рекомендациями стандарта, устанавливаются следующие типы связей:

- *BT* – связь с родительским термином, т. е. с термином более широкого смысла;
- *NT* – связь с дочерним термином, т. е. с термином более узкого смысла; связь *BT↔NT* является взаимно-обратной;
- *USE* – связь с термином, который используется вместо этого;
- *UF* – взаимно-обратная связь *USE*, *USE↔UF*;
- *RT* – связь, определяющая связанный термин;
- *LE* – связь между лингвистически эквивалентными терминами.

Связи *BT* и *NT*, а также *USE* и *UF*, взаимно-обратные. Связи *RT* и *LE* симметричны.

Кроме того, тип термина определяется в соответствии с рекомендациями стандарта.

В схеме Zthes выделяются следующие типы терминов:

- *TT* – термин верхнего уровня, т.е. термин, не имеющий связанных терминов более широкого класса (терминов с типом связей *BT*);
- *NT* – термин не верхнего уровня, т. е. дескриптор, имеющий связи типа *BT*;
- *ND* – неосновной термин;
- *NL* – фиктивный термин, т. е. термин, не используемый для индексации документов, но включенный в иерархию, чтобы указать логический базис раздела классов.

5. Реализация тезауруса. Практическая реализация тезауруса (алгоритмы, программы и заполнение базы данных), основанная на описанной выше схеме данных Zthes, была выполнена авторами настоящей работы, а также аспирантами факультета информационных технологий (ФИТ) Новосибирского государственного университета (НГУ), под руководством проф. А.М. Федотова и при его непосредственном участии.

Как было отмечено в предыдущем разделе, схема Zthes использует ограниченный набор данных для совместимости. В тезаурус авторами были добавлены расширения, связанные с удобством программной реализации:

- termNormName – нормальная форма термина (единственное число, именительный падеж и т.п.), элемент для учета морфологии, в частности, в алгоритмах поиска;
- termLinkID – алгоритмически вычисляемый уникальный идентификатор, характеризующий термин, обеспечивает ряд удобств при программировании;
- termScopeNote – элемент, содержащий словарную статью (или ссылку на нее) с подробным объяснением понятия, уточняющего смысл и область применения, ввиду ориентации разработанного тезауруса на использование в образовательном процессе.

Контролируемый словарь типа связей (relationType) был расширен признаком ‘SYN’ – полный синоним, куда заносится понятийный эквивалент термина, получаемый, как правило, из различий в его написании (например, вычислительные системы ≡ выч. системы).

Созданные компоненты реализации тезауруса (рис. 3) позволяют просматривать, редактировать и добавлять термины тезауруса в систему через web-формы, а также импортировать и экспортировать термины в виде XML-, RDF-, DTD-файлов. Преобразование данных в схемы данных SKOS, MARC, MODS и представление терминов в браузере производится с помощью XSLT-преобразования.

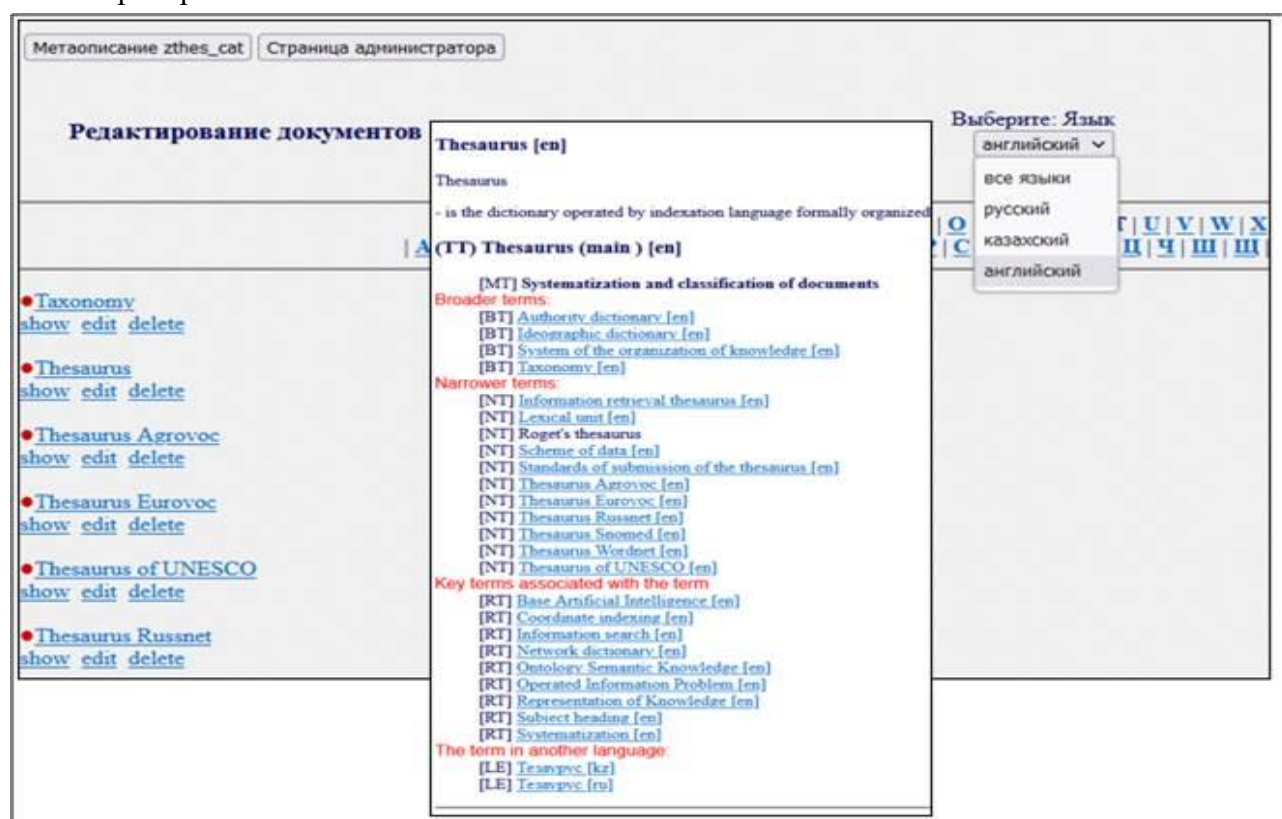


Рис. 3. Иллюстрация редактирования тезауруса

Базовое метаописание термина включает следующие элементы и связи: название термина, UID (основной link_id), описание термина, язык термина, связь с родительским термином, связь с дочерним термином, термин, который используется вместо данного, аскрипторы, полные синонимы, коды УДК, коды классификатора ГРНТИ и др.

Заключение. На основе анализа стандартов и различных подходов к реализации тезаурусов принято решение об использовании схемы данных Zthes для создания тезауруса по информатике. В настоящий момент тезаурус реализован на трех языках (русском, казахском и английском) и содержит около 22 000 терминов. Использование тезауруса в электронных библиотеках наиболее эффективно при постоянной модернизации тезауруса, его интеграции в базу данных и соответствующем уровне тематической специализации. Если изначально тезаурус

урус использовался только для навигации по ресурсам библиотеки, классификации и рубрикации, то теперь он активно применяется в учебном процессе студентов ФИТ НГУ и может рассматриваться как самостоятельный словарь-справочник.

Список источников

1. Шокин Ю.И. Эволюция информационных систем: от Web-сайтов до систем управления информационными ресурсами / Ю.И. Шокин, А.М. Федотов, О.Л. Жижимов, О.А. Федотова // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 117-134.
2. Жижимов О.Л. Некоторые заметки об эволюции цифровых репозиториях традиционных библиотек к полнфункциональным электронным библиотекам / О.Л. Жижимов, Н.А. Мазов, А.М. Федотов // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. Территория новых возможностей, 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 55-63.
3. Шокин Ю.И. Поддержка и развитие распределенных информационно-вычислительных ресурсов в СО РАН / Ю.И. Шокин, А.М. Федотов // Вычислительные технологии. Вестн. КазНУ им. аль-Фараби. Серия: Математика, механика, информатика, 2004. – Т. 42. – Ч. 4. – № 3. – С. 324-334.
4. Федотов А.М. Технология создания корпоративных информационных систем учета трудов научных работников / А.М. Федотов, В.Б. Барахнин, О.Л. Жижимов, О.А. Федотова // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2011. – Т. 9. – № 2. – С. 31-41.
5. Федотова О.А. Требования к информационной модели электронной библиотеки по научному наследию / О.А. Федотова // Zbornik radova konferencije MIT 2013. – Beograd, 2014. – С. 141-149.
6. Федотов А.М. Модель информационной системы для поддержки научно-педагогической деятельности / А.М. Федотов, В.Б. Барахнин, О.Л. Жижимов, О.А. Федотова // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2014. – Т. 12. – Вып. 1. – С. 89-101.
7. Федотов А.М. Концептуальная модель научно-образовательной информационной системы / А.М. Федотов, М.Н. Абделиева, А.Т. Байдавлетов и др. // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2015. – Т. 13. – № 3. – С. 89-104.
8. Baranov A., Tussupov J., Fedotov A. et al. The creation of information model of digital library for supporting scientific and educational activity. information technology in industry, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 41-46.
9. Лукашевич Н.В. Тезаурусы в задачах информационного поиска. / Н.В. Лукашевич. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 512 с.
10. ISO 5964:1985. Documentation – Guidelines for the establishment and development of multilingual thesauri. Geneva: International Organization for Standardization, 1985.
11. ISO 2788:1986. Documentation – Guidelines for the establishment and development of monolingual thesauri. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 1986.
12. Masterman M. Semantic message detection for machine translation, using an interlingua. Proc. international conf. on machine translation, 1961, pp. 438-475.
13. Шрейдер Ю.А. О количественных характеристиках семантической информации / Ю.А. Шрейдер // НТИ: Сер. 2, 1963. – № 10. – С. 35-39.
14. ISO 25964-1:2011. Information and documentation – Thesauri and interoperability with other vocabularies – Part 1: Thesauri for information retrieval, 2011.
15. ГОСТ 7.25-2001. Тезаурус информационно-поисковый одноязычный. Правила разработки, структура, состав и форма представления (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу) / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2002.
16. ISO/IEC 13250:2003. Information technology – SGML Applications – Topic Maps, 2003.
17. Жижимов О.Л. Технологическая платформа массовой интеграции гетерогенных данных / О.Л. Жижимов, А.М. Федотов, Ю.И. Шокин // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии, 2013. – Т. 11. – № 1. – С. 24-41.

Барахнин Владимир Борисович. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. ORCID: 0000-0003-3299-0507, WOS: A-5856-2014, AuthorID: 10510, bar@ict.nsc.ru, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6.

Федотова Ольга Анатольевна. Младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, ORCID: 0000-0001-5012-2426, ResearcherID: I-9755-2018, of@ict.nsc.ru, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6.

Thesaurus for information technologies in the digital library of FRC ICT

Vladimir B. Barakhnin, Olga A. Fedotova

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Russia, Novosibirsk, *of@ict.nsc.ru*

Abstract. The article is devoted to the description of the thesaurus on information technologies developed within the framework of the target program for the development of information resources of the Department "Electronic Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences". The thesaurus is actively used in the educational process of NSU students, as well as for automatic communication of documents in the electronic library created and operated at the FRC ICT. To implement the thesaurus, the Zthes data scheme was chosen, the main advantage of which is its compliance with the Z39.50 network protocol model, which allows not only to work with its own local thesaurus, but also to connect, if necessary, thesauri located on the network. New elements have been added to the Zthes data schema by the developers. Currently, the thesaurus is implemented in three languages (Russian, Kazakh and English) and contains over 20,000 terms.

Keywords: information system, digital library, glossary, classification, information retrieval thesaurus, Z39.50, data schema, Zthes, metadata

References

1. Shokin Yu.I., Fedotov A.M., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A. Evolyutsiya informatsionnykh sistem: ot Web-saytov do sistem upravleniya informatsionnymi resursami [The evolution of information systems: from websites to information resource management systems]. Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2015, v. 13, no. 1, pp. 117-134.
2. Zhizhimov O.L., Mazov N.A., Fedotov A.M. Nekotoryye zametki ob evolyutsii tsifrovyykh repozitoriyev traditsionnykh bibliotek k polnofunktsional'nym elektronnykh bibliotekam [Some notes about evolution of digital repositories of traditional libraries to full-function electronic libraries]. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa. Territoriya novykh vozmozhnostey [Territory of new opportunities. Bulletin of Vladivostok State University of Economics and Service], 2010, v. 7, no. 3, pp. 55-63.
3. Shokin Yu.I., Fedotov A.M. Podderzhka i razvitiye raspredelennykh informatsionno-vychislitel'nykh resursov v SO RAN [Technologies for designing of distributed information systems to support research]. Vychislitel'nyye tekhnologii. (Sovmestnyy vypusk). Vestn. KazNU im. al'-Farabi. Seriya: Matematika, mekhanika, informatika [Computational technologies. Herald. KazNU named after. al-Farabi. Series: Mathematics, mechanics, computer science], 2004, v. 42, part 4, no. 3, pp. 324-334.
4. Fedotov A.M., Barakhnin V.B., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A. Tekhnologiya sozdaniya korporativnykh informatsionnykh sistem ucheta trudov nauchnykh rabotnikov [The technology of creation of corporate information systems for accounting resources, created by researchers]. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2011, v. 9, no. 2, pp. 31-41.
5. Fedotova O.A. Trebovaniya k informatsionnoy modeli elektronnoy biblioteki po nauchnomu naslediyu [Requirements for the information model of an electronic library on scientific heritage]. Zbornik radova konferencije MIT 2013. Beograd, 2014, pp. 141-149.
6. Fedotov A.M., Barakhnin V.B., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A. Model' informatsionnoy sistemy dlya podderzhki nauchno-pedagogicheskoy deyatel'nosti [Model of an information system to support scientific and pedagogical activities]. Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2014, v. 12, no. 1, pp. 89-101.
7. Fedotov A.M., Abdaliyeva M.N., Baydavletov A.T., Bapanov A.A., Sambetbayeva M.A., Fedotova O.A. Kontseptual'naya model' nauchno-obrazovatel'noy informatsionnoy sistemy [Conceptual model of scientific and educational information system]. Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2015, v. 13, no. 3, pp. 89-104.
8. Bapanov A., Tussupov J., Fedotov A. et al. The creation of information model of digital library for supporting scientific and educational activity. Information technology in industry, 2019, v. 7, no. 2, pp. 41-46.
9. Lukashevich N.V. Tezaurusy v zadachakh informatsionnogo poiska [Thesauruses in information retrieval problems]. M., Izd-vo MGU [Publishing house of MSU], 2011, 512 p.
10. ISO 5964:1985. Documentation – Guidelines for the establishment and development of multilingual thesauri. Geneva: International Organization for Standardization, 1985.

11. ISO 2788:1986. Documentation – Guidelines for the establishment and development of monolingual thesauri. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 1986.
12. Masterman M. Semantic message detection for machine translation, using an interlingua. Proc. international conf. on machine translation, 1961, pp. 438-475.
13. Shreyder YU.A. O kolichestvennykh kharakteristikakh semanticheskoy informatsii [On the quantitative characteristics of semantic information]. NTI: Ser. 2, 1963, no. 10, pp. 35-39.
14. ISO 25964-1:2011. Information and documentation – Thesauri and interoperability with other vocabularies – Part 1: Thesauri for information retrieval, 2011.
15. GOST 7.25-2001. Tezaurus informatsionno-poiskovyy odnoyazychnyy. Pravila razrabotki, struktura, sostav i forma predstavleniya (Sistema standartov po informatsii, biblioteknomu i izdatel'skomu delu) / Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [Monolingual information retrieval thesaurus. Development rules, structure, composition and form of presentation (System of standards for information, library and publishing) / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification]. M., Standartinform, 2002.
16. ISO/IEC 13250:2003. Informatsionnyye tekhnologii. Primeneniye tipovogo obobshchennogo yazyka razmetki. Tematicheskiye plany [Information technology.SGML Applications. Topic Maps (SGML)], 2003.
17. Zhizhimov O.L., Fedotov A.M., Shokin Yu.I. Tekhnologicheskaya platforma massovoy integratsii geterogennykh dannykh [Technology platform for the mass integration of heterogeneous data]. Vestn. Novosib. gos. un-ta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2013, v. 11, no. 1, pp. 24-41.

Barakhnin Vladimir Borisovich. Doctor of technical sciences, leading researcher, Federal research center for information and computational technologies. ORCID: 0000-0003-3299-0507, WOS: A-5856-2014, AuthorID: 10510, bar@ict.nsc.ru, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Lavrentiev av., 6.

Fedotova Olga Anatolyevna. Junior researcher, Federal research center for information and computational technologies. ORCID: 0000-0001-5012-2426, ResearcherID: I-9755-2018, of@ict.nsc.ru, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Lavrentiev av., 6.

Статья поступила в редакцию 31.07.2023; одобрена после рецензирования 01.09.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 07/31/2023; approved after reviewing 09/01/2023; accepted for publication 09/18/2023.

Математические и информационные технологии в энергетике

УДК 620.9

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.006

Индикативный метод оценки энергетической безопасности регионов Республики Беларусь

Панасюк Василий Васильевич

Академия управления при Президенте Республики Беларусь,

Республика Беларусь, Минск, panasiukvasili@ya.ru

Аннотация. В статье рассмотрено применение индикативного метода оценки энергетической безопасности регионов Республики Беларусь, выполняется расчет интегрального показателя энергетической безопасности регионов с использованием индикативного подхода.

Ключевые слова: методика, энергетическая безопасность, регион, оценка, интегральный показатель, индикатор

Цитирование: Панасюк В.В. Индикативный метод оценки энергетической безопасности регионов Республики Беларусь / В.В. Панасюк // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 60-73. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.006.

Введение. Обеспечение энергетической безопасности относится к важному аспекту устойчивого социально-экономического развития общества, состояния окружающей среды и качества жизни граждан.

В Республике Беларусь до 2005 года для определения стратегии развития энергетической отрасли применялся метод приведенных затрат, который оценивал решения только с точки зрения экономической эффективности, без комплексной оценки состояния энергетической безопасности государства. В настоящее время стратегические показатели развития энергетики определены в утвержденной в 2015 году уже третьей редакции Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь на период до 2035 года (далее – Концепция).

В Концепции под энергетической безопасностью понимается защищенность граждан и экономики государства от угроз дефицита в энергии, нарушения бесперебойности энергоснабжения, а также эффективность конечного потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и экономическая устойчивость топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны [1].

Согласно Концепции, принятой в 2015 году, системой из 11-и индикаторов, которые объединены в 4 блока, оценивают состояние энергобезопасности Республики Беларусь.

Методология оценки состояния энергобезопасности заключается в сравнении «пороговых» значений индикаторов с их фактическими значениями по годам. Вместе с тем, следует отметить, что Концепция утратила стратегически мотивирующую функцию ввиду преждевременного достижения по некоторым показателям их плановых значений, отсутствия индикаторов оценки уровня цифровизации и экологического влияния предприятий энергетики, а также отсутствия индикаторов по оценке состояния энергобезопасности на региональном уровне.

1. Материалы исследования. Основополагающей предпосылкой устойчивого социально-экономического развития государства является обеспечение энергобезопасности не только страны в целом, но и ее регионов. В настоящее время проблема обеспечения энергетической безопасности регионов особо актуальна ввиду усиления воздействия угроз стабильному функционированию объектов ТЭК различного уровня. По результатам анализа литературных источников был сформирован набор показателей, существенно влияющих на состояние энергобезопасности регионов республики [2-4]. С учетом ранее выполненного

анализа значимости рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь [5] особое внимание обращено на показатели производственного, финансового и информационного характера (вызываемые использованием информационных технологий). Данные показатели объединены в блоки, указанные в Концепции, предусмотрев направления – «энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов, резервирования, переработки и распределения, а также энергетической эффективности их конечного потребления и экономической устойчивости топливно-энергетического комплекса Беларуси» [1]. С учетом огромного влияния энергетической отрасли на качество жизни граждан и состояние окружающей среды, предлагается дополнительно предусмотреть «социально-экологический» блок. Наполнение блоков соответствующими индикаторами представлено в таблице 1.

Таблица 1. Индикаторы энергобезопасности регионов Республики Беларусь

Блок	Индикатор
Б1. Энергетическая самостоятельность	Производственные индикаторы
	И1. Доля располагаемой мощности самого крупного источника электроэнергии в максимальной электрической нагрузке за год
	И2. Доля располагаемой мощности самого крупного генератора электростанции в максимальной электрической нагрузке года
	И3. Доля собственной выработки в электропотреблении региона
	И4. Доля предприятий ТЭК в общем объеме производства продукции региона за год
	Финансовые индикаторы
	И5. Доля расходов на приобретение энергетических ресурсов в объеме ВРП региона
	И6. Коэффициент платежеспособности текущей ликвидности предприятий ТЭК
	Информационные индикаторы
	И7. Отношение отечественных производителей цифровых решений к импортным
Б2. Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов	Производственные индикаторы
	И8. Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР
	И9. Доля доминирующего энергоресурса (газа) в производстве тепловой и электрической энергии в общем потреблении газа
	Финансовые индикаторы
	И10. Доля расходов предприятий ТЭК на приобретение доминирующего вида топлива(газа).
	Информационные индикаторы
	И11. Коэффициент дифференциации поставщиков цифровых решений
Б3. Надежность поставок, резервирование, переработка и	Производственные индикаторы
	И12. Индекс средней частоты отключений по региональной энергосистеме (SAIFI)
	И13. Коэффициент резервирования
	И14. Доля средних потерь при передаче и распределении энергии

распределение ТЭР	Финансовые индикаторы
	И15. Удельный вес накопленной амортизации в первичной стоимости основных средств ТЭК
	Информационные индикаторы
	И16. Доля энергоисточников ТЭК региона, интегрированных в региональную АСКУЭ
	И17. Доля промышленных потребителей с присоединенной мощностью 750 кВА и выше, интегрированных в АСКУЭ
	И18. Доля генераторов энергоисточников региона, оснащенных АСУ ТП
Б4. Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК	Производственные индикаторы
	И19. Коэффициент использования установленной мощности электростанций региона
	И20. Средние удельные расходы условного топлива на МВт произведенной энергии (т.у.т./МВт)
	Финансовые индикаторы
	И21. Энергоемкость ВРП региона, (кг усл.топл./млн.руб.)
	И22. Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами предприятий ТЭК
	И23. Рентабельность продаж предприятий ТЭК (Облэнерго)
	И24. Коэффициент выручки от выработки электроэнергии (ЭЭ) и отпуска тепловой энергии (ТЭ) на МВт установленной мощности (без покупной ЭЭ)
	Информационные индикаторы
	И25. Доля экономии ТЭР при внедрении информационных технологий (АСУ) в общем годовом объеме экономии ТЭР предприятий ТЭК (Облэнерго), %
Б5. Социально- экологический блок	Производственные индикаторы
	И26. Выбросы загрязняющих веществ от сжигания топлива на производство ТЭ и ЭЭ на душу населения (кг/чел)
	И27. Конечное потребление электроэнергии на душу населения (кВт*ч/тыс.чел)
	Финансовые индикаторы
	И28. Доля расходов на ЭЭ и топливо в общем объеме потребительских расходов домашних хозяйств, %
	И29. Совокупные расходы на охрану окружающей среды (руб./чел.)
	Информационные индикаторы
	И30. Доля бытовых потребителей региона, интегрированных в АСКУЭ

2. Методология расчета интегрального показателя энергетической безопасности региона. Во многих странах уделяется особое внимание комплексной оценке энергетической безопасности [6]. В последнее время, при оценке сложных систем, которым характерно разнообразие состояний, свойств, параметров, взаимосвязей, – используются интегральные индексы, характеризующие состояние развития системы [7-10]. При этом, наличие неудовлетворительного значения одного индикатора или области оценки системы компенсируются значениями других индикаторов и областей, что в итоге повлияет на

конечное значение интегрального индекса. Данный подход может быть применен при оценке энергобезопасности системы одним комплексным показателем. В результате применения отобранных показателей, – значение разработанного интегрального показателя позволит комплексно с разных сторон описать энергосистему. Данный подход предлагается применить для оценки энергобезопасности регионов страны.

При изучении методологии многокритериального анализа можно сделать выводы, что с его помощью принимаются многие управленческие решения экономического характера основываясь на современных методах (МКАР; Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) с возможностью применения к временному ряду состояний развивающейся системы [11-19]. Оценка энергобезопасности регионов страны представляется задачей анализа систем, для которых характерны многие факторы, критерии или индикаторы. Развитие состояния систем будет происходить при изменении этих индикаторов во времени, тем самым мы будем наблюдать изменения состояния энергобезопасности регионов страны.

В целях реализации задачи оценки энергобезопасности регионов с применением методов МКАР, используя многофакторную теорию ценности, необходимо осуществить определенную процедуру, основой которой является построение по иерархическому принципу дерева целей, а применительно к задаче оценки энергобезопасности – дерево индикаторов, которое изображено на рисунке 1.

Дерево индикаторов/целей структурно выстраивает по иерархическому принципу заданную многокритериальную задачу. На рисунке 1 общая оценка энергобезопасности регионов является наивысшим уровнем иерархии. Количество специфических областей (блоков), равное 5, является следующим уровнем иерархии, по которому производится общая оценка. Набор индикаторов исполнен в натуральных единицах выражения, количество которых в первой области равно 7, во второй области – 4, в третьей – 7, в четвертой – 7 и в пятой – 5.

Показатели системы в различных натуральных единицах для рассматриваемых моментов времени и являются индикаторами системы, которые на следующем этапе процедуры, согласно многофакторной теории ценности, необходимо перевести в безразмерную шкалу единого интервала, например, [0 - 1], с применением однофакторных функций ценности для каждого индикатора $V_j(x_j)$. Эти функции далее будут представлять тот или иной индикатор. Следующим этапом после преобразования в безразмерную шкалу индикаторов, однофакторные функции ценности должны позволить ответить на вопрос, что положительно сказывается на исследуемой системе при изменении конкретного индикатора: увеличение или уменьшение величины индикатора. В зависимости результата влияния используются возрастающие, в первом случае, (увеличение индикатора благоприятно для системы) или убывающие, во втором случае, однофакторные функции ценности [20].

При расчете интегрального индикатора для свертывания однофакторных функций ценности наиболее важным этапом является определение весовых коэффициентов. Существуют различные методы их определения, к которым относятся: прямой метод; методы ранжирования, рейтинга, парных сравнений и т.д.

3. Расчет интегрального показателя энергетической безопасности регионов Республики Беларусь. В целях демонстрации предлагаемого подхода по оценке энергетической безопасности регионов приведем результаты расчета интегральных индикаторов регионов и индикаторов по областям их оценки для системы индикаторов, предложенной в ранее указанной таблице 1 за период 2018 – 2020 гг. В таблице 2 приведены характеристики, которые необходимы для расчета.

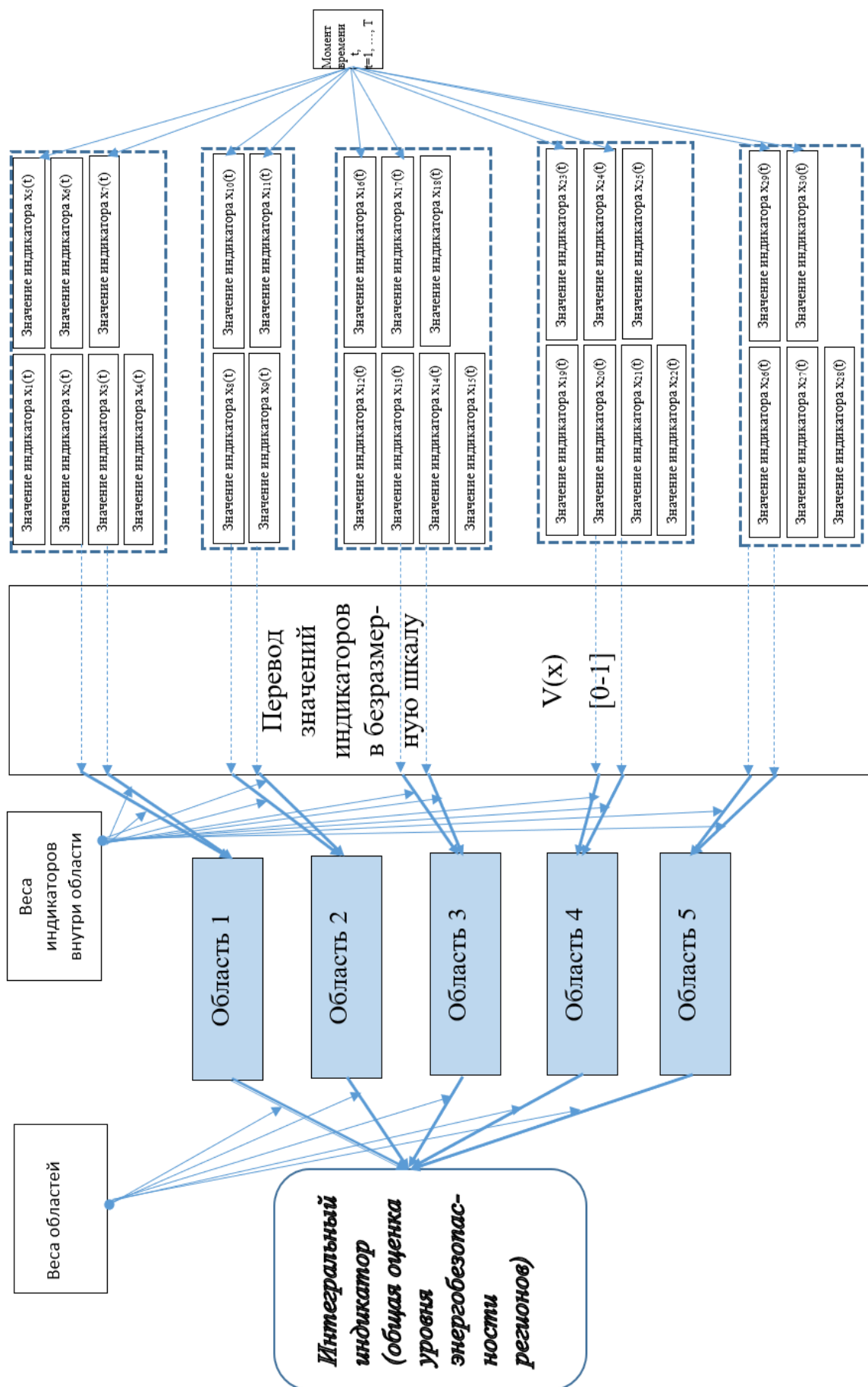


Рис. 1. Дерево целей/индикаторов энергетической безопасности регионов Республики Беларусь

Таблица 2. Характеристики расчета интегральных индексов регионов

Блок	Вес блока	Индикатор	Вес индикатора в блоке	Вес индикатора	Минимум	Максимум	Функция ценности индикатора
Б1. Энергетическая самостоятельность	0,2	Производственные индикаторы					
		И1. Доля располагаемой мощности самого крупного источника электроэнергии в максимальной электрической нагрузке за год	0,143	0,029	0,38	4,853	восходящая
		И2. Доля располагаемой мощности самого крупного генератора электростанции в максимальной электрической нагрузке года	0,143	0,029	0,09	0,805	восходящая
		И3. Доля собственной выработки в электропотреблении региона за год	0,143	0,029	0,37	3,22	восходящая
		И4. Доля предприятий ТЭК в общем объеме производства продукции региона за год	0,143	0,029	0,02	0,11845	восходящая
		Финансовые индикатор					
		И5. Доля расходов на приобретение энергетических ресурсов в объеме ВРП региона	0,143	0,029	0,05	0,2254	нисходящая
		И6. Коэффициент платежеспособности текущей ликвидности предприятий ТЭК	0,143	0,029	0,89	2,6105	восходящая
		Информационные индикатор					
		И7. Отношение отечественных производителей цифровых решений к импортным	0,143	0,029	0,28	2,461	восходящая
Б2. Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов	0,2	Производственные индикатор					
		И8. Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР	0,25	0,050	0,33	1,1155	нисходящая
		И9. Доля доминирующего энергоресурса-газа в производстве тепловой и электрической энергии в общем потреблении газа	0,25	0,050	0,36	1,0465	нисходящая
		Финансовые индикаторы					
		И10. Доля расходов предприятий ТЭК на приобретение доминирующего вида топлива(газа).	0,25	0,050	0,17	0,736	нисходящая
		Информационные индикаторы					
		И11. Коэффициент дифференциации поставщиков цифровых решений	0,25	0,050	0,05	1,15	восходящая

Б3. Надежность поставок, резервирование, переработка и распределение ТЭР	0,2	Производственные индикаторы					
		И12. Индекс средней частоты отключений по региональной энергосистеме (SAIFI)	0,143	0,029	0,46	1,4835	нисходящая
		И13. Коэффициент резервирования	0,143	0,029	0,48	6,601	восходящая
		И14. Доля средних потерь при передаче и распределении энергии	0,143	0,029	0,06	0,506	нисходящая
		Финансовые индикаторы					
		И15. Удельный вес накопленной амортизации в первичной стоимости основных средств ТЭК	0,143	0,029	0,36	0,6325	восходящая
		Информационные индикаторы					
		И16. Доля энергоисточников ТЭК региона, интегрированных в региональную АСКУЭ	0,143	0,029	0,10	0,299	восходящая
		И17. Доля промышленных потребителей с присоединенной мощностью 750 кВА и выше, интегрированных в АСКУЭ	0,143	0,029	0,48	1,058	восходящая
И18. Доля генераторов энергоисточников региона, оснащенных АСУ ТП	0,143	0,029	0,31	0,989	восходящая		
Б4. Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК	0,2	Производственные индикаторы					
		И19. Коэффициент использования установленной мощности электростанций региона	0,143	0,029	0,25	0,6785	восходящая
		И20. Средние удельные расходы условного топлива на Мвт произведенной энергии (т.у.т./МВт)	0,143	0,029	0,19	0,79465	нисходящая
		Финансовые индикаторы					
		И21. Энергоемкость ВРП региона, (кг усл.топл./млн.руб.)	0,143	0,029	176,46	592,365	нисходящая
		И22. Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами предприятий ТЭК	0,143	0,029	0,04	0,644	восходящая
		И23. Рентабельность продаж предприятий ТЭК (Облэнерго)	0,143	0,029	0,00	18,4	восходящая
		И24. Коэффициент выручки от выработки ЭЭ и отпуска ТЭ на МВт установленной мощности (без покупной электроэнергии)	0,143	0,029	0,41	1,84	восходящая
		Информационные индикаторы					
И25. Доля экономии ТЭР при внедрении информационных технологий (АСУ) в общем годовом объеме экономии ТЭР	0,143	0,029	0,94	30,245	восходящая		

		предприятий ТЭК (Облэнерго), %					
Б5. Социально-экологический блок	0,2	Производственные индикаторы					
		И26. Выбросы загрязняющих веществ от сжигания топлива на производство ТЭ и ЭЭ на душу населения (кг/чел)	0,2	0,040	4,85	35,42	нисходящая
		И27. Конечное потребление электроэнергии на душу населения (кВт*ч/тыс.чел)	0,2	0,040	1075,25	5686,75	восходящая
		Финансовые индикаторы					
		И28. Доля расходов на Э/Э и топливо в общем объеме потребительских расходов домашних хозяйств, %	0,2	0,040	2,04	3,565	нисходящая
		И29. Совокупные расходы на охрану окружающей среды (руб./чел.)	0,2	0,040	51,51	226,435	восходящая
		Информационные индикаторы					
		И30. Доля бытовых потребителей региона, интегрированных в АСКУЭ.	0,2	0,040	0,09	0,5405	восходящая

Источниками данных для расчета индикаторов за период 2018-2020 гг. являлась информация, полученная в Национальном статистическом комитете Республики Беларусь и в ГПО «Белэнерго», отчетная информация республиканских унитарных предприятий РУП Облэнерго (областных региональных энергосистем), опубликованная на их сайтах. При выполнении расчетов, как допущение, применялись одинаковые веса как для индикаторов внутри каждой области, так и для самих областей оценки. Суммарное значение всех удельных весов индикаторов равно единице. Минимальные и максимальные значения индикаторов определялись с помощью коэффициентов вариации и стандартных отклонений. Для расчета использовались в качестве однофакторных функций ценности линейные функции восходящего или нисходящего характера в зависимости от смысла конкретного индикатора. Интегральные показатели региона и областей их оценки принимают измерение от 0 до 1, при этом более высокое значение индекса характеризует более высокий уровень состояния энергобезопасности региона в целом или составляющей области (блока) его оценки.

Предложенная система индексов по оценке энергобезопасности регионов – это совокупность интегральных показателей, которые позволяют определить в динамике уровень энергобезопасности региона или области его оценки, а также сравнить с другими регионами страны.

Результаты расчета интегральных индикаторов регионов показаны на диаграммах (рисунки 2-7). Из диаграмм видно, что в диапазоне изменения значений индикаторов на основе фактических данных 2018-2020 гг., в большинстве регионов страны в целом энергобезопасность имеет положительные тенденции.

Так, из рисунка 2 видно, что энергобезопасность Брестского региона за рассматриваемый период выросла на 10% прежде всего за счет 3-го блока индикаторов, характеризующих надежность поставок, резервирование, переработку и распределение ТЭР.

Из рисунка 3 видно, что Витебская область имеет незначительное снижение уровня энергобезопасности за счет негативного влияния 3-го блока показателей, отвечающих за надежность поставок, резервирование, переработку и распределение ТЭР.



Рис. 2. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Брестской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.

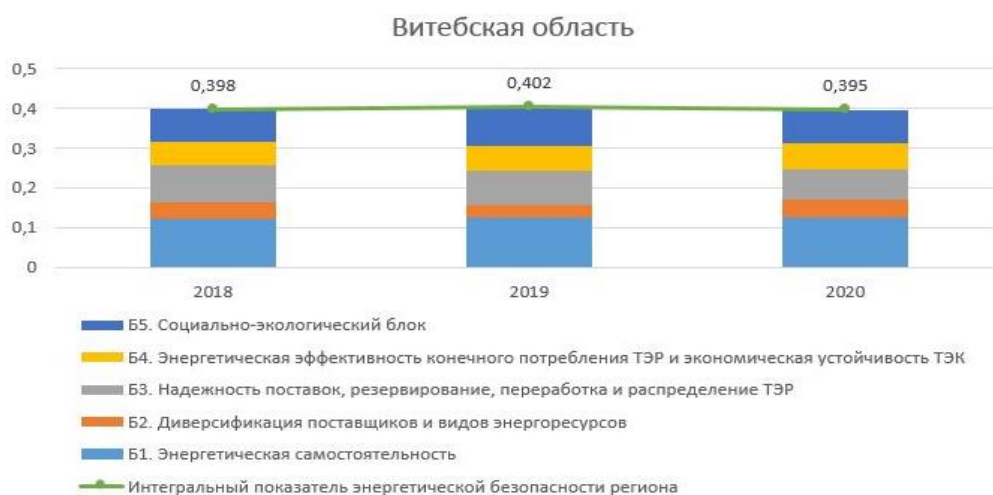


Рис. 3. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Витебской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.



Рис. 4. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Гомельской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.

При этом значение интегрального показателя региона находится на приемлемом среднем уровне прежде всего за счет компенсирующего воздействия индикаторов 2-го и 4-го блоков,

характеризующих дифференциацию поставщиков и видов энергоресурсов и энергетическую эффективность конечного потребления ТЭР и экономическую устойчивость ТЭК.

Как видно из рисунка 4, Гомельская область демонстрирует самый высокий рост уровня энергобезопасности как по блокам оценки, так и по региону в целом, достигнув самого высокого абсолютного значения интегрального показателя среди регионов, равного 0,523, что соответствует среднему уровню энергобезопасности.

На рисунке 5 показано, что Гродненская область также имеет положительную динамику интегрального индекса, вместе с тем наблюдается снижение индикаторов 4-го блока, характеризующих энергетическую эффективность конечного потребления ТЭР и экономическую устойчивость ТЭК.



Рис. 5. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Гродненской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.

Как видно из рисунка 6, в Минской области незначительный рост уровня энергобезопасности прежде всего обусловлен снижением индикаторов 1-го блока, характеризующих энергетическую самостоятельность региона.



Рис. 6. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Минской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.

На рисунке 7 показано, что в Могилевской области, по аналогии с Гомельской областью, наблюдается пропорциональный рост уровня энергобезопасности, как по блокам оценки, так и по региону в целом.



Рис. 7. Динамика изменения интегрального показателя энергетической безопасности Могилевской области Республики Беларусь в 2018-2020 гг.

Заключение. Анализ проведенных расчетов показывает, что состояние энергобезопасности регионов может достичь более высокого уровня при условии повышения в регионах некоторых индикаторов областей (блоков) оценки. Так, в Брестской области необходимо обратить особое внимание на индикатор социально-экологического блока «И.26. Выбросы загрязняющих веществ от сжигания топлива на производство ТЭ и ЭЭ на душу населения». Витебскому региону необходимо продолжить вывод из эксплуатации стареющих мощностей конденсационных энергоблоков и модернизацию энергооборудования Лукомльской ГРЭС для улучшения индикатора «И.14. Доля средних потерь при передаче и распределении энергии». Несмотря на приемлемый средний уровень энергобезопасности Гродненского региона, областной энергосистеме необходимо обратить внимание на вопросы режимного характера по загрузке собственных генерирующих мощностей с учетом ввода Белорусской АЭС, тем самым улучшить индикатор «И.20. Средние удельные расходы условного топлива на Мвт произведенной энергии». В Могилевском регионе необходимо усилить внимание к индикатору финансового характера «И.23. Рентабельность продаж предприятий ТЭК (Облэнерго)», который значительно ниже, чем в других областных энергосистемах.

При разработке новой редакции Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь предлагается:

- наряду с энергобезопасностью страны рассматривать энергобезопасность регионов;
- дополнить систему индикаторов показателями социально-экологической направленности энергобезопасности, а также индикаторами, характеризующими уровень цифровизации предприятий энергетики;
- для оценки энергетической безопасности регионов Республики Беларусь целесообразно применять индикативный метод по определению интегрального индикатора и его составляющих – отдельных блоков системы.

Список источников

1. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.12.2015 г. – № 1084.
2. Кононов Ю.Д. Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. – № 2(26). – С. 97-103.
3. Кононов Ю.Д. Особенности учета состояния энергетической безопасности при многокритериальной оценке вариантов развития топливно-энергетического комплекса / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2022. – Т.18. – Вып.5. – С. 977-990.
4. Владимиров Я.А. Энергетическая безопасность региона как элемент устойчивого развития. / Я.А. Владимиров, О.В. Новикова, Л.В. Корякина // Региональная экономика: теория и практика. – Т. 20. – Вып.1. – С.49-73.
5. Зорина Т.Г. Типологизация и анализ значимости рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь с учетом интеграции Белорусской АЭС в энергосистему / Т.Г. Зорина, В.В. Панасюк, С.Г. Прусов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, 2022. – № 5 (65). – С. 385-397.
6. Кононов Ю.Д. Анализ зарубежного опыта комплексной оценки состояния энергетической безопасности. / Ю.Д. Кононов // Энергетическая политика, 2018. – Вып. 6. – С. 98-107.
7. Попов Б.И. Многокритериальный анализ решений как метод оценки уровня энергетической безопасности Республики Беларусь / Б.И. Попов, Т.Г. Зорина, О.А. Любчик // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь - состояние и перспективы: сб. ст. Междунар. научн. конф., Минск, 1-2 окт. 2020 г. – С.287-295.
8. Зорина Т.Г. Устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь: теория, методология, экономический механизм: диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук /Зорина Татьяна Геннадьевна: Белорусский государственный экономический университет. – Минск, 2016. – 476 с.
9. World energy trilemma index. 2019. World energy council in partnership with Oliver Wyman.
10. Иоселиани А.Н. Методы оптимизации параметров теплообменных аппаратов АЭС. / А.Н. Иоселиани, А.А. Михалевич, В.Б. Нестеренко, М.Е. Салуквадзе. – Минск.: Наука и техника., 1981. – 144 с.
11. Carver S.J. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. Intern. Journ. of Geographical Information Systems, 1991, vol. 5 (3), pp. 321-339.
12. Chakhar S., Martel J.-M. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. Journ. of Geographic Information and Decision Analysis, 2003, vol. 7 (2), pp. 47-71.
13. Densham P.J., Goodchild M.F. Spatial decision support systems: a research agenda. Proc. of GIS/LIS'89/ Orlando, FL, 1989, pp. 706-716.
14. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. Intern. Journ. of Geographical Information Systems, 1995, no. 9, pp. 251-273.
15. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning, 2004, no. 62, pp. 3-65.
16. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. Intern. Journ. of Geographical information science, 2006, vol. 20 (7), pp. 703-726.
17. Malczewski J. GIS and multicriteria decision analysis. NY, Wiley & Sons Publ, 1999, 392 p.
18. Rinner C. Web-based spatial decision support: status and research directions. Journ. of Geographic information and decision analysis, 2003, vol. 7 (1), pp. 14-31.
19. Yatsalo B., Kiker G., Kim J. [et al.] Application of multi-criteria decision analysis tools for management of contaminated sediments. Integrated environmental assessment and management, 2007, vol. 3 (2), pp. 223-233.
20. Зорина Т.Г. Индикативный подход к оценке энергетической безопасности Республики Беларусь. / Т.Г. Зорина., Б.И. Попов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 2 (18). – С. 107-123.

Панасюк Василий Васильевич. Соискатель кафедры «Экономического развития и менеджмента» Академии управления при Президенте Республики Беларусь. Депутат, заместитель председателя Постоянной комиссии Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь по промышленности, топливно-энергетическому комплексу, транспорту и связи. Направление исследований: формирование региональной политики энергетической безопасности Республики Беларусь. ORCID: 0000-0002-7852-4432, panasiukvasili@yandex.ru.

Indicative method for assessing the energy security of the regions of the Republic of Belarus

Vasiliy V. Panasyuk

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus,

Minsk, the Republic of Belarus, *panasiukvasili@ya.ru*

Abstract. The article considers the application of the indicative method for assessing the energy security of the regions of the Republic of Belarus, calculates the integral indicator of the energy security of the regions using the indicative approach.

Keywords: methodology, energy security, region, assessment, integral indicator, indicator

References

1. Kontseptsiya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus', utverzhennaya postanovleniyem Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23.12.2015 g. no. 1084 [The concept of energy security of the Republic of Belarus, approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 23.12.2015. No. 1084.]
2. Kononov Y.D., Kononov D.Y. Zavisimost' sostava i znachimosti indikatorov energeticheskoy bezopasnosti ot tseley prognoza i rassmatrivayemoy perspektivy [Dependence of the composition and significance of energy security indicators on the objectives of the forecast and the perspective under consideration]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 2(26), pp. 97-103.
3. Kononov Yu.D., Kononov D.Y. Osobennosti ucheta sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti pri mnogokriterial'noy otsenke variantov razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa [Features of accounting for the state of energy security in a multi-criteria assessment of options for the development of the fuel and energy complex]. *Natsional'nyye interesy: priority i bezopasnost'* [National interests: priorities and security], 2022, vol. 18, iss. 5, pp. 977-990.
4. Vladimirov Y.A., Novikova O.V., Koryakina L.V. Energeticheskaya bezopasnost' regiona kak element ustoychivogo razvitiya [Energy security of the region as an element of sustainable development]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* [Regional Economics: Theory and Practice], vol. 20, issue. 1, pp. 9-73.
5. Zorina T.G., Panasyuk V.V., Prusov S.G. Tipologizatsiya i analiz znachimosti riskov i ugroz energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' s uchetom integratsii Belorusskoy AES v energosistemu [Typology and analysis of the significance of risks and threats to energy security of the Republic of Belarus taking into account the integration of the Belarusian NPP into the energy system]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2022, no. 5 (65), pp. 385-397.
6. Kononov Yu.D. Analiz zarubezhnogo opyta kompleksnoy otsenki sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti [Analysis of foreign experience of a comprehensive assessment of the state of energy security]. *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2018, issue 6, pp. 98-107.
7. Popov B.I., Zorina T.G., Lyubchik O.A. Mnogokriterial'nyy analiz resheniy kak metod otsenki urovnya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' [Multicriteria analysis of solutions as a method for assessing the level of energy security of the Republic of Belarus]. *Ustoychivoye razvitiye energetiki Respubliki Belarus' - sostoyaniye i perspektivy: sb. st. Mezhdunar. nauchn. konf., Minsk, 1-2 okt.* [Sustainable development of the energy of the Republic of Belarus - state and prospects. Scientific. Conf., Minsk, October 1-2], 2020, pp. 287-295.
8. Zorina T.G. Ustoychivoye energeticheskoye razvitiye Respubliki Belarus': teoriya, metodologiya, ekonomicheskiy mekhanizm [Sustainable energy development of the Republic of Belarus: theory, methodology, economic mechanism]. *Dissertatsiya na soiskaniye stepeni doktora ekonomicheskikh nauk. Minsk* [Dissertation for the degree of Doctor of Economic Sciences. Minsk], 2016, 476 p.
9. World energy trilemma index. 2019. World energy council in partnership with Oliver Wyman.
10. Ioseliani A.N., Mikhalevich A.A., Nesterenko V.B., Salukvadze M.E. Metody optimizatsii parametrov teploobmennyykh apparatov AES [Methods for optimizing the parameters of NPP heat exchangers]. *Minsk. Nauka i tekhnika* [Minsk. Science and technology], 1981, 144 p.
11. Carver S.J. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. *Intern. Journ. of Geographical Information Systems*, 1991, vol. 5 (3), pp. 321-339.

12. Chakhar S., Martel J.-M. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journ. of Geographic Information and Decision Analysis*, 2003, vol. 7 (2), pp. 47-71.
13. Densham P.J., Goodchild M.F. Spatial decision support systems: a research agenda. *Proc. of GIS/LIS'89/ Orlando, FL*, 1989, pp. 706-716.
14. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. *Intern. Journ. of Geographical Information Systems*, 1995, no. 9, pp. 251-273.
15. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 2004, no. 62, pp. 3-65.
16. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *Intern. Journ. of Geographical information science*, 2006, vol. 20 (7), pp. 703-726.
17. Malczewski J. GIS and multicriteria decision analysis. NY, Wiley & Sons Publ, 1999, 392 p.
18. Rinner C. Web-based spatial decision support: status and research directions. *Journ. of geographic information and decision analysis*, 2003, vol. 7 (1), pp. 14-31.
19. Yatsalo B., Kiker G., Kim J. [et al.] Application of multi-criteria decision analysis tools for management of contaminated sediments. *Integrated environmental assessment and management*, 2007, vol. 3 (2), pp. 223-233.
20. Zorina T.G., Popov B.I. Indikativnyy podkhod k otsenke energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' [Indicative approach to the assessment of energy security of the Republic of Belarus]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2 (18), 2020, pp. 107-123.

Panasyuk Vasiliy Vasilievich. *Competitor of the Department of "Economic Development and Management" of the Academy of Management under the President of the Republic of Belarus. Deputy, Deputy Chairman of the Permanent Commission of the House of Representatives of the National Assembly of the Republic of Belarus for industry, fuel and energy complex, transport and communications. Direction of research: formation of a regional energy security policy of the Republic of Belarus. ORCID: 0000-0002-7852-4432, panasiukvasili@yandex.ru.*

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; одобрена после рецензирования 15.08.2023; принята к публикации 17.08.2023.

The article was submitted 06/27/2023; approved after reviewing 08/15/2023; accepted for publication 08/17/2023.

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007

Моделирование автономной микросети

Еделев Алексей Владимирович¹, Карамов Дмитрий Николаевич²,

Башарина Ольга Юрьевна^{3,4}

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,

³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск, flower@isem.irk.ru,

⁴Уральский государственный экономический университет, Россия, Екатеринбург

Аннотация. Данная работа является первой из серии статей, посвященных применению разработанной технологии цифрового двойника сложной технической системы для исследования ее свойств. Одним из таких свойств является живучесть, под которой понимается свойство системы адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливать свое исходное состояние после их воздействия. В качестве сложных технических систем в статье рассматриваются автономные микросети. Исследование живучести этих энергетических комплексов локального уровня обычно строится на многовариантных вычислительных экспериментах, однако при существовании обратной связи цифрового двойника с микросетью или испытательным стендом можно также использовать натурные опыты. Ключевым компонентом цифрового двойника микросети должен быть комплекс разнообразных моделей, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения этого энергетического комплекса. В данной статье описывается оптимизационная модель микросети на основе концепции энергетического хаба. Энергетический хаб концентрирует производственные мощности по генерации, преобразованию и аккумулированию энергоресурсов, которые соединяются между собой и с потребителями с помощью сетей транспорта энергоресурсов. В статье представлена программная реализация оптимизационной модели микросети на основе концепции энергетического хаба. В заключении производится сравнение с принципиально близкой двухуровневой моделью энергетического комплекса города. Моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба обеспечивает более высокую вычислительную эффективность. С другой стороны, модель энергетического комплекса города более точно, чем представленная в данной статье модель микросети, отражает физические особенности некоторых процессов, например транспорта тепла и электроэнергии.

Ключевые слова: цифровой двойник, испытательный стенд, микросеть, живучесть, математическая модель, энергетический хаб

Цитирование: Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.

Введение. Автономные системы энергоснабжения являются разновидностью энергетических комплексов локального уровня (микросетей), в которых совместное использование возобновляемых источников энергии с традиционными энергетическими установками и накопителями электрической энергии является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей. Особую значимость и большое распространение возобновляемые источники энергии получили при электрификации труднодоступных территорий, не имеющих связи с традиционными топливно-энергетическими комплексами [1].

Изолированность автономных микросетей повышает значимость исследования их функционирования в следующих экстремальных условиях:

- природные бедствия, такие как ураганы, наводнения, землетрясения, резкие похолодания и т.д.;
- отказ элементов и подсистем вследствие износа, ошибок персонала и т.д.;
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие как кибератаки и т.д.

Способность противостоять вышеперечисленным крупным возмущениям, не допуская каскадного развития аварий с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей,

и восстанавливать исходное состояние или близкое к нему характеризует одно из свойств энергетических комплексов – живучесть [2].

Исследование живучести обычно строится на проведении крупномасштабных вычислительных экспериментов, в которых разыгрывается множество сценариев крупных возмущений. Для исследования живучести автономных микросетей вследствие их малого размера помимо вычислительных экспериментов также доступны натурные опыты на реальном оборудовании или на испытательных стендах, позволяющих моделировать функционирование микросетей в экстремальных условиях. Эти вопросы изучались в рамках научного проекта РФФИ и Правительства Иркутской области № 20-47-380002-р_а, который был посвящен разработке фундаментальных основ математического и информационного моделирования инфраструктурных объектов Байкальской природной территории, использующих природосберегающие технологии. В процессе выполнения проекта получены следующие основные методические результаты [3, 4]:

- разработана система мониторинга условий функционирования инфраструктурных объектов и их внешнего окружения, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, агрегирование, структурирование и анализ ретроспективных и текущих предметных данных большого объема;
- созданы модели, методы и инструментальные средства спецификации и моделирования процессов функционирования исследуемых объектов на основе многокритериальных методов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем в процессе проведения многовариантных расчетов;
- разработаны методы и инструментальные средства конструирования наборов цифровых двойников, представляющих различные подсистемы объекта, а также системы интеллектуальных агентов, которым делегируются права и обязанности субъектов, связанных с обеспечением эксплуатации объекта и потреблением предоставляемых им ресурсов и услуг;
- реализованы методы и средства микро-сервисного взаимодействия между цифровыми двойниками, а также двойниками и их конечными пользователями разных категорий.

Цифровой двойник используется для исследования свойств моделируемого инфраструктурного объекта. Инфраструктурным объектом в данной статье выступает автономная микросеть, соответственно, предметной областью является её живучесть, а решаемым классом задач – анализ уязвимости этих энергетических комплексов. Традиционно исследование живучести строится на разыгрывании сценариев крупных возмущений с применением математических моделей вследствие утверждения, что проведение необходимых натурных экспериментов на реальных энергетических комплексах недопустимо [2]. В настоящее время испытательные стенды позволяют разворачивать полноценные реалистичные схемы микросетей и имитировать воздействие на них крупных возмущений. Таким образом, цифровой двойник микросети, соединенный с испытательным стендом, может для разыгрывания заданного множества крупных возмущений использовать не только вычислительные эксперименты, но и натурные опыты. Главным преимуществом цифрового двойника по сравнению математической моделью является наличие обратной связи с объектом исследования, что позволяет в процессе эксперимента подстраивать управление микросетью в экстремальных условиях, исходя из разницы между прогнозируемыми (полученными в результате расчета на математической модели) и реальными значениями технологических параметров оборудования.

Согласно [5], в современной энергетике наибольшее распространение получили три основных типа цифровых двойников:

1. Двойник-прототип – виртуальный аналог реального объекта, содержащий информацию, которая представляет объект в целом на всех стадиях его жизненного цикла.
2. Двойник-экземпляр – содержит информацию по описанию оборудования объекта, то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
3. Агрегированный двойник – объединяет два вышеперечисленных типа.

Основным требованием к цифровому двойнику микросети в [6] определена его ориентация на моделирование всевозможных воздействий (не только физических), прогнозирование последствий таких воздействий, выработка мер по предотвращению их негативного техногенного влияния. Ключевым компонентом цифрового двойника микросети должен быть комплекс оптимизационных, имитационных, нейросетевых моделей, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения этого энергетического комплекса. Данная статья представляет оптимизационную модель, которая используется в двойнике-экземпляре для исследования живучести автономной микросети.

1. Математическая модель микросети. В целом в энергетических исследованиях применяется иерархический подход к моделированию, использующий принципы декомпозиции и агрегирования при формировании моделей энергетических систем на различных уровнях иерархии и взаимосвязей моделей разных уровней. Так, например, в модели энергетического комплекса современного города [7] выделяются два уровня иерархии: уровень централизованных систем энергоснабжения и уровень децентрализованно управляемых потребителей электро- и теплоэнергии. Формирование подобных моделей и расчёты на них в настоящее время могут осуществляться с помощью инструментария, представленного в [5, 8].

Сущность предлагаемого в данной работе подхода к моделированию автономных микросетей заключается в следующем: энергетический комплекс локального уровня состоит из произвольного числа взаимосвязанных компонентов (хабов) [9], в которых концентрируются производственные мощности по генерации, преобразованию и аккумулированию энергоресурсов [10-14]. Данный подход поддерживается специализированным инструментарием [15].

Концепция энергетического хаба позволяет детально учитывать факторы совместной работы накопителей электрической энергии в микросетях, влияющие как на техническую, так и экономическую эффективность использования тех или иных типов накопителей. В большей степени эти факторы касаются неравномерности генерации источниками, использующими энергию ветра и солнца в качестве первичных двигателей.

Накопители электрической энергии в микросетях, как правило, представлены разного рода аккумуляторными батареями. Накопители, в отличие от элементов генерации и трансформации электрической энергии, имеют определенный ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при моделировании микросетей. Исходя из условий их эксплуатации [16], к данным особенностям можно отнести внутренние процессы старения активной массы аккумуляторных батарей, включая расслоение электролита, разрушение положительного электрода, тяжелую/необратимую сульфацию, кристаллизацию и т.п.

Стохастическая составляющая при генерировании электрической энергии существенно сказывается на основных эксплуатационных показателях аккумуляторных батарей. Например, в автономных фотоэлектрических системах эксплуатация аккумуляторных батарей сопровождается процессами с ярко выраженным циклическим характером в течение суток.

1.1. Общая схема энергетического хаба. Большинство схем хабов может быть построено на базе пяти типов элементарных блоков: входы, входные накопители энергии, преобразователи энергии, выходные накопители энергии и выходы [14] (рис. 1).

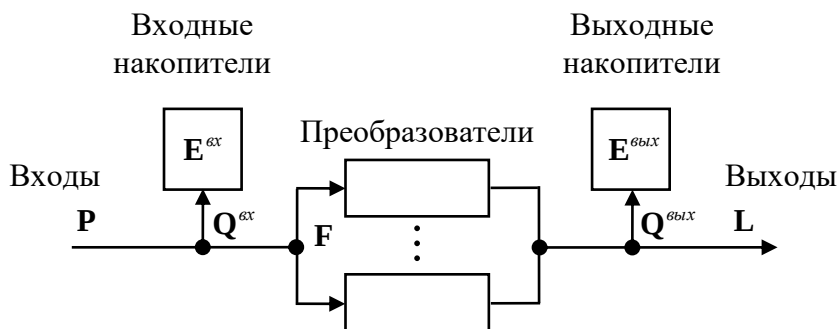


Рис. 1. Общая схема энергетического хаба

Согласно данной схеме моделирование потоков энергии в хабе от его входов P к его выходам L происходит в несколько этапов. Сначала необходимо описать, как входные потоки разбиваются на потоки Q^{ex} -к входным накопителям с запасом энергии E^{ex} и потоки F к преобразователям энергии. Преобразователи могут конвертировать один вид энергии в несколько различных. Затем преобразованные потоки суммируются и вместе с потоками выходных накопителей Q^{ex} с запасом энергии E^{ex} , образуют выходные потоки [14].

Входные и выходные потоки. Пусть рассматриваемый интервал времени состоит из T периодов длительностью Δt , энергоресурсы представлены множеством K , а автономный энергетический комплекс представлен набором из взаимосвязанных хабов в количестве H .

Каждый хаб $h = \{1, \dots, H\}$ имеет множество входов M_h , множество выходов N_h , множество входных накопителей I_h^{in} , множество выходных накопителей I_h^{out} . Каждый элемент из множеств $M_h, N_h, I_h^{in}, I_h^{out}$ связан с одним определённым энергоресурсом $k \in K$. Также хаб h имеет набор преобразователей в количестве J_h .

Как показано на рис. 2, в хабе $h = \{1, \dots, H\}$ в период времени $t = \{1, \dots, T\}$ поток энергоресурса P_{hm}^t на входе $m \in M_h$ разделяется на поток Q_{hi}^t входного накопителя энергии $i \in I_h^{in}$ и потоки F_{hmj}^t к преобразователям $j = \{1, \dots, J_h\}$, связанным со входом $m \in M_h$

$$P_{hm}^t = \sum_{j \in \theta_h(m)} F_{hmj}^t + Q_{hi}^t, \quad (1)$$

$$F_{hmj}^t \leq \bar{F}_{hmj}^t, \quad (2)$$

где $\bar{F}_{hmj}^t$ – пропускная способность связи преобразователя j со входом m хаба h ; $\theta_h(m)$ – множество, содержащее преобразователи хаба h , связанные со входом m .

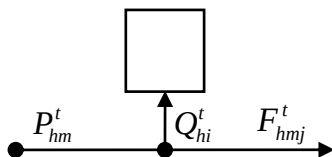


Рис. 2. Переток энергии в энергетическом хабе от входа к преобразователям

Образование потока энергоресурса L_{hn} на выходе $n \in N_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ показано на рис. 3. В период времени $t = \{1, \dots, T\}$ преобразователь энергии $j = \{1, \dots, J_h\}$ хаба h конвертирует поток F_{hmj}^t с коэффициентом преобразования η_{hmjn}^{con} и направляет его к выходу n . Принимая во внимание поток Q_{hi}^t выходного накопителя $i \in I_h^{out}$, поток L_{hn}^t на выходе $n \in N_h$ определяется как

$$L_{hn}^t = \sum_{m \in M_h} \sum_{j \in \theta_h(m,n)} \eta_{hmjn}^{con} F_{hmj}^t - Q_{hi}^t, \quad (3)$$

где $\theta_h(m, n)$ – множество преобразователей, посредством которых вход $m \in M_h$ соединяется с выходом n хаба h .

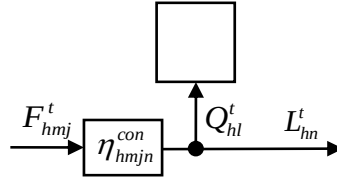


Рис. 3. Переток энергии в энергетическом хабе от преобразователей к выходу

Накопители энергии. В формулах (1) и (3) поток Q_{hi}^t накопителя $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ формируется потоками заряда $Q_{hi}^{chg,t}$ и разряда $Q_{hi}^{dis,t}$ в период $t = \{1, \dots, T\}$:

$$Q_{hi}^t = Q_{hi}^{chg,t} - Q_{hi}^{dis,t}. \quad (4)$$

Запас энергии E_{hi}^t в накопителе $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ на конец периода времени $t = \{1, \dots, T\}$ зависит от его емкости $\bar{E}_{hi}$, запаса E_{hi}^{t-1} на конец предыдущего периода $t - 1$, потоков заряда $Q_{hi}^{chg,t}$ и разряда $Q_{hi}^{dis,t}$ в период t :

$$E_{hi}^t = E_{hi}^{t-1} + (\eta_{hi}^{chg} Q_{hi}^{chg,t} - \frac{1}{\eta_{hi}^{dis}} Q_{hi}^{dis,t}) \Delta t, \quad (5)$$

$$0 \leq E_{hi}^t \leq \bar{E}_{hi}, \quad (6)$$

$$E_{hi}^0 = \bar{E}_{hi}, \quad (7)$$

где η_{hi}^{chg} – коэффициент эффективности зарядки накопителя i хаба h ; η_{hi}^{dis} – коэффициент эффективности разрядки накопителя i хаба h . Уравнение (7) предполагает, что перед началом работы ($t = 0$) все накопители содержат полный заряд.

Так как накопитель $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ в период $t = \{1, \dots, T\}$ может находиться только в состоянии заряда или разряда, то вводится дополнительная бинарная переменная $z_{hi}^t \in \{0, 1\}$ и уравнения, связанные с ней:

$$0 \leq Q_{hi}^{dis,t} \leq (1 - z_{hi}^t) \bar{Q}_{hi}^{dis}, \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{hi}^{chg,t} \leq z_{hi}^t \bar{Q}_{hi}^{chg}, \quad (9)$$

где $\bar{Q}_{hi}^{dis}$ – максимально возможное значение потока разряда накопителя i хаба h ; $\bar{Q}_{hi}^{chg}$ – максимально возможное значение потока заряда накопителя i хаба h . Если $z_{hi}^t = 0$, то согласно уравнению (8) накопитель i хаба h находится в состоянии разряда в период t . Если $z_{hi}^t = 1$, то согласно уравнению (9) накопитель i хаба h находится в состоянии заряда в период t .

Уравнения (6), (8), (9) задают технические ограничения на работу накопителя i в период t .

1.2. Сети транспорта энергоресурсов. Энергетические хабы соединяются между собой и с потребителями с помощью сетей транспорта энергоресурсов. Каждая сеть представляет собой граф $G_k = (V_k, E_k)$, где V_k – множество узлов, E_k – множество ориентированных дуг, k – энергоресурс из множества K . На граф G_k могут накладываться дополнительные ограничения, связанные с физическими законами перемещения энергоресурса k .

В сеть G_k может входить множество узлов $V_k^g \subset V_k$, которые представляют обособленные источники энергоресурса $k \in K$, не относящиеся ни к одному из H хабов. Например, в V_k^g могут быть выделены источники топлива.

Через $V_k^d \subset V_k$ обозначается множество узлов потребления энергоресурса $k \in K$. Остальные узлы из множества $V_k^o = V_k \setminus (V_k^g \cup V_k^d)$ называются промежуточными и служат местами пересечения потоков энергоресурса в сети транспорта. Каждый узел v сети G_k должен удовлетворять одному из условий баланса потоков энергоресурса $k \in K$ в период времени $t = \{1, \dots, T\}$:

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^g, \quad (10)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (11)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^o, \quad (12)$$

$$0 \leq u_{kv}^t \leq \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (13)$$

$$0 \leq f_{kvq}^t \leq \bar{f}_{kvq}, (v, q) \in E_k, \quad (14)$$

$$0 \leq g_{kv}^t \leq \bar{g}_{kv}^t, v \in V_k^g, \quad (15)$$

где $\Psi_k(v) \subseteq E_k$ – множество дуг, входящих в узел v ; $\Omega_k(v) \subseteq E_k$ – множество дуг, исходящих из узла v ; f_{kqv}^t – поток энергоресурса k по дуге $(q, v) \in E_k$ в период времени t ; g_{kv}^t – производство энергоресурса k в узле $v \in V_k^g$ в период времени t ; $\bar{d}_{kv}^t$ – потребность узла $v \in V_k^d$ в энергоресурсе k в период времени t ; u_{kv}^t – недопоставка энергоресурса k в узел $v \in V_k^d$ в период времени t ; a_{kqv} – коэффициент, характеризующий потери при транспорте энергоресурса k по дуге $(q, v) \in E_k$; $\bar{f}_{kvq}, (v, q) \in E_k$ – пропускная способность дуги $(q, v) \in E_k$.

Если учитывать энергетические хабы, соединённые с G_k в узле v , то уравнения (10)-(12) для периода времени $t = \{1, \dots, T\}$ запишутся как:

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, \quad v \in V_k^g, \quad (16)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, \quad v \in V_k^d, \quad (17)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, \quad v \in V_k^o, \quad (18)$$

где $\Lambda_k^d(v)$ – множество хабов, входы которых соединены с сетью G_k в узле v ; P_{hm}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h \in \Lambda_k^d(v)$ в период t ; $\Lambda_k^g(v)$ – множество хабов, выходы которых соединены с сетью G_k в узле v ; L_{hn}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на выход $n \in N_h$ хаба $h \in \Lambda_k^g(v)$ в период t .

1.3. Целевая функция. Целью оптимизации функционирования автономного энергетического комплекса является наиболее полное удовлетворение потребностей в энергоресурсах при минимальных затратах на эксплуатацию хабов и транспортных сетей на протяжении всех периодов времени $t = \{1, \dots, T\}$:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{h=1}^H \sum_{m \in M_h} C_{hk}^t P_{hm}^t + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V_k^d} y_{kv} u_{kv}^t + \sum_{k \in K} \sum_{(v,q) \in E_k} c_{kvq} f_{kvq}^t \right] \rightarrow \min, \quad (19)$$

где C_{hk}^t – цена на энергоресурс $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ в период t ; P_{hm}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ в период t ; y_{kv} – штраф за недопоставку энергоресурса $k \in K$ в узел $v \in V_k^d$ в период t ; c_{kvq} – удельная стоимость транспорта энергоресурса $k \in K$ по дуге $(v, q) \in E_k$; f_{kqv}^t – поток энергоресурса $k \in K$ по дуге $(q, v) \in E_k$ в период t .

Ограничениями для целевой функции (19) выступают уравнения (1)-(9), (13)-(18).

2. Описание конфигурации микросети. Конструирование цифрового двойника реальной микросети [17, 18] невозможно без её спецификации или описания конфигурации этого энергетического комплекса. В целом, понятие конфигурации энергетического комплекса в литературе трактуется весьма широко. В рамках научного проекта РФФИ и Правительства Иркутской области № 20-47-380002-р_а конфигурацией был назван определённый вариант инфраструктуры энергетического комплекса, которая включает в себя перечень объектов энергетики, входящих в состав комплекса, а также список природно-климатических, социальных, экономических и прочих параметров энергетических технологий, применяемых на этих объектах. Например, для детального моделирования возобновляемых источников энергии требуется подробная природно-климатическая информация. К ней относятся температура воздуха,

атмосферное давление, влажность, плотность, солнечная радиация, скорость и направление ветра, а также некоторые другие метеорологические показатели [19, 20].

Математическая постановка (1)-(9), (13)-(19) предоставляет достаточный набор элементов для описания возможных конфигураций микросети:

- узлы сетей транспорта: источники и потребители энергоресурсов, промежуточные узлы;
- дуги сетей транспорта;
- преобразователи;
- накопители энергии (хранилища энергоресурсов).

Таким образом, описание конфигурации микросети в виде набора из H взаимодействующих энергетических хабов состоит из двух частей. Первая часть описывает инфраструктуру передачи энергоресурсов $k \in K$ в виде множества узлов V_k и дуг E_k транспортных сетей G_k . Вторая часть описывает инфраструктуру генерации, преобразования и аккумуляции энергоресурсов в виде информации о входах, входных накопителях, преобразователях, выходных накопителях и выходах каждого из H энергетических хабов. Данный способ спецификации энергетического комплекса достаточен для описания конфигураций автономных микросетей. Следует отметить, что в литературе представлены более сложные и универсальные способы спецификации микросетей на базе концепции энергетического хаба [10-13].

В рамках проекта № 20-47-380002-р_а были разработаны инфологическая и физическая модели данных для хранения конфигураций микросетей [21].

3. Программная реализация. После того, как описание конфигурации микросети считано из базы данных, оно трансформируется в вектора и матрицы согласно математической модели (1)-(9), (13)-(19). Этот шаг достаточно легко автоматизируется, так как каждому элементу конфигурации соответствует свой набор уравнений, описывающий функционирование этого элемента. Затем вектора и матрицы заполняются данными, характеризующими функционирование микросети на протяжении T периодов времени. В конце происходит расчёт потоков распределения энергоресурсов K в микросети. Этот шаг состоит из этапов предварительной оптимизации и решения задачи (1)-(9), (13)-(19).

Вышеописанные шаги реализованы в виде программного модуля, который использует один из пакетов математической оптимизации: GLPK [22], Clp [23], Cbc [24], CPLEX [25] и SoPlex [26]. Пакеты CPLEX и Cbc ориентированы на параллельные и распределённые вычисления. Алгоритм работы реализованного программного модуля показан на рис. 4.

Закключение. В качестве выводов можно выделить следующие основные отличия математической постановки (1)-(9), (13)-(19) от аналогичной модели городского энергетического комплекса, описанной в [7]:

- более низкий уровень территориальной иерархии рассматриваемых энергетических комплексов и меньшая на три порядка величина нагрузок на стороне потребителя;
- использование концепции энергетического хаба, жестко заданная структура которого позволяет достаточно просто автоматизировать перевод текстового описания конфигурации энергетического комплекса в целевые структуры данных конкретного пакета математической оптимизации;
- возможность оптимизации показателей функционирования автономного энергетического комплекса по данным типичного метеорологического года или заданного многолетнего периода метеорологических наблюдений [16,17,27];
- ориентация на более детализированное моделирование режимов работы возобновляемых источников энергии и аккумуляторов электроэнергии [1].

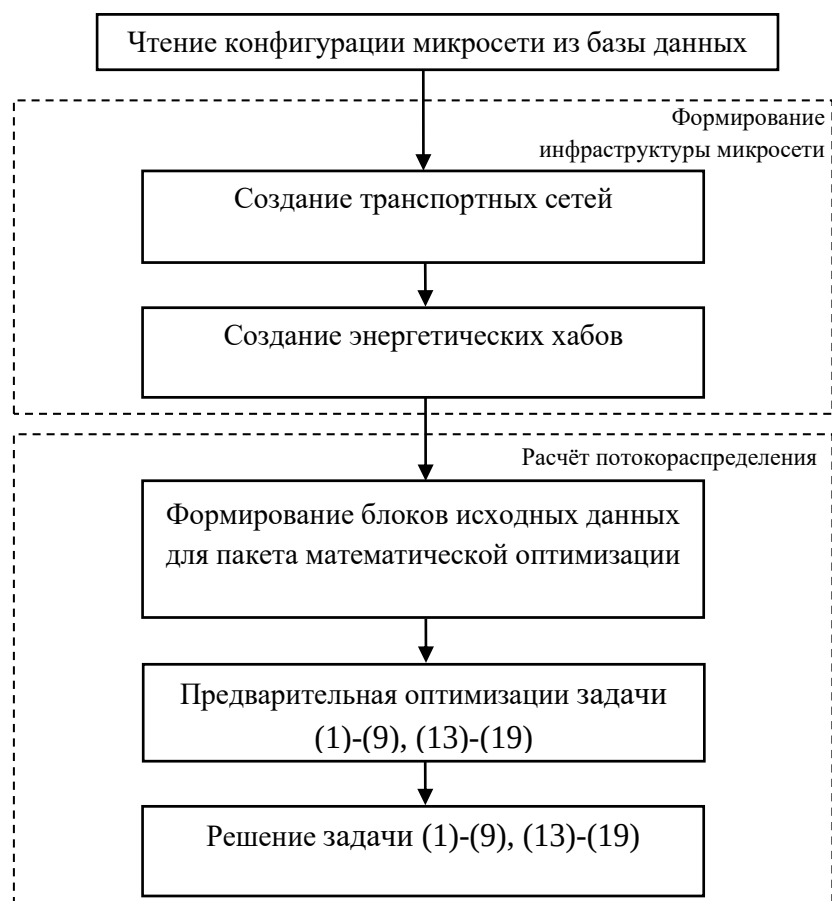


Рис. 4. Алгоритм расчёта потокораспределения энергоресурсов в микросети

Особенностями программной реализации модели микросети (1)-(9), (13)-(19) по сравнению с подходом, представленным в [8], являются:

- применение готовых пакетов математической оптимизации, ориентированных на параллельные и распределённые вычисления;
- применение концепции параллельных и распределённых вычислений, что требует специализированной вычислительной среды для сборки, тестирования и выполнения разрабатываемого программного обеспечения.

Таким образом, сравнение с похожей двухуровневой моделью энергетического комплекса города [7] показывает, что благодаря тому, что все процессы производства, преобразования, аккумулирования и передачи энергоресурсов описываются линейными зависимостями, моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба обеспечивает более высокую вычислительную эффективность. С другой стороны, модель энергетического комплекса города более точно и качественно, чем представленная в статье модель микросети, отражает физические особенности некоторых процессов, например транспорта тепла и электроэнергии. Дальнейшее совершенствование модели микросети связано с добавлением новых элементарных блоков, более детально описывающих работу электрохимических накопителей энергии и возобновляемых источников энергии, а также с формированием различных вариантов компоновки аккумулирующего звена на основе методики категоризации электрохимических накопителей энергии [1].

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FNEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределённых средах».

Список источников

1. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994.– 480 с.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. Journal of computer and systems sciences international, 2021, v. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. Atmosphere, 2021, v. 12, no. 9, 1217, pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
5. Hosseini S.H.R., Allahham A., Walker S.L., Taylor, P. Optimal planning and operation of multi-vector energy networks: A systematic review. Renewable and sustainable energy reviews, 2020, 133, p.110216.
6. Тягунов М.Г. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов / М.Г. Тягунов, Р.П. Шевердиев // Вестник МЭИ, 2023. – № 3. – С. 109-118. – DOI:10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
7. Воропай Н.И. Методика управления спросом на электро-и теплоэнергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко и др. // Известия РАН. Энергетика, 2020. – Т. 4. – С. 11-23.
8. Barakhtenko E., Sokolov D. An architecture of the technology platform for computer modeling, design, and optimization of intelligent integrated energy systems. Proceedings of International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon), 2019, pp. 1-5.
9. Eladl A.A., El-Afifi M.I., El-Saadawi M.M., Sedhom B.E. A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. Alexandria engineering journal, 2023, vol. 68, pp. 315-342.
10. Liu T., Zhang D., Wang S., Wu T. Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response. Energy conversion and management, 2019, vol. 182, pp.126-142.
11. Wang Y., Cheng J., Zhang N., Kang C. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis. Appl energy feb., 2018, pp. 211:705–14.
12. Wang Y., Zhang N., Kang C., Kirschen D.S., Yang J., Xia Q. Standardized matrix modeling of multiple energy systems. IEEE Trans smart grid, 2019, vol. 10, pp. 257-70.
13. Huang W., Zhang N., Wang Y., Capuder T., Kuzle I., Kang C. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies. International journal of electrical power & energy systems, 2020, 119, p. 105876.
14. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs. Proceedings of 17th power system computation, 2011, p. 7.
15. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems – modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. Energy, sustainability and society, 2018, 8, p.35.
16. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов fm 12 Synop и metar в системных энергетических исследованиях / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. –Т. 329. – № 1. – С. 69-88.
17. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI:10.47350/ITAMS.2021.12.
18. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020), ACM, 2020, pp. 1-6, DOI:10.1145/3440749.
19. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28-37.
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters. Proceedings of Power technology and engineering, 2020, 4, pp. 448-454.
21. Еделев А.В. База данных для моделирования автономных энергетических комплексов / А.В. Еделев, А.Г. Феоктистов // Техническая и технологическая модернизация России. Проблемы, приоритеты, перспективы: Тр. Международной научно-практической конф. – Казань: Аэтерна, 2021. – С. 3-9.

22. GLPK – GNU Linear Programming Kit. Available at: <http://www.gnu.org/software/glpk/> (accessed: 05/04/2023).
23. Clp – Coin-Or Linear Programming. Available at: <http://projects.coin-or.org/Clp> (accessed: 05/04/2023).
24. Cbc – Coin-Or Branch and Cut. Available at: <http://projects.coin-or.org/Cbc> (accessed: 05/04/2023).
25. Cplex V12. 1: User's Manual for CPLEX. International Business Machines Corporation, 2009, 46, p.157.
26. SoPlex – The Sequential Object-Oriented Simplex. Available at: <http://soplex.zib.de> (accessed: 05/04/2023).
27. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar energy, 2007, 81, pp. 1409-1425.

Еделев Алексей Владимирович. К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru.

Карамов Дмитрий Николаевич. К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru.

Баширина Ольга Юрьевна. К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru.

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007

Modelling autonomous microgrids

Alexey V. Edelev¹, Dmitriy N. Karamov², Olga Yu. Basharina^{3, 4}

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

²National Research Irkutsk State Technical University,

³Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Russia, Irkutsk, flower@isem.irk.ru,

⁴Ural State University of Economics, Russia, Yekaterinburg

Abstract. This work is the first of a series of articles devoted to the application of the developed digital twin technology of a complex technical system for the study of its properties. One of these properties is resilience, which is understood as the property of these energy complexes to adapt to large disturbances and restore their initial state after their impact. Autonomous micro-networks are considered as complex technical systems in the article. The study of the resilience of these local-level energy complexes is usually based on multivariate computational experiments, however, if there is a feedback of a digital twin with a micro-grid or a test bench, field experiments can also be used. The key component of the digital twin of the microgrid should be a complex of various models that accurately describe all aspects of the behavior of this energy complex. This article describes an optimization model of a microgrid based on the concept of an energy hub. The energy hub concentrates production capacities for generating, converting and accumulating energy resources, which are connected to each other and to consumers using energy transport networks. The article presents a software implementation of an optimization model of a microgrid based on the concept of an energy hub. In conclusion, a comparison is made with a fundamentally similar two-level model of the city's energy complex, showing that the modeling of a microgrid based on the concept of an energy hub provides higher computational efficiency. On the other hand, the model of the energy complex of the city more accurately than the microgrid model presented in this article reflects the physical features of some processes, for example, the transport of heat and electricity.

Keywords: digital twin, test-bed, micro-grid, resilience, mathematical model, energy hub

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. № FWEW-2021-0005 «Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments».

References

1. Karamov D.N. Integratsiya protsessa kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130.
2. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya. V 4-kh tomakh. T. 1. Spravochnik po obshchim modelyam analiza i sinteza nadezhnosti sistem energetiki [Reliability of energy systems and their equipment. In 4 volumes. T. 1. Handbook of general models of analysis and synthesis of reliability of energy systems], vol. 1., Ed Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Feoktistov A.G., Fereferov E.S., Fedorov R.K. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, v. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI: 10.1134/S1064230721060071.
4. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. *Atmosphere*, 2021, v. 12, no. 9, 1217, pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
5. Hosseini S.H.R., Allahham A., Walker S.L., Taylor, P. Optimal planning and operation of multi-vector energy networks: A systematic review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2020, 133, p.110216.
6. Tyagunov M.G., Sheverdiyev R.P. Ispol'zovaniye dvoynika gibridnykh energeticheskikh kompleksov dlya optimizatsii ikh parametrov i rezhimov [Using a digital twin of hybrid energy complexes to optimize their parameters and modes]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], no 3, pp. 109-118, DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
7. Voropay N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. et al. Metodika upravleniya sprosom na elektro- i teploenergiyu vo vstroynnoy energosisteme s aktivnymi pol'zovatelyami [Demand management technique for electricity and heat in an integrated energy system with active consumers]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Izvestiya RAS. Energy], 2020, v. 4, pp. 11-23.
8. Barakhtenko E., Sokolov D. An architecture of the technology platform for computer modeling, design, and optimization of intelligent integrated energy systems. *Proceedings of International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon)*, 2019, pp. 1-5.
9. Eladl A.A., El-Afifi M.I., El-Saadawi M.M., Sedhom B.E. A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. *Alexandria engineering journal*, 2023, vol. 68, pp. 315-342.
10. Liu T., Zhang D., Wang S., Wu T. Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response. *Energy conversion and management*, 2019, vol. 182, pp.126-142.
11. Wang Y., Cheng J., Zhang N., Kang C. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis. *Appl energy feb.*, 2018, pp. 211:705–14.
12. Wang Y., Zhang N., Kang C., Kirschen D.S., Yang J., Xia Q. Standardized matrix modeling of multiple energy systems. *IEEE Trans smart grid*, 2019, 10, pp. 257-70.
13. Huang W., Zhang N., Wang Y., Capuder T., Kuzle I., Kang C. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, vol. 119, p. 105876.
14. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs. *Proceedings of 17th power system computation*, 2011, p. 7.
15. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems – modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy, sustainability and society*, 2018, 8, p.35.
16. Karamov D.N. Formirovaniye iskhodnykh meteorologicheskikh massivov s ispol'zovaniyem mnogoletnikh ryadov fm 12 Synop i metar v sistemnykh energeticheskikh proizvodstvakh [Formation of initial meteorological arrays using long-term series fm 12 Synop and metar in system energy studies]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69-88.
17. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. *Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021)*, CEUR-WS Proceedings, 2021, v. 2984, pp. 95–100, DOI:10.47350/ITAMS.2021.12.

18. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020), ACM, 2020, pp. 1-6, DOI:10.1145/3440749.
19. Karamov D.N. Matematicheskoye modelirovaniye sluchaynykh izlucheniye s ispol'zovaniyem mnogoletnikh meteorologicheskikh ryadov, nakhodyashchikhsya v dostupe [Mathematical modeling of solar radiation using publicly available long-term meteorological series]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28-37.
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters. Proceedings of Power technology and engineering, 2020, 4, pp. 448-454.
21. Edelev A.V., Feoktistov A.G. Baza dannykh dlya modelirovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov [Database for modeling autonomous energy complexes]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskaya i tekhnologicheskaya modernizatsiya Roscii. Problemy, priority, perspektivy» [Proc. of International scientific and practical conference “Technical and technological modernization of Russia. Problems, priorities, prospects”], Kazan', Aeterna, 2021, pp. 3-9.
22. GLPK – GNU Linear Programming Kit. Available at: <http://www.gnu.org/software/glpk/> (accessed: 05/04/2023).
23. Clp – Coin-Or Linear Programming. Available at: <http://projects.coin-or.org/Clp> (accessed: 05/04/2023).
24. Cbc – Coin-Or Branch and Cut. Available at: <http://projects.coin-or.org/Cbc> (accessed: 05/04/2023).
25. Cplex V12. 1: User's Manual for CPLEX. International Business Machines Corporation, 2009, 46, p.157.
26. SoPlex – The Sequential Object-Oriented Simplex. Available at: <http://soplex.zib.de> (accessed: 05/04/2023).
27. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar energy, 2007, 81, pp. 1409-1425.

Edelev Alexey Vladimirovich. Candidate of Technical Sciences, Researcher, Melentiev energy systems institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru.

Karamov Dmitriy Nikolaevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National research Irkutsk state technical university, Baikal School of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru.

Basharina Olga Yurievna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS, Associate Professor, Ural state university of economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 30.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 08/30/2023; approved after reviewing 09/12/2023; accepted for publication 09/25/2023.

Анализ эффективности применения нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей

Пискунова Виктория Михайловна¹, Крупенёв Дмитрий Сергеевич²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, vita.piskunova98@gmail.com

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск

Аннотация. В данной работе представлен сравнительный анализ эффективности использования линейной и нелинейной моделей ТЭС при исследовании надежности энергоснабжения территории. В моделях представлены различные типы генерирующего оборудования, описанные в виде аналитических зависимостей, полученных путем аппроксимации графиков и диаграмм типовых характеристик и руководящих документов. Это позволяет учитывать изменение расхода топлива в зависимости от производимого объема тепла и электроэнергии. Результаты вычислительного эксперимента показали, что применение нелинейных моделей позволяет более точно оценить уровень надежности энергоснабжения, что может быть полезно при планировании и проектировании энергетических систем.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, теплоэлектростанция, моделирование, расходные характеристики, надёжность, энергетическая безопасность

Цитирование: Пискунова В.М. Анализ эффективности применения нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей / В.М. Пискунова, Д.С. Крупенёв // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 86-93. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.008.

Введение. Нарушение надёжности топливо- и энергоснабжения потребителей может приводить к экономическому ущербу и даже нарушению безопасности государства. Тепловые электростанции, благодаря возможности производить большие объёмы тепловой и электрической энергии, являются важным, иногда единственным источником централизованной энергоснабжения для крупных территорий. В настоящее время в России доля ТЭС в балансе генерации электроэнергии составляет более 60 %, что показывает важность надёжной и бесперебойной работы этих объектов.

Для оценки надежности энергоснабжения потребителей необходима разработка математических моделей разных видов ТЭС с учетом технологических процессов. Целью данной работы является сравнение применения нелинейных и линейных моделей ТЭС для анализа надежности энергоснабжения потребителей.

1. Характеристика подходов к моделированию ТЭС. Математическое моделирование работы ТЭС должно отражать топливную, электроэнергетическую и теплоснабжающую подсистемы объекта. Для корректного моделирования топливоснабжения необходимо учитывать зависимости расхода топлива от генерации тепло- и электроэнергии на ТЭС. Это может быть сделано с использованием разных подходов. Во-первых, использование упрощенной модели, агрегирующей вышеуказанные зависимости совокупности ТЭС, находящихся в одной энергозоне. Основной проблемой при этом является низкая точность результата. Положительной стороной подхода является относительная простота при реализации и интерпретации результатов [1-4]. Во-вторых, использование модели, построенной по точным параметрам работы и паспортным данным оборудования ТЭС. Этот подход является наиболее точным и детальным, так как учитывает состояние энергоносителя на каждом этапе производства тепло- и электроэнергии. Трудности связаны с необходимостью иметь детальную информацию по каждому генерирующему объекту, которая часто труднодоступна [5-12]. Третий подход основан на по-

строении модели путем аппроксимации диаграмм режимов работы оборудования. При моделировании топливоснабжения ТЭС в предыдущих работах авторов [13] для получения зависимости расхода топлива от производимого ими объема тепла и электроэнергии был реализован третий подход. Основным его преимуществом является учет состояния энергоносителей на каждом этапе процесса производства тепла и энергии.

Для моделирования технических процессов производства электроэнергии и тепла были рассмотрены основные типы станций, включая конденсационные электростанции (КЭС), тепловые электростанции (ТЭЦ), газотурбинные установки (ГТУ) и парогазотурбинные станции (ПГУ). Аналитические зависимости, необходимые для их математического моделирования, были получены методом наименьших квадратов путем аппроксимации графиков и диаграмм из типовых характеристик и руководящих документов. Сравнение результатов четырех способов аппроксимации, таких, как среднее значение, линеаризованный, квадратичный и кубический, позволило определить оптимальные зависимости. Были получены аналитические зависимости между потреблением топлива и тепловой и электрической нагрузкой для различных типов тепловых агрегатов на тепловых электростанциях. Для паровых турбин получены зависимости количества тепла, подводимого к турбине, от нагрузки (электрической или тепловой, в зависимости от типа турбины) с помощью метода наименьших квадратов для аппроксимации типовых диаграмм. Для котлоагрегатов были применены четыре способа аппроксимации зависимости коэффициента полезного действия от тепловой нагрузки: усреднение, линейная регрессия, квадратичная регрессия и кубическая регрессия. После аппроксимации было определено, что только линейная зависимость имеет практически одинаковый коэффициент детерминации для всех методов, поэтому для моделирования работы тепловых электростанций целесообразно использовать линейную зависимость между КПД и тепловой нагрузкой. Для ГТУ и ПГУ проводилась аппроксимация зависимости КПД от нагрузки. В результате были получены полиномы второго порядка.

2. Вычислительный эксперимент. Ранее выполненные исследования [13] стали основой для сравнительного анализа эффективности применения линейных и нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей. Исследуемая условная (тестовая) энергетическая система (рис. 1) содержит три энергетических района, которые могут обмениваться друг с другом следующими энергоресурсами: электричеством, газом и углем. Каждый район имеет свои собственные системы теплоснабжения, которые отражаются в модели как производство и потребление тепловой энергии. В районе 1 имеется источник газа, а в районе 3 – источник угля. ТЭС во всех районах представлены угольными, газовыми или парогазовыми ТЭЦ и КЭС.

Целевой функцией модели является минимизация дефицита энергии. Весовые коэффициенты функции цели определяются экспертно:

$$\min q = c_1 \cdot \sum \Delta P_i + c_2 \cdot \sum \Delta T_i + c_3 \cdot \sum \Delta S_i + c_4 \cdot \sum \Delta C_i + c_5 \cdot \sum \Delta G_i, \quad (1)$$

где $c_1 \dots c_5$ – весовые коэффициенты дефицитов энергоресурсов. Они показывают размер штрафов за недопоставку энергоресурсов, ΔP_i – дефицит электроэнергии, ΔT_i – дефицит тепловой энергии, ΔS_i – дефицит промышленного пара, ΔC_i – дефицит угля, ΔG_i – дефицит газа.

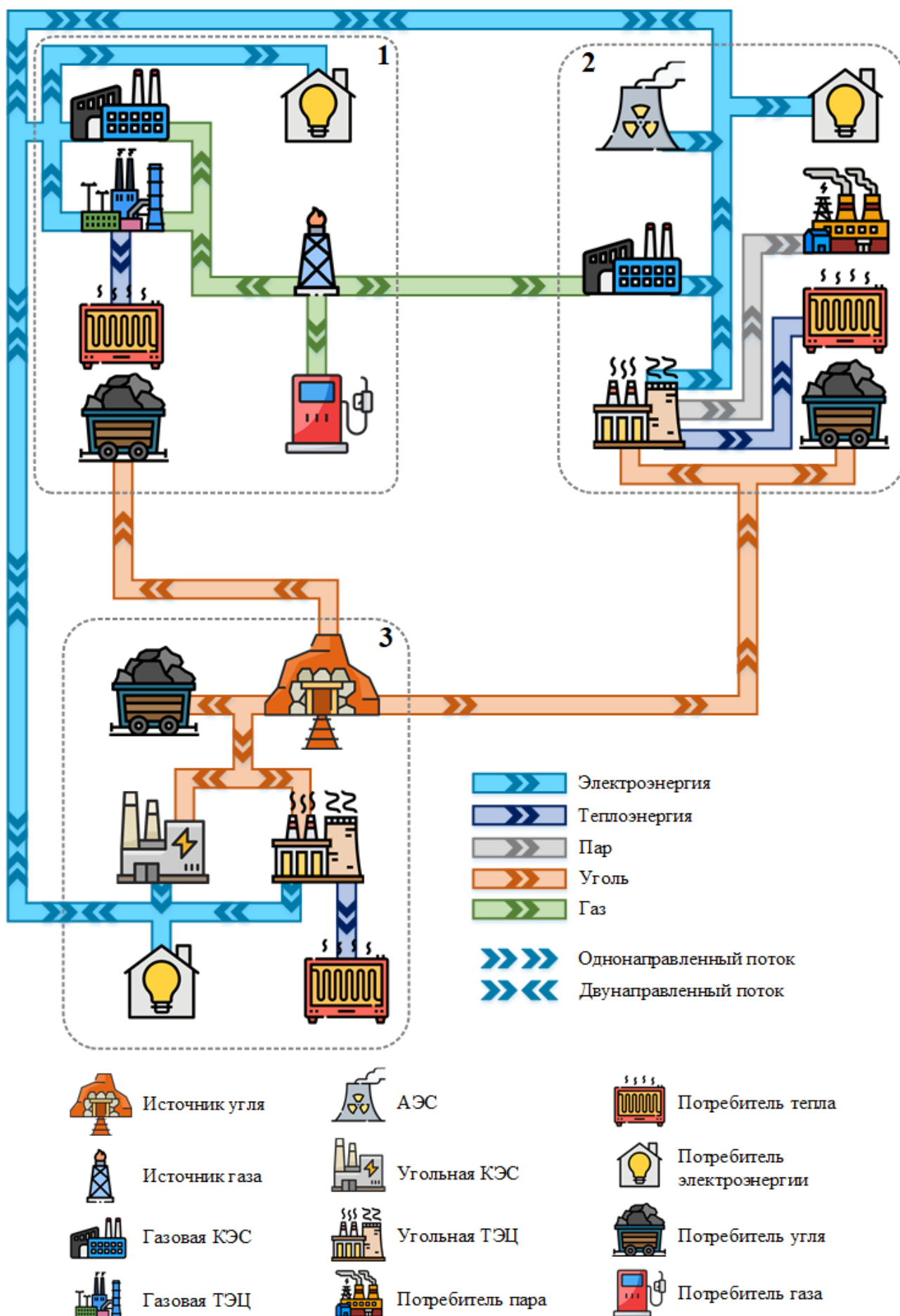


Рис. 1. Схема тестовой трехузловой энергосистемы

Балансовые уравнения модели имеют следующий вид.

Балансовое уравнение электроэнергии:

$$\sum_{k=1}^K (P_{CHP\ g\ ik} + P_{CHP\ c\ ik} + P_{CPR\ g\ ik} + P_{CPR\ c\ ik}) + P_{ji} - \frac{P_{ij}}{k_p} - Cons_{Pi} + \Delta P_i = 0, \quad (2)$$

где k – порядковый номер агрегата на тепловой электростанции района i .

Балансовое уравнение тепловой энергии:

$$\sum_{k=1}^K (T_{CHP\ g\ ik} + T_{CHP\ c\ ik}) - Cons_{Ti} + \Delta T_i = 0. \quad (3)$$

Балансовое уравнение промышленного пара:

$$\sum_{k=1}^K (S_{CHP\ g\ ik} + S_{CHP\ c\ ik}) - Cons_{Si} + \Delta S_i = 0. \quad (4)$$

Балансовое уравнение угля:

$$C + C_{ji} - \frac{C_{ij}}{k_c} - \sum_{k=1}^K (C_{CHP\ ik} + C_{CPR\ ik}) - Cons_{Ci} + \Delta C_i = 0, \quad (5)$$

где $C_{CHP\ ik} = \frac{k_1 \cdot P_{CHP\ c\ ik} + k_2 \cdot S_{CHP\ c\ ik} + k_3 \cdot T_{CHP\ c\ ik} + k_4}{\eta_c \cdot Q_c}$ – количество угля, потребляемого котельным агрегатом k на ТЭЦ района i , $C_{TPP\ ik} = \frac{k_1 \cdot P_{TPP\ c\ ik} + k_2}{\eta_c \cdot Q_c}$ – количество угля, потребляемого котельным агрегатом k на КЭС района i , $\eta_c = f(P_{CHP/TPP\ c\ ik})$ – линейное уравнение, описывающее зависимость КПД котлагрегата от нагрузки, Q_c – теплотворная способность угля, k_c – коэффициент, учитывающий потери при транспортировке угля.

Балансовое уравнение газа:

$$G + G_{ji} - \frac{G_{ij}}{k_g} - \sum_{k=1}^K (G_{CHP\ ik} + G_{CPR\ ik}) - Cons_{gi} + \Delta G_i = 0, \quad (6)$$

где $C_{CHP\ ik} = \frac{P_{CHP\ g\ ik} + k_1 \cdot P_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_2 \cdot S_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_3 \cdot T_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_4}{\eta_g \cdot Q_g}$ – количество газа, потребляемое турбиной k на ТЭЦ района i , $C_{CPR\ ik} = \frac{P_{CPR\ g\ ik}}{\eta_g \cdot Q_g}$ – количество газа, потребляемое турбиной k на КЭС района i , $\eta_g = f(P_{CHP/CPR\ g\ ik})$ – нелинейное уравнение, описывающее зависимость КПД турбины от нагрузки, Q_g – теплотворная способность газа, k_g – коэффициент, учитывающий потери при транспортировке газа.

Исходные данные и ограничения переменных в модели задавались таким образом, чтобы энергосистема могла обеспечить всех потребителей необходимыми энергоресурсами. Соответственно, следующим шагом вычислительного эксперимента стало моделирование аварийных ситуаций при передаче энергоресурсов, сокращении или прекращении производства топлива и выводе из строя электростанций. Для этого мы изменили ограничения на верхнюю границу соответствующей переменной, тем самым уменьшив количество доступных энергоресурсов.

Для анализа недостатков системы мы провели вычислительные эксперименты для шести сценариев:

- 1) отказ линии электропередачи между районами 1 и 2;
- 2) отключение железной дороги между районами 2 и 3;
- 3) сокращение вдвое добычи угля в районе 3;
- 4) сокращение на 1/4 добычи газа в районе 1;
- 5) нарушение работы газовой КЭС района 1;

6) нарушение работы угольной ТЭЦ в районе 3.

Для анализа эффективности предложенных линейной и нелинейной математических моделей тепловых электростанций мы сравнили результаты минимизации дефицита. Сравнение проводилось с одними и теми же исходными данными в сценарии отсутствия дефицита, а также в 6 сценариях, описанных выше. Для формирования линейной модели ТЭС зависимости КПД от коэффициента загрузки энергоблока были заменены на среднее значение КПД. Таким образом, балансовые уравнения и ограничения модели остались неизменными.

Результаты расчетов. Эксперимент проводился с использованием двух методов: метода внутренних точек для линейной модели, реализованной в MATLAB и метода Франка-Вольфа для нелинейной модели, реализованной в Excel. Поскольку исходные данные для обеих моделей были одинаковыми, разница в значениях целевой функции (рис. 2) объясняется более точным расчетом необходимого количества топлива для ТЭС в нелинейной модели. Разница в значениях целевых функций в сценариях 2 и 6 незначительна, поэтому трудно оценить эффективность нелинейной модели.

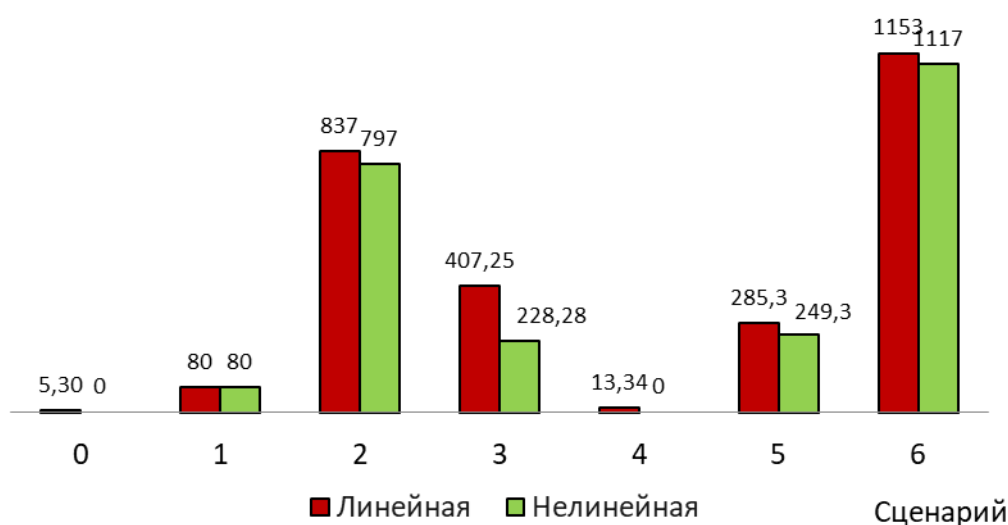


Рис. 2. Сравнение полученных значений целевой функции (в у.е.) в линейной и нелинейной моделях

В нелинейной модели в сценарии 4 и бездефицитном сценарии дефицит отсутствует, тогда как в линейной модели он есть (рис. 3). Наибольшая разница в моделях проявляется в сценарии 3, где объективная функция линейной модели в 1,8 раза выше, чем объективная функция нелинейной модели. Это связано с тем, что в данном сценарии моделировалось снижение добычи угля, а так как в линейной модели потребление топлива на ТЭС завышено, то прямо пропорционально увеличивается дефицит вырабатываемого тепла и электроэнергии. Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости использования нелинейной модели.

Наибольший дефицит во всех сценариях наблюдался в первой энергетической зоне. Подача электроэнергии в этой энергозоне снижается или прекращается почти во всех смоделированных аварийных ситуациях. Это связано с тем, что, согласно исходным данным, в районе 1 существует отрицательный баланс электроэнергии (потребление в районе превышает выработку), поэтому он зависит от поставок электроэнергии из районов 2 и 3. Район 2 не имеет собственного источника топлива, поэтому в случае перебоев с поставками топлива возникает дефицит тепла и электроэнергии. Район 3 полностью покрывает собственные потребности в энергоресурсах, а также экспортирует уголь и электроэнергию, поэтому дефицит возникает только в чрезвычайных ситуациях внутри энергетического района.

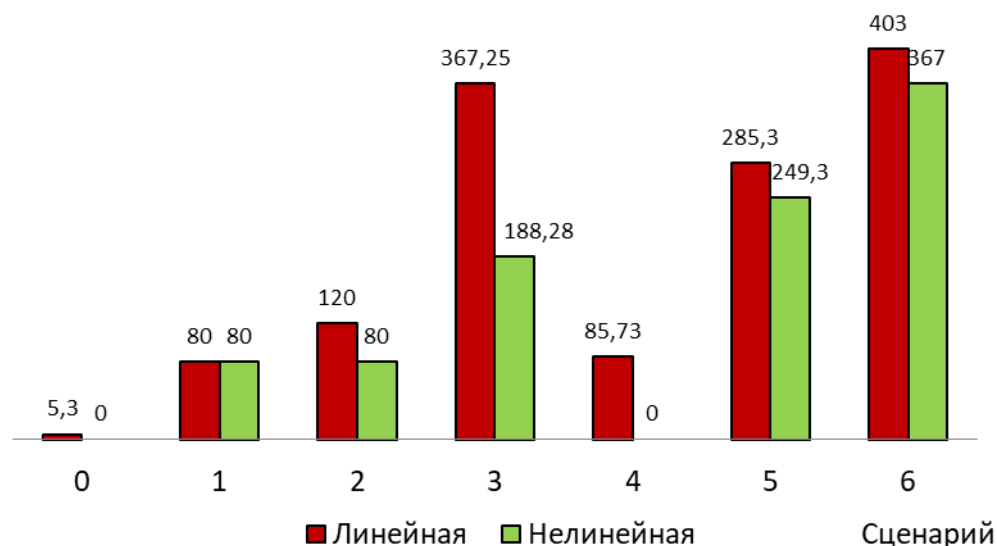


Рис. 3. Сравнение полученных суммарных дефицитов (в у.е.) в линейной и нелинейной моделях

Заключение. Изучение проблем обеспечения надежного энергоснабжения и снабжения топливом является неотъемлемой составляющей процесса планирования развития энергетических систем. Это обусловлено, прежде всего, высокой стоимостью отказа энергооборудования, а также ущербом для потребителей в результате прерывания поставок энергии.

В рамках статьи был описан метод, используемый для моделирования работы ТЭС на основе использования параметров работы оборудования. Этот способ описания тепловых электростанций является наиболее пригодным для анализа надежности топливо- и энергоснабжения, так как он дает необходимую точность расчетов и учитывает специфику различного генерирующего оборудования, не опускаясь при этом на уровень микропараметров. Далее эти взаимосвязи были интегрированы в модель условной энергосистемы.

При сравнении результатов оптимизации линейной и нелинейной моделей энергоснабжения территории видно, что в линейной модели практически во всех сценариях суммарные дефициты значительно больше, чем в нелинейной (рис. 3). Среднее отклонение значений для всех сценариев равно 39,6%, что показывает эффективность и точность нелинейной модели. Значения целевых функций в моделях также различно (рис. 2). В сценариях 0 и 4 целевая функция в нелинейной модели принимает нулевое значение, тогда как в линейной модели есть дефициты энергоресурсов, за которые накладываются штрафы. Среднее отклонение целевой функции для всех сценариев равно 12,53%.

Нелинейная модель показала меньший дефицит, чем линейная модель во всех сценариях. Таким образом, в ходе вычислительного эксперимента было установлено, что нелинейная модель с высокой степенью точности находит минимальное значение дефицита энергоресурсов в различных чрезвычайных ситуациях.

Список источников

1. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения / В.И. Зоркальцев. – М.: Наука, 1988. – 144с
2. Надежность систем энергетики и их оборудования / под общей редакцией Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
3. Антонов Г.Н. Методы и модели исследования живучести систем энергетики / Г.Н. Антонов, Г.П. Черкесов, Л.Д. Криворучий [и др.] – Новосибирск: Наука, 1990. – 285 с.
4. Иерархическое моделирование систем энергетики / под. ред. Воропая Н.И., Стенникова В.А. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 314 с. – DOI:10.21782/B978-5-6043021-9-4.

5. Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock's approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 22.
6. Santos M., Andre J., Mendes R., et al. Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology. *Energy Procedia*, 2017, vol. 129, pp. 676-683.
7. Wang Y., Wehrle L., Banejee A., et al. Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. *Renewable Energy*, 2021, vol. 163, pp. 78-87.
8. Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part A: Power and process engineering*, 1987, vol. 201, no. 3, pp. 193-200.
9. Новосёлов В.Б. Повышение эффективности работы электростанций путём организации дополнительных отборов пара от паровых турбин / В.Б. Новосёлов, Ю.М. Бродов, Е.В. Литвинов, и др. // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*, 2018. – Т. 20. – № 1-2. – С. 90-99.
10. Клер А.М. Математическое моделирование установок комбинированного производства жидких углеводородов и электроэнергии на основе угля / А.М. Клер, Э.А. Тюрина, А.С. Медников // *Химия твердого топлива*, 2020. – № 3. – С. 14-26.
11. Клер А.М. Эффективная методика настройки математических моделей теплоэнергетического оборудования на его фактическое состояние / А.М. Клер, В.Э. Алексеюк // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2019. – № 31. – С. 136-158.
12. Клер А.М. Оптимизация режимов работы ТЭЦ для максимизации прибыли в условиях балансирующего рынка электроэнергии / А.М. Клер, А.С. Максимов, А.В. Чалбышев [и др.] // *Известия Российской Академии Наук. Энергетика*, 2014. – № 2. – С. 71-80
13. Крупенев Д.С. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности / Д.С. Крупенев, В.М. Пискунова, А.Г. Гальфингер // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2023. – Т. 25, № 2. – С. 12-25. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25. – EDN QVZNGU.

Крупенёв Дмитрий Сергеевич. Канд. техн. наук, заведующий лабораторией "Надёжности топливо- и энергоснабжения" ИСЭМ СО РАН. AuthorID: 668302, SPIN: 4408-2996, ORCID: 0000-0002-3093-4483, krupenev@isem.irk.ru

Пискунова Виктория Михайловна. Аспирант ИРНИТУ, ассистент кафедры теплоэнергетики. AuthorID: 921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472, vitapiskunova98@gmail.com

UDC 621.311.22

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.008

Analysis of the efficiency of non-linear models of thermal power plants in the study of the reliability of the power supply to the consumers security and reliability of power supply to consumers

Victoria M. Piskunova¹, Dmitry S. Krupenev²

¹ National Research Irkutsk State Technical University,
Russia, Irkutsk, vitapiskunova98@gmail.com

² Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, vitapiskunova98@gmail.com

Abstract. This paper considers the modeling of a test power system with three nodes to analyze the effectiveness of using nonlinear models of thermal power plants in the study of energy security and reliability of power supply. Within the framework of the modeling, experiments were conducted using various types of generating equipment and loads, as well as calculations based on nonlinear models. The results of the simulation showed that the use of nonlinear models makes it possible to more accurately assess the level of energy security and energy supply reliability, which can be useful in planning and designing energy systems.

Keywords: energy sector, thermal power plant, modeling, consumption characteristics, reliability, energy security

References

1. Zorkal'cev V.I. Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funkcionirovaniya sistemy toplivosnabzheniya [Methods for forecasting and analyzing the efficiency of the fuel supply system]. M.: Nauka [Science], 1988, 144 p.
2. Rudenko YU.N. et al. Nadezhnost' sistem energetiki i ih oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment]. M.: Energoatomizdat, 1994, 480 p.
3. Antonov G.N. Cherkesov G.P., Krivoruckij L.D. [et al.] Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]. Novosibirsk: Nauka [Science], 1990, 285 p.
4. Voropay N.I., Stennikov V.A. [et al.] Ierarhicheskoe modelirovanie sistem energetiki [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo" [Academic publishing house "Geo"], 2020, 314 p, DOI: 10.21782/V978-5-6043021-9-4.
5. Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock's approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, vol. 22.
6. Santos M., Andre J., Mendes R. [et al.] Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology. Energy Procedia, 2017, vol. 129, pp. 676-683.
7. Wang Y., Wehrle L., Banejee A. [et al.] Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. Renewable Energy, 2021, vol. 163, pp. 78-87.
8. Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant. Proceedings of the Institution of mechanical engineers, Part A: Power and process engineering, 1987, vol. 201, no. 3, pp. 193-200.
9. Novoselov V.B., Brodov Y.M., Litvinov E.V. [et al.] Povysheniye effektivnosti raboty elektrostantsiy putem organizatsii dopolnitel'nykh otborov para ot parovykh turbin [Increase efficiency of electric power stations by way of organization of additional choice of steam from steam turbines]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI [Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS], 2018, no. 20(1-2), pp. 90-99.
10. Kler A.M., Tyurina E.A., Mednikov A.S. Matematicheskoe modelirovanie ustanovok kombinirovannogo proizvodstva zhidkikh uglevodorodov i elektroenergii na osnove uglya [Mathematical modeling of plants for the combined production of liquid hydrocarbons and electricity based on coal]. Solid fuel chemistry [Khimiya tverdogo topliva], 2020, no. 3, pp. 14-26.
11. Kler A.M., Alekseyuk V.E. Effective adjustment technique of mathematical models of thermal power equipment on its actual condition [Effektivnaya metodika nastroyki matematicheskikh modelei teploenergeticheskogo oborudovaniya na ego fakticheskoe sostoyanie]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2019, no. 31, pp. 136-158.
12. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshev A.V. [et al.] Optimizatsiya rezhimov raboty TETs dlya maksimizatsii pribyli v usloviyakh balansiruyushchego rynka elektroenergii [Optimization of cogeneration plant operation for maximization of profit in balancing electricity market]. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika [Proceedings of the RAS. Power engineering], 2014, no. 2, pp. 71-80.
13. Krupenev D.S., Piskunova V.M., Galfinger A.G. Modelirovaniye teplovykh elektrostantsiy pri issledovanii nadozhnosti energosnabzheniya i energeticheskoy bezopasnosti [Modelling the combined heat and power plants with steam turbines in the study of energy security problems]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Problemy energetiki [Power engineering: research, equipment, technology], 2021, no. 25(1), pp. 816-828, DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25, EDN QVZNGU.

Krupenev Dmitry Sergeevich. Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory of reliability of fuel and energy supply, ISEM SB RAS. AuthorID: 668302, SPIN: 4408-2996, ORCID: 0000-0002-3093-4483, krupenev@isem.irk.ru

Piskunova Victoria Mikhailovna. Postgraduate student of IRNITU, assistant of the department of heat engineering. AuthorID: 921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472, vitapiskunova98@gmail.com

Статья поступила в редакцию 21.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 08/21/2023; approved after reviewing 09/05/2023; accepted for publication 09/25/2023.

Математическое моделирование

УДК 519.673

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.009

Математическая модель балочного конечного элемента Тимошенко

Дудаев Михаил Алексеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, dudaev_ma@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен вывод основных физико-математических зависимостей метода конечных элементов для балочного конечного элемента Тимошенко, работающего в условиях поперечного изгиба при статическом и динамическом нагружении и позволяющего более точно аппроксимировать поле перемещений по сравнению с классической теорией изгиба. Показано, что в этом случае податливость конечного элемента складывается из двух составляющих: «изгибной», вызванной действием изгибающего момента и «сдвиговой», вызванной действием поперечной силы, а угол поворота поперечного сечения отличается от угла наклона касательной к упругой оси изогнутой балки; при этом податливость сдвига существенно проявляется в коротких балках, длина которых соизмерима с высотой поперечного сечения. Математическая модель построена на основе вариационно-энергетического принципа теории упругости и метода конечных элементов. Для указанного типа конечного элемента получены полиномиальные функции формы, служащие для аппроксимации поля перемещений, с применением дифференциальных зависимостей, известных из курсов сопротивления материалов и теории упругости. Получены матрица градиентов функций форм, позволяющая определить вектор деформаций по известным значениям поля узловых перемещений, и матрица жесткости, имеющая ключевое значение в решении разрешающей системы линейных алгебраических уравнений метода конечных элементов, выражение вектора напряжений и внутренних силовых факторов при поперечном изгибе, позволяющее определить их на основании узловых перемещений. Для полученной модели конечного элемента проведен анализ точности численного решения метода конечных элементов по отношению к аналитическому и представлено расхождение результатов расчета при использовании модели чистого изгиба балки и модели Тимошенко.

Ключевые слова: конечный элемент, метод конечных элементов, балка Тимошенко, поперечный изгиб, сдвиг, функции формы, матрица градиентов, матрица жесткости

Цитирование: Дудаев М.А. Математическая модель балочного конечного элемента Тимошенко / М.А. Дудаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 94-102. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.009.

Введение. В инженерном анализе балочных конструкций часто используется модель чистого изгиба: предположение, что основной вклад в нагружение балки привносит изгибающий момент, а действие поперечной силы менее существенно [1-4]. Однако такое утверждение справедливо лишь для балок, длина которых существенно превышает высоту [2]. Для коротких балок (рис. 1) вклад поперечной силы в общую картину нагружения увеличивается, а у очень коротких балок становится основным. По этой причине крепежные элементы (заклепки, призонные болты и т.п.) рассчитываются на чистый сдвиг [1-4].



а – вал турбины высокого давления; б – шпилька призонная

Рис. 1. Примеры коротких балок в конструкции турбомашин

Несмотря на существенное развитие вычислительной техники и математических моделей конечных элементов (КЭ) объемного напряженного и деформированного состояния

[5-9], балочные КЭ не теряют своей актуальности [10-14], поскольку позволяют существенно экономить время расчета модели, что особенно актуально в нелинейных задачах и задачах динамики.

При моделировании крепежных деталей методом конечных элементов большей адекватностью обладает математическая модель балки Тимошенко [10, 13], в которой учитывается действие обоих внутренних силовых факторов.

В работе [10] представлено получение матрицы жесткости балочного конечного элемента (КЭ) Тимошенко методом обращения матрицы податливостей. Указанный подход в некоторых случаях вполне оправдан, однако, не позволяет получить функции формы КЭ, аппроксимирующие поле перемещений, что затрудняет расчет внутренних силовых факторов КЭ, напряжений и деформаций в нем. Поэтому в данной работе предложена полная математическая модель балочного КЭ Тимошенко.

1. Функции формы конечного элемента. Для получения основных зависимостей рассматривается двухузловой КЭ (рис. 2) с узлами i и j в локальной системе координат: начало координат расположено в узле i , а ось x направлена вдоль КЭ от узла i к узлу j . Ось y направлена вверх. Каждый узел имеет две степени свободы: прогиб v_i, v_j и угол поворота поперечного сечения θ_i, θ_j . Координата x в узлах i и j принимает значения «0» и « l » соответственно.

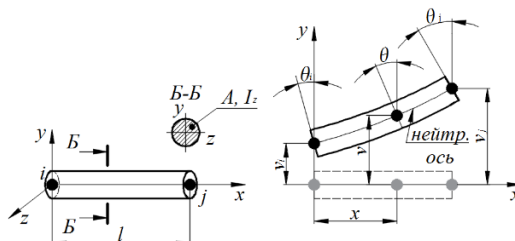


Рис. 2. Балочный конечный элемент

Векторы перемещений в точке и в узлах КЭ соответственно имеют вид:

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v \\ \theta \end{Bmatrix}; \{v\}^e = \begin{Bmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Определение поля перемещений в произвольной точке через узловые значения осуществляется с применением матрицы функций форм $[N]$, имеющей размерность 2×4 :

$$\{v\} = [N] \cdot \{v\}^e. \quad (2)$$

Прогиб в произвольной точке полностью определяется четырьмя перемещениями узлов, поэтому его аппроксимирующая функция взята в виде полинома третьей степени, описывающего изогнутую ось КЭ:

$$v = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3, \quad (3)$$

и содержащего четыре постоянных $a_0 \dots a_3$.

Угол наклона касательной к изогнутой оси с учетом малости угла ($\tan \varphi \approx \varphi$)

$$\varphi \approx \frac{dv}{dx} = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2. \quad (4)$$

Отличие поперечного изгиба (рис. 3) от чистого заключается в том, что поперечные сечения в деформированном состоянии не остаются нормальными к изогнутой оси бруса, а отклоняются от нормали на угол сдвига γ [3]:

$$\theta = \varphi - \gamma, \quad (5)$$

который в пределах одного КЭ считается постоянным.

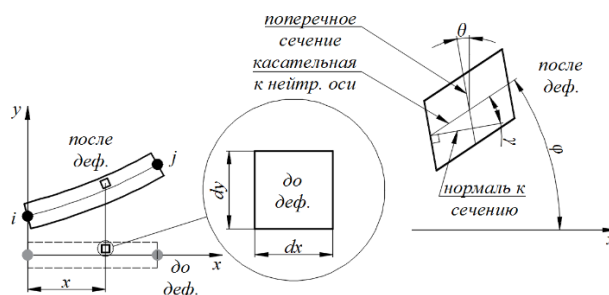


Рис. 3. Углы наклона касательной и поперечного сечения

Внутренние силовые факторы (изгибающий момент M_z и поперечная сила Q_y) определяются дифференциальными выражениями, известными из курса сопротивления материалов [1-4]:

$$M_z = \frac{d\theta}{dx} EI_z = (2a_2 + 6a_3x) EI_z; \quad (6)$$

$$Q_y = -\frac{dM_z}{dx} = -6a_3 EI_z,$$

где E – модуль Юнга материала КЭ; I_z – момент инерции поперечного сечения КЭ относительно оси z .

Знак «минус» в последнем выражении взят потому, что изгибающий момент, вызванный положительной поперечной силой, уменьшается при возрастании координаты x .

Угол сдвига определяется на основании закона Гука для касательных напряжений [1-4]. При этом касательное напряжение определяется приближенно в предположении о равномерном распределении касательных напряжений по сечению:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{Q_y}{A_{sy} G} = -6a_3 \frac{EI_z}{A_{sy} G}, \quad (7)$$

где G – модуль сдвига материала КЭ; A_{sy} – «эффективная» площадь поперечного сечения КЭ при сдвиге.

Таким образом, реальному КЭ с неравномерным распределением касательных напряжений по сечению сопоставляется условный КЭ с редуцированной (эффективной) площадью поперечного сечения

$$A_{sy} = k_y A, \quad (8)$$

где k_y – коэффициент, зависящий от формы и размеров сечения [1, 4]:

$$k_y = \frac{I_z^2}{A} \int_A \frac{b^2}{S_z^2} dA, \quad (9)$$

где b – ширина поперечного сечения; S_z – статический момент отсеченной части площади.

Так, например, для круглого поперечного сечения [4] $k_y = 9/10$, для тонкостенного кольца $k_y = 1/2$.

Для этого условного КЭ выполняются зависимости:

$$V = \int_{A_{sy}} \int_l dx dA_{sy}; \quad I_z = \int_{A_{sy}} y^2 dA_{sy}, \quad (10)$$

где V – объем условного КЭ.

С учетом (7) выражение угла поворота (5) принимает вид

$$\theta = a_1 + 2a_2x + 3a_3 \left(x^2 + 2 \frac{EI_z}{A_{sy} G} \right). \quad (11)$$

Постоянные a в выражениях (1) и (11) определяются из граничных условий КЭ:

- при $x = 0$ $v = v_i$, $\theta = \theta_i$;
- при $x = l$ $v = v_j$, $\theta = \theta_j$.

Тогда

$$\begin{aligned} a_0 &= v_i; \\ a_1 &= \frac{12EI_z v_j - 12EI_z v_i + (6EI_z l + A_{sy} Gl^3) \theta_i - 6EI_z l \theta_j}{l(A_{sy} Gl^2 + 12EI_z)}; \\ a_2 &= \frac{6A_{sy} G v_i - 6A_{sy} G v_j + 3A_{sy} Gl \theta_i + 3A_{sy} Gl \theta_j}{2(A_{sy} Gl^2 + 12EI_z)} - \frac{6I_z \theta_i - 6I_z \theta_j}{12I_z l}; \\ a_3 &= \frac{A_{sy} G (2v_i - 2v_j + l\theta_i + l\theta_j)}{l(A_{sy} Gl^2 + 12EI_z)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для сокращения дальнейшей записи вводятся обозначения:

$$S_z = \frac{EGI_z A_{sy}}{l(A_{sy} Gl^2 + 12EI_z)}; \quad \bar{x} = \frac{x}{l}. \quad (13)$$

При этом $\bar{x}$ играет роль относительной координаты в пределах КЭ: $0 \leq \bar{x} \leq 1$. Дифференциал x в этом случае

$$dx = l \cdot d\bar{x}. \quad (14)$$

С учетом выражений (2), (12) – (14) матрица функций форм (транспонирована для сокращения записи) имеет вид

$$[N]^T = S_z l^4 \begin{bmatrix} \frac{1-3\bar{x}^2+2\bar{x}^3}{EI_z l} + \frac{12-12\bar{x}}{A_{sy} Gl^3} & \frac{6\bar{x}^2-6\bar{x}}{EI_z l^2} \\ \frac{\bar{x}-2\bar{x}^2+\bar{x}^3}{EI_z} + \frac{6\bar{x}^2-6\bar{x}}{A_{sy} Gl^2} & \frac{1-4\bar{x}+3\bar{x}^2}{EI_z l} + \frac{12-12\bar{x}}{A_{sy} Gl^3} \\ \frac{12\bar{x}}{A_{sy} Gl^3} - \frac{2\bar{x}^3-3\bar{x}^2}{EI_z l} & -\frac{6\bar{x}^2-6\bar{x}}{EI_z l^2} \\ \frac{\bar{x}^3-\bar{x}^2}{EI_z} + \frac{6\bar{x}^2-6\bar{x}}{A_{sy} Gl^2} & \frac{12\bar{x}}{A_{sy} Gl^3} - \frac{2\bar{x}-3\bar{x}^2}{EI_z l} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Заметим, что поскольку перемещения при поперечном изгибе обуславливаются сразу двумя внутренними силовыми факторами с разными коэффициентами жесткости, элементы полученной матрицы являются функциями не только формы КЭ, но также зависят от геометрических характеристик поперечного сечения и упругих постоянных материала.

2. Матрица градиентов функций форм конечного элемента. Вектор деформаций в точке КЭ включает в себя две составляющие: осевую деформацию ε_x (возникающую за счет растяжения или сжатия волокон), и деформацию сдвига γ :

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x \\ \gamma \end{matrix} \right\}. \quad (16)$$

Уравнения Коши, связывающие деформации и перемещения в точке, из курса теории упругости [15, 16]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \gamma &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где u – продольное перемещение точки, возникающее из-за осевой деформации волокна балочного КЭ (рис. 4):

$$u = -y\theta = -y\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \gamma\right). \quad (18)$$

Знак «минус» в выражении взят потому, что при положительном угле θ деформации волокон, расположенных выше нейтральной оси, – отрицательные (сжатые волокна).

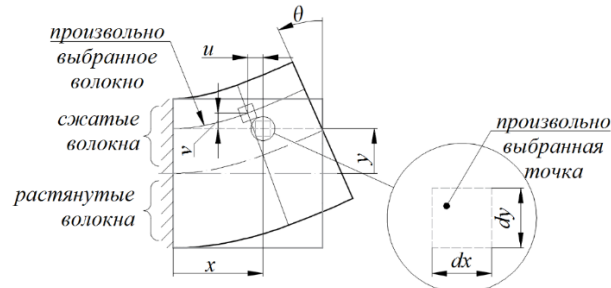


Рис. 4. Перемещения точки при изгибе

Тогда с учетом постоянства деформации сдвига по длине КЭ ($\gamma \neq \gamma(x)$):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= -y \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \gamma \right) = -y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \\ \gamma &= -\theta + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Последнее уравнение совпадает с выражением (5).

Уравнения Коши в матричной записи имеют вид

$$\{\varepsilon\} = [A] \cdot \{v\}, \quad (20)$$

где $[A]$ – матрица, содержащая операторы частных производных [15]:

$$[A] = \begin{bmatrix} -y \frac{\partial^2}{\partial x^2} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & -1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Подставляя в уравнения Коши (20) выражение (2), получим

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{v\}^e, \quad (22)$$

где $[B]$ – матрица «градиентов» функций форм:

$$[B] = [A] \cdot [N]; \quad (23)$$

$$[B] = S_z l^4 \begin{bmatrix} y \frac{6-12\bar{x}}{EI_z} l & y \left(\frac{4-6\bar{x}}{EI_z} l^2 + \frac{12}{A_{sy} G} \right) & -y \frac{6-12\bar{x}}{EI_z} l & y \left(\frac{2-6\bar{x}}{EI_z} l^2 - \frac{12}{A_{sy} G} \right) \\ \frac{-12}{A_{sy} G} & \frac{-6l}{A_{sy} G} & \frac{12}{A_{sy} G} & \frac{-6l}{A_{sy} G} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

3. Матрица жесткости конечного элемента. Вектор напряжений в точке КЭ включает в себя две компоненты (нормальное и касательное) и на основании закона Гука выражается через деформации, а также, с использованием (22), через вектор узловых перемещения КЭ:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau \end{Bmatrix}; \quad (25)$$

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} = [D] \cdot [B] \cdot \{v\}^e, \quad (26)$$

где $[D]$ – матрица упругости:

$$[D] = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Величины внутренних силовых факторов определяются через компоненты вектора напряжений:

$$M_z = \frac{I_z}{y} \sigma_x; Q_y = \tau A_{sy}. \quad (28)$$

Матрица жесткости КЭ на основании вариационно-энергетического принципа в МКЭ [5-9] определяется выражением

$$[K]^e = \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dV. \quad (29)$$

Тогда с учетом выражений (10) и (14)

$$[K]^e = l \int_0^1 \int_A [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dA_{sy} d\bar{x}. \quad (30)$$

Проведя вычисления, получим

$$[K]^e = S \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 + 12 \frac{EI_z}{A_{sy} G} & -6l & -2l^2 - 12 \frac{EI_z}{A_{sy} G} \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & -2l^2 - 12 \frac{EI_z}{A_{sy} G} & -6l & 4l^2 + 12 \frac{EI_z}{A_{sy} G} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Полученная матрица жесткости в точности совпадает с матрицей, полученной в работе [10], однако, в данном случае имеет обоснование на основе вариационно-энергетического подхода к МКЭ [9], матрицу функций формы и матрицу градиентов, полученные в явном виде, что позволяет определять перемещения, деформации, напряжения и внутренние силовые факторы конечного элемента в произвольной точке.

4. Оценка точности численного решения. Для оценки точности работы балочного КЭ Тимошенко рассмотрена задача изгиба балки постоянного поперечного сечения (рис. 5). Материал балки – сталь ($E = 210000$ МПа, $G = 80000$ МПа [1]), поперечное сечение – кольцо ($D = 100$ мм, $d = 95$ мм, $k_y = 1/2$, $I_z = 9,105 \cdot 10^5$ мм⁴, $A_{sy} = 383$ мм²), величина силы $F = 1000$ Н. Длины балок l приняты равными 100, 200, 300 и 400 мм. Эпюры внутренних силовых факторов показаны на рис. 5.

Аналитическое решение задачи проведено методом начальных параметров [1-4] от заделки (точка О) с использованием относительной координаты $\bar{x}$ из формулы (13) для удобства сравнения кривых прогибов независимо от длины балки. Для случая без учета сдвига прогиб балки определяется формулой

$$v = \frac{Fl^3}{EI_z} \left(\frac{\bar{x}^3}{6} - \frac{\bar{x}^2}{2} \right), \quad (32)$$

а для случая с учетом сдвига:

$$v = \frac{Fl^3}{EI_z} \left(\frac{\bar{x}^3}{6} - \frac{\bar{x}^2}{2} \right) - \frac{Fl}{GA_{sy}} \bar{x}. \quad (33)$$

Расчет МКЭ проведен при использовании в модели двадцати КЭ независимо от длины моделируемой балки.

Результаты расчета кривых прогибов показаны на рис. 5. При этом во всех случаях результаты расчета МКЭ в точности совпадают с аналитическим решением (33), что объясняется совпадением порядка полинома, аппроксимирующего перемещения КЭ и точного решения [1-4], поэтому кривые на рис. 5 неразличимы.

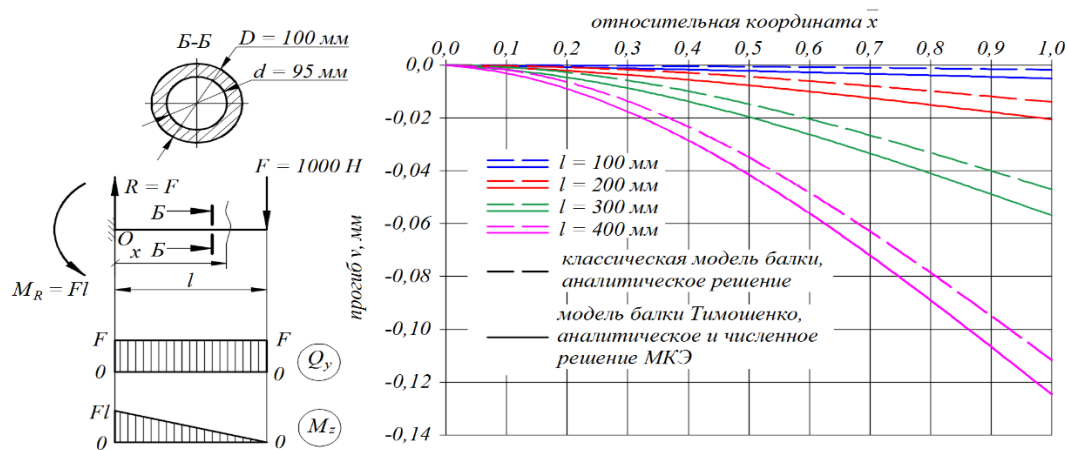


Рис. 5. Результаты аналитического и численного решения МКЭ задачи об изгибе балки

На рис. 6 представлены кривые расхождения прогибов балок классической модели и модели Тимошенко.

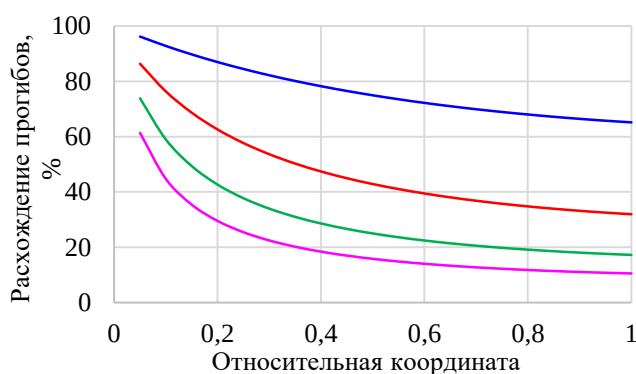


Рис. 6. Кривые расхождения прогибов балок

Величина относительного расхождения при этом определялась по формуле:

$$\Delta(\bar{x}) = \left| \frac{v_T(\bar{x}) - v(\bar{x})}{v_T(\bar{x})} \right| \cdot 100\%, \quad (34)$$

где $v_T(\bar{x})$ – функция прогиба балки Тимошенко; $v(\bar{x})$ – функция прогиба классической балки.

Из анализа представленных диаграмм видно, что относительный вклад сдвига в общий уровень прогиба наиболее существенно проявляется вблизи заделки и для всех исследованных балок превышает 50%. С удалением от заделки относительный вклад сдвига снижается, однако, все равно остается существенным. Можно также заметить, что величина расхождения прогибов во всех точках упругой оси меньше для более длинных балок, однако, во всех исследованных случаях величина расхождения остается выше 10%, что подчеркивает актуальность учета явления сдвига при использовании балочных КЭ.

Заключение. В работе показано, что учет дополнительной податливости сдвига в коротких балках существенно сказывается на уровне деформационных перемещений. Расхождение результатов расчета перемещений классического балочного КЭ и КЭ Тимошенко достигает 10% и более, что является неприемлемым в технических расчетах. Предложенная математическая модель балочного КЭ Тимошенко имеет высокую адекватность, что подтверждается аналитическим расчетом, и в точности аппроксимирует поле перемещений в задачах об изгибе балки сосредоточенными силами. Дополнительным преимуществом предложенной модели КЭ Тимошенко является сохранение размерности задачи по сравнению с классической моделью: учет дополнительной податливости производится без введения дополнительных узловых степеней свободы.

Список источников

1. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
2. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Том 1. Элементарная теория и задачи / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – 364 с.
3. Александров А.В. Сопротивление материалов: учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – 10-е изд. / В.И. Феодосьев. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
6. Образцов И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высш. шк., 1985. – 392 с.
7. Chen Z. Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005, 411 p.
8. Bathe K.J. Finite element procedures. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice hall, 1996, 1038 p.
9. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дис. на соискание ученой степени ...д-ра. техн. наук / Пыхалов Анатолий Александрович. – Москва, 2006. – 405 с.
10. Дудаев М.А. Матрица жесткости балки Тимошенко в конечноэлементном анализе динамического поведения роторных турбомашин / М.А. Дудаев // Вестник ИрГТУ, 2014. – № 6. – С. 59-65.
11. Дудаев М.А. Моделирование динамического поведения бруса при повторно-переменных нагрузках в лабораторных условиях / М.А. Дудаев, Д.В. Немитовская, А.Э. Верянская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2022. – № 2(74). – С. 22-32.
12. Янов Д.В. Концептуальное проектирование и оптимизация силового каркаса кабины грузового автомобиля / Д.В. Янов, Д.А. Скабин, С.Ю. Посохов [и др.] // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей", 2023. – № 1. – С. 67-81.
13. Ерофеев В.И. Динамическое поведение балок моделей Бернулли-Эйлера, Рэлея и Тимошенко, лежащих на упругом основании (сравнительный анализ) / В.И. Ерофеев, В.В. Кажаяев, Е.Е. Лисенкова, Н.П. Семерикова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. – № 5-3. – С. 274-278.
14. Абрамян А.К. Бегущие и стоячие волны балки Тимошенко / А.К. Абрамян, Д.А. Индейцев, В.А. Постнов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела, 2018. – № 2. – С. 101-109.
15. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.
16. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Машиностроение, 1975. – 500 с.

Дудаев Михаил Алексеевич. Иркутский государственный университет путей сообщения, старший преподаватель. Основные направления исследований автора: механика деформируемого твердого тела, динамика, метод конечных элементов. AuthorID: 688571, SPIN: 7575-9125, dudaev_ma@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 519.673

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.009

Mathematical model of the Timoshenko beam finite element

Mikhail A. Dudaev

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, dudaev_ma@irgups.ru

Abstract. There is physico-mathematics dependences conclusion of a finite element method for the Timoshenko beam finite element at the article, which is working by the shear bend at static and dynamic load conditions and allows more accurately approximate displacement field in comparison with the classical bending theory. It's shown, the softening of a finite element in this case is resultant of two components compose: “bending” caused by the bending moment action and “shear”, caused by the shear force action, and cross section angle is different from the beam elastic axis tangent angle; also the shear softening is appeared at short beams, where length is commensurable with height of the beam cross section. The mathematical model is built by the base of variational energy principle of the finite element method. For the indicated type of finite element, polynomial shape functions are obtained, which serve to approximate the displacement field, using differential dependencies known from the courses of resistance of materials and the theory of elasticity. There was gotten the gradient matrix, which allows

to determine the deformation vector by the values of the node translation pole and the stiffness matrix, which is had the key meaning at the solving of the system of linear algebraic equations of the finite element method, value of the stress vector and internal force factors at the shear bending, which allows to determine it by the nodes translations. For the finite element model was made convergence analysis of the numerical finite element method by relative to the analytical calculation and are shown results deviation when the model of pure bending and Timoshenko beam model were used.

Keywords: finite element, finite element method, Timoshenko beam, shear bend, shear, form functions, gradient matrix, stiffness matrix

References

1. Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniju materialov [Handbook of Strength of Materials]. Kiev, Naukova dumka [Scientific thought], 1988, 736 p.
2. Timoshenko S.P. Soprotivlenie materialov. Tom 1. Jelementarnaja teorija i zadachi [Strength of Materials. Volume 1. Elementary theory and problems]. Moscow, Nauka [Science], 1965, 364 p.
3. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivlenie materialov: ucheb. dlja vuzov [Strength of Materials: Textbook for universities]. Moscow, Vysshaya Shkola [Higher school], 2003, 560 p.
4. Feodos'ev. V.I. Soprotivlenie materialov: ucheb. dlja vuzov. – 10-e izd., Strength of Materials: Textbook for universities]. Moscow, MGTU imeni Baumana [MSTU named after Bauman], 1999, 592 p.
5. Zenkevich O. Metod konechnyh jelementov v tehnike [Finite element method at the technique]. Moscow, Mir, 1975, 542 p.
6. Obratcov I.F., Savel'ev L.M., Hazanov H.S. Metod konechnyh jelementov v zadachah stroitel'noj mehaniki letatel'nyh apparatov: ucheb. posobie dlja studentov aviac. spec. vuzov [Finite element method in problems of structural mechanics of aircraft: textbook allowance for aviation students specialist universities]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school], 1985, 392 p.
7. Chen Z. Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005, 411 p.
8. Bathe K.J. Finite element procedures. Upper Saddle river, New Jersey: Prntice hall, 1996, 1038 p.
9. Pykhalov A.A. Kontaknaia zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin [Contact problem of static and dynamic analysis of rotor assembly turbomachines]: dis. for the degree of Dr. tech. Sciences. Moscow, 2006, 405 p.
10. Dudaev M.A. Matrica zhestkosti balki Timoshenko v konechnojelementnom analize dinamicheskogo povedenija rotornykh turbomashin [Stiffness matrix of Timoshenko beam in the finite element analysis of dynamic behavior of turbo machines]. Vestnik IrGTU [Bulletin of ISTU], 2014, no. 6, pp. 59-65.
11. Dudaev M.A., Nemitovskaja D.V., Verjanskaja A.Je. Modelirovanie dinamicheskogo povedenija brusa pri povtorno-peremennykh nagruzkah v laboratornykh uslovijah [The bar dynamic behavior simulation by repeatable loading at the laboratory conditions]. Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 22-32.
12. Janov D.V., Skabin D.A., Posohov S.Ju. [et al.] Konceptual'noe proektirovanie i optimizacija silovogo karkasa kabiny gruzovogo avtomobilja [Concept design and optimisation of the load-bearing frame of the truck cabin]. Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antej" [Bulletin of the Concern VKO "Almaz-Antey".], 2023, no. 1, pp. 67-81.
13. Erofeev V.I., Kazhaev V.V., Lisenkova E.E., Semerikova N.P. Dinamicheskoe povedenie balok modelej Bernulli-Jejlera, Rjeleja i Timoshenko, lezhashhih na uprugom osnovanii (sravnitel'nyj analiz) [Dynamic behaviour of bernoulli-euler, rayleigh and timoshenko beam models, lying on an elastic foundation (comparative analysis)]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2011, no. 5-3, pp. 274-278.
14. Abramjan A.K., Indejev D.A., Postnov V.A. Begushhie i stojachie volny balki Timoshenko [Running and standing waves of Timoshenko beam] Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela [A Journal of Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids], 2018, no. 2, pp. 101-109.
15. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]: ucheb. dlja stroit. spec. vuzov. Moscow. Vysshaya shkola [Higher school], 1990, 400 p.
16. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teorija uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow, Mashinostroenie [Engineering], 1975, 500 p.

Dudaev Mikhail Alekseevich. Irkutsk State Transport University, Assistant Professor. The main areas of research of the author: mechanics of a deformable solid body, dynamics, finite element method. AuthorID: 688571, SPIN: 7575-9125, dudaev_ma@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 16.08.2023.

The article was submitted 05/23/2023; approved after reviewing 07/17/2023; accepted for publication 08/16/2023.

УДК 51-76; 519.714

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.010

Применение принципов инвариантности для моделирования биоинженерных объектов управления

Колесникова Светлана Ивановна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, skolesnikova@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты применения условий инвариантности как базового принципа синергетической теории управления к стохастическим объектам биоинженерной направленности: иммунологии, системы биологической очистки и простейшей модели экосистемы. Показано на трех нелинейных объектах управления, что предположения управляемости объекта в пространстве состояний и аналитического описания целевого инварианта системы являются достаточными условиями существования стохастического регулятора, минимизирующего дисперсию выходной макропеременной при выводе случайного объекта управления в целевое множество состояний.

Ключевые слова: стохастический объект иммунологии, система биологической очистки, экосистема, нелинейное управление биоинженерным объектом, инвариант системы, управление в пространстве состояний динамической системы

Цитирование: Колесникова С.И. Применение принципов инвариантности для моделирования биоинженерных объектов управления / С.И. Колесникова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 103-116. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.010.

Введение. Применение механистических принципов к сложным системам биохимической и биофизической природы восходит к результатам о независимости базовых принципов управления от конкретной природы объекта (см., напр., [1-5]). Свойство инвариантности математических преобразований лежит в основе универсального подхода теории управления к различным по своей сущности системам (химической, биологической и т.п.).

Цель работы – обобщить в определенной степени результаты исследований относительно применимости принципов синергетической теории управления (СТУ, [4, 5]) к задачам стабилизации возмущенных объектов биоинженерной направленности, описание которых включает биохимические и физические взаимовлияющие процессы, неустойчивые в определенных параметрических и начальных условиях.

Осуществимость аналитического вывода управления неустойчивыми объектами биохимической природы на основе СТУ обусловлена формализацией целевого закона поведения, доказательства устойчивости этого закона и решения вопроса его физической интерпретации (например, [6-12]).

Наблюдается геометрический рост числа публикаций на тему нелинейного моделирования биохимических и биомедицинских процессов, несмотря на критику прямых специалистов о сомнениях применимости математических моделей в реальных ситуациях (см., например, [12]).

Здесь важно разграничить сиюминутные задачи о назначении конкретного рецепта на конкретную ситуацию и задачи нахождения общих закономерностей – производственных правил уровня «если..., то...», получение которых предлагается осуществлять на основе СТУ и предоставляемой здесь техники исследования объектов стохастической природы [13].

В данном исследовании:

- 1) приведены формализованные постановки задач для класса математических моделей биоинженерной направленности (инфекционных заболеваний с запаздыванием, системы биоочистки сточных вод, простейшей модели экосистемы) как задач управления в условиях случайных и систематических возмущений (помех);

- 2) даны два алгоритма аналитического конструирования агрегированных регуляторов для трех неполно описанных биохимических объектов, описание которых содержит случайные возмущения по каналу управления;
- 3) приведены результаты численного моделирования систем управления для трех объектов из области биохимии, биомедицины, биофизики в условиях неполного их описания.

1. Предпосылки к конструированию нелинейных биоинженерных систем управления. Условием применения ниже перечисленных методов является их описание в форме дифференциальных, разностных уравнений (детерминированных или стохастических). Отметим некоторые достижения в области нелинейного управления, явившиеся мотивацией и основой двух алгоритмов конструирования управления объектами в условиях систематических и случайных возмущений.

1. Теория синергетического управления (СТУ) и ее базовый метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов [4], обеспечивающий робастное и энергосберегающее управление при выполнении условий управляемости, формализации инварианта целевой системы и в *предположении детерминированности исходного описания* математической модели. Примечательно, что параметры синтезируемого регулятора имеют прозрачно интерпретируемый смысл (длительность переходного режима), а сам процесс конструирования системы управления отражает физические особенности объекта и имеет прозрачную логику, опирающуюся на принципы теоретической механики (например, [14]).

2. Базовые положения стохастической теории управления и стратегии адаптивного управления [15, 16]. Условие применения – нормальность распределения возмущений, действующих по каналу управления.

3. Методы адаптивного управления нелинейными объектами на целевом многообразии (например, [17-19]).

4. Принципы физической теории управления [20], реализация которых осуществляется через: а) аналитическое задание целевых инвариантов конструируемой системы управления; б) через специального вида функционал качества, зависящего и от закона изменения состояния динамической системы и от свойств целевой системы.

5. Метод конструирования «гарантирующего регулятора» [5], или интегральной адаптации, подавляющий постоянные возмущения по каналу управления.

6. Положительные прецеденты конструирования систем управления на основе методов дифференциальных игр и принципа максимума Понтрягина [8, 9, 21].

7. Расширение метода СТУ – аналитического проектирования агрегированных регуляторов на случайные возмущения для дискретного описания [13, 22].

2. Общие постановки задачи управления многомерным нелинейным объектом в условиях неопределенности на основе СТУ.

2.1. Описание дискретного объекта управления. Математическая модель объекта – система стохастических разностных уравнений вида:

$$\mathbf{X}[t+1] = \mathbf{F}[t] + \mathbf{u}[t] + \xi[t+1] + c\xi[t], \mathbf{X}[0] = \mathbf{X}_0, \mathbf{Y}[t] = \mathbf{X}[t], t = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где $\mathbf{X}[t] = (X_1[t], \dots, X_n[t])^T$, $\mathbf{F}[t] := \mathbf{F}(\mathbf{X}[t]) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$, $m \leq n$ – векторные переменная состояния, нелинейная описывающая его функция и управление, соответственно; $\xi[t] \in \mathbb{R}^l$, $l \leq n$ – случайные попарно независимые величины, $\mathbf{E}\{\xi_i[t]\} = 0$, $\mathbf{D}\{\xi_i[t]\} = \sigma^2$, $i = \overline{1, l}$, $0 < c < 1$ – коэффициент затухания.

2.2. Описание непрерывного объекта управления. Математическая модель объекта – система дифференциальных уравнений вида:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}) + \zeta(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{X}_0, \mathbf{X} \in \mathbf{X}^{st} \subset R^n$ – множество начальных условий и допустимых состояний системы; $\mathbf{Y} \in R^n$ и $\mathbf{u} \in R^m, m \leq n$ – выход системы и управление, соответственно; $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ – непрерывная матрица; $\zeta(t)$ – неконтролируемое возмущение (ограниченная функция времени).

2.3. Постановка задачи управления для объектов (1), (2). Предполагается, что

1) для всех $\mathbf{X}_0, \mathbf{X} \in \mathbf{X}^{st}$ – системы (1) и (2) наблюдаемы и управляемы;
 2) желаемое поведения выхода системы формулируется в виде предельного соотношения $\psi(t) = \psi(\mathbf{Y}(t)) = 0, t \rightarrow \infty$; так, для задачи стабилизации удобно полагать $\psi(\mathbf{Y}(t)) = \mathbf{Y}(t) - \mathbf{Y}^*(t)$, где $\mathbf{Y}^*(t)$ – целевая траектория выхода, $\mathbf{Y}^*(t) = \text{const}$, в частности; $\psi(\mathbf{Y})$ – целевая макропеременная;

3) функционал качества определяется принципом направленной самоорганизации и минимального действия, зависит от макропеременной $\psi(t) = (\psi_1(t), \dots, \psi_m(t))^T$ и скорости ее изменения $\dot{\psi}(t)$ с коэффициентом пропорциональности, регулирующим длительность до достижения цели управления $\psi(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$ (установившегося режима);

$$\begin{aligned} \Phi_C &= \int_0^\infty \sum_{j=1}^m (w_j^2 \dot{\psi}_j^2 + \psi_j^2) dt \rightarrow \min, \\ \Phi_D &= \sum_{t=0}^\infty \sum_{j=1}^m (\alpha_j^2 (\psi_j)^2 + (\Delta \psi_j)^2) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3)$$

где нижние индексы в обозначениях Φ_D, Φ_C указывают на дискретную или непрерывную задачи, соответственно, а $\alpha_j, w_j \in R^m$ – параметры регуляторов с определенным в [4] физическим смыслом;

4) из всех решений уравнения Эйлера-Лагранжа для функционала (3) выбираются такие экстремали, которые обеспечивают асимптотически устойчивое поведение объекта управления в окрестности желаемого выхода систем (1) и (2) (см. ниже утверждение 1), при этом уравнение для определения структуры внешнего управления согласно описаниям (1), (2) и (3) имеет удобный для вывода управляющей функции линейный вид:

$$\mathbf{w}\dot{\psi}(t) + \psi(t) = 0, t \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_m)$ – вектор параметров регулятора, влияющий на скорость достижения цели управления и качество переходного процесса;

5) в постановке (1)-(3) конструируемые стратегии управления минимизируют дисперсию выходной макропеременной $\mathbf{D}\{\psi_j[t]\} \rightarrow \min, j = \overline{1, m}$.

Утверждение 1. Устойчивые экстремали, доставляющие глобальный минимум функционалу $\Phi_C = \int_0^\infty (\psi^2 + w^2 \dot{\psi}^2) dt$, подчиняются уравнению $w\dot{\psi} + \psi = 0, w = \text{const} > 0$ (равенство предельное при $t \rightarrow \infty$).

Доказательство утверждения 1 опирается на уравнение Эйлера-Лагранжа для функционала Φ_C : $2\psi - \frac{d}{dt}(2w^2 \dot{\psi}) = 0, w^2 \ddot{\psi} - \psi = 0$. Умножая последнее равенство на $\dot{\psi}$ и интегрируя

обе части, получим: $w^2\dot{\psi}^2 - \psi^2 = C$, $C = \text{const}$.

С учетом $\psi(t) = 0$, $\dot{\psi}(t) = 0$, $t \rightarrow \infty$, имеем $C = 0$. Тогда, $(w\dot{\psi} + \psi)(w\dot{\psi} - \psi) = 0$.

Свойством асимптотической устойчивости обладают решения уравнения $w\dot{\psi} + \psi = 0$.

Замечание 1. Уравнение (4), таким образом, есть следствие из уравнения Эйлера-Лагранжа.

Замечание 2. Поскольку процесс аналитического конструирования в общем детерминированном виде предполагает иерархичность вывода [4, 5] финальной формулы для управления, выражающуюся в решении ряда вариационных задач, реализующих последовательное сокращение фазового пространства для достижения многообразия вида: $\psi(t) = 0$, $t \rightarrow \infty$, то удобно эту последовательность задач обозначать парой $(\Phi_{D(C)}^s, \psi_s)_{s=\overline{1,e}}$,

где s – номер этапа алгоритма конструирования (табл. 1, рис. 1).

Здесь и далее обозначение индекса «*» указывает на знак определенности величины (известные значения, например, $\mathbf{x}^*$, или известный вид функции – $\Phi^*(\cdot)$, или целевой траектории $\mathbf{x}^*(t)$).

Таблица 1. Последовательная постановка двух вариационных задач в модели 2-го порядка, решение которых приводит к цели управления

Объект управления исходный	Конечная цель управления	Вариационная задача 1 (Φ_C^1, ψ_1)	Декомпозиция исходной системы	Вариационная задача 2 (Φ_C^2, ψ_2).
$n = 2$ $\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, $\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{u}$, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, $\mathbf{x}_i, \mathbf{u} \in R^3, i = 1, 2$.	$\psi := \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^*$, $\mathbf{u} : \psi \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$.	$\psi_1 = \mathbf{x}_2 - \Phi(\mathbf{x}_1) \rightarrow 0$, $n = 1$ $\Phi_C^1 = \Phi_C^1(\psi_1)$.	$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \Phi(\mathbf{x}_1))$, $u = u(\Phi)$.	$\psi_2 = \psi$, $\Phi = \Phi^*(\mathbf{x}_1)$, $\Phi_C^2 = \Phi_C^2(\psi_2)$.

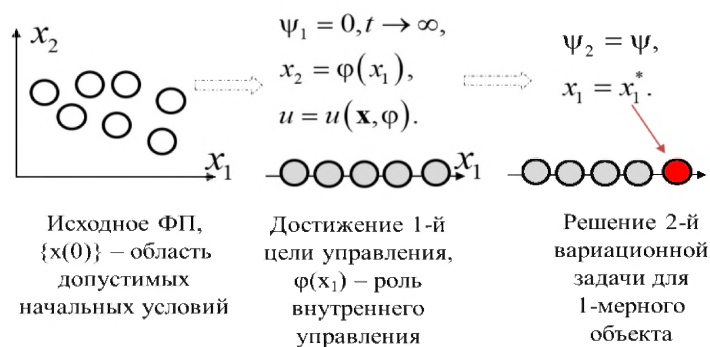


Рис. 1. Последовательное решение двух вариационных задач обеспечивает достижение цели управления (для модели 2-го порядка); ФП – фазовое пространство

В итоге двухэтапного синтеза (табл. 1) получаем сокращение фазового пространства с $n=2$ до множества $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*)$, где $\mathbf{x}_1^*$ – целевое и заданное значение, $\mathbf{x}_2^* = \mathbf{x}_2^*(t)$ – поведение нецелевой фазовой переменной, к которой «подтягивается» траектория $\mathbf{x}_2(t)$ при $x_1 \rightarrow x_1^*$ или при $\psi(t) \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$.

Замечание 3. В силу плохой формализуемости нелинейных объектов, возможных параметрических флуктуаций и случайных ошибок механизмов управления, формы задания целевого инварианта, а также самой постановки задачи асимптотической стабилизации объекта управления говорят не о достигаемом значении изображающей точки системы (состоянии объекта управления), а о некоторой ее окрестности (множестве состояний с предельным свойством $\psi(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$).

2.4. Примеры формализации инвариантов и постановки задач управления на их основе для объектов (1), (2). Общим для всех рассмотренных здесь моделей биоинженерной направленности является следующее: в описании математической модели присутствуют два уравнения типа «хищник-жертва», описывающих основные процессы, и придающие исходному объекту неустойчивые свойства при определенных сочетаниях параметров [23].

Введение в описание такого объекта функций, моделирующих возмущение как систематическое, так и случайное, с одной стороны, усложняет анализ свободного (без целенаправленного внешнего воздействия) поведения объекта, с другой – обеспечивает большую его физичность и увеличивает число степеней свободы для формирования (или обнаружения) новых инвариантов и управляющих воздействий для их достижения, что согласуется с принципом «невозможно хаотические системы прогнозировать, но можно ими управлять» [24].

Рассмотрим три системы со следующими математическими моделями.

Пример 1. Модель иммунологии [6] в обозначениях (2) как объект управления [10, 25, 26] примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (V, C, F, m)^T, \\ \mathbf{F}(\mathbf{X}) &= (f_1, f_2, f_3, f_4)^T, \\ f_1 &= a_1 - a_2 F, \quad f_2 = a_3 \xi(m) F(t - \tau) V(t - \tau) - a_5 (C - 1), \\ f_3 &= a_4 (C - F) - a_8, \quad f_4 = a_6 V - a_7 m, \\ \mathbf{G} &= (0, 0, 1, 0), \quad u = (0, 0, 1, 0)^T, \end{aligned} \quad (5)$$

Для описания модели объекта (5) использованы обозначения: $a_i, i = 1, \dots, 8$ – параметры модели; τ – время, требуемое для формирования плазматических клеток; V – концентрация антигенов (жертв); F – концентрация антител (хищников); C – концентрация плазматических клеток; m – относительная характеристика пораженного органа; $\xi(m)$ – функция, отвечающая за производительность выработки антител при поражении жизненно важных органов, в которой m^* – граница работоспособности органа; u – искомый закон регулирования потоком лекарственных средств, поступающих в больной орган.

Пример 2. Система анаэробной биологической очистки сточных вод (частное описание двухстадийной модели процесса очистки [27, 28]) согласно формату (2) имеет описание:

$$\begin{aligned} f_1 = \dot{S} &= \frac{Q}{V} (S_{in} - S) - k_1(\theta) B_1 - k_2(\theta) \frac{S B_1}{k_3(\theta) + S}, \quad f_2 = \dot{B}_1 = -\frac{Q}{V} B_1(t) + k_4(\theta) \frac{S B_1}{k_3(\theta) + S}, \\ f_3 = \dot{P} &= -\frac{Q}{V} P + k_5(\theta) B_1 + k_6(\theta) \frac{S B_1}{k_3(\theta) + S} - k_7(\theta) B_2 - k_8(\theta) \frac{P B_2}{k_9(\theta) + P}, \\ f_4 = \dot{B}_2(t) &= -\frac{Q}{V} B_2(t) + k_{10}(\theta) \frac{P B_2}{k_9(\theta) + P}, \quad f_5 = \dot{G} = -G + k_{11}(\theta) \frac{P B_2}{k_9(\theta) + P} \frac{k_{12}(\theta)}{k_{12}(\theta) + P}, \\ x_6 = \theta, \quad x_7 = Q, \quad \dot{\theta}(t) &= \zeta_1(t) + u_1(t), \quad \dot{Q}(t) = \zeta_2(t) + u_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^7$, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)^T = (S, B_1, P, B_2, G, \theta, Q)^T$ – вектор состояний (концентрации исходного субстрата, кислотогенной биомассы, промежуточных продуктов брожения, метаногенной биомассы, побочного продукта – газа метана, соответственно); θ, Q – рабочая температура в биореакторе и входной поток, соответственно; $k_i(\theta)$ – кинетические параметры процесса с известным законом изменения; u_1, u_2 – искомые законы регулирования по температуре и скорости входного потока, соответственно; ζ_1, ζ_2 – неизвестные функции.

Пример 3. Объект типа «хищник-жертва», моделирующий, в частности, простейшую экосистему [29-32], как было выше упомянуто, есть основная подсистема более сложных объектов (5), (6), поведение которой определяет их неустойчивые свойства:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= ax(t) - bx(t)y(t) + u(t) + \zeta(t), \\ \dot{y}(t) &= -cy(t) + mx(t)y(t),\end{aligned}\quad (7)$$

где x – количество жертв (фитопланктона – при моделировании водных водоемов, антигенов – в системах иммунологии); y – количество хищников (зоопланктона или антител, соответственно); a, b, c, m – положительные коэффициенты, характеризующие динамику питания и (межвидовые) взаимодействия между переменными системы; $\zeta(t)$ – неизвестная функция времени; $u(t) = u(x(t), y(t))$ – переменная управления, означающая возможность влиять на систему (1) через закон целенаправленного изменения характера динамики антигенов (например, через режим питания с параметром η):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= a(t)x(t) - bx(t)y(t), \\ \dot{y}(t) &= -cy(t) + mx(t)y(t), \\ \dot{a}(t) &= \eta u(t) + \zeta(t), x(0) = x_0 > 0, y(0) = y_0 > 0, \eta > 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Замечание 4. Описание (1) будет иметь место для объектов (5)-(8) после применения операции дискретизации (например, согласно схеме Эйлера), но, поскольку вопрос о равносильности решений (непрерывных и дискретных) будет зависеть от степени малости параметра дискретизации [33, 34], то, вообще говоря, выводимые системы управления будут иметь свои настраиваемые параметры оптимизации, существенно зависящие от интервала дискретности времени.

Постановка задачи управления на основе СТУ требует аналитической формулировки целевых макросостояний (табл. 2) и введения функционала качества.

3. Решение биоинженерных задач управления на принципах инвариантности целевых законов. В детерминированной постановке (возмущения и шумы отсутствуют) задачи 1-3 решались в работах [9, 21, 26]. Рассмотрим технику решения аналогичных задач в условиях неопределенности в описаниях (1), (2).

Таблица 2. Формализация некоторых целевых инвариантных трех биоинженерных объектов

Номер объекта	Наименование объекта	Форма инварианта или экспертно заданного целевого закона ($t \rightarrow \infty$)	Содержательный смысл целевого множества состояний
(5)	Модель иммунологии (простейшая).	$\psi = V - V^*, V^* \downarrow 0.$	Минимизация концентрации антигенов
(6)	Модель процессов анаэробной биологической очистки сточных вод в биореакторе-смесителе.	$\psi_1(t) = S(t) + P(t) - S^* \downarrow 0.$	Уменьшение концентрации органического загрязнения сточной воды до нормативного значения S^* .

		$\psi_2(t) = G(t) - G^* \rightarrow 0.$	Увеличение выхода биогаза.
(7)	Модель простейшей экосистемы	$\psi_3(y) = y(t) - y^* = 0.$ $\psi_4(y) = y(t) - \rho x(t) = 0.$	Стабилизация числа хищников. Обеспечение заданного баланса между хищниками и жертвами.

3.1. Алгоритм конструирования стохастического дискретного регулятора для объекта (1). Кратко опишем основные положения для 2-х шагового конструирования регулятора, пример использования которых ниже продемонстрируем на примере.

1. Определяем управление на основе метода аналитического проектирования агрегированных регуляторов $\tilde{\mathbf{u}}^A(n)$, $n \in \{0, 1, \dots\}$ в предположении, что случайные функции $\xi(n)$ фиксированы.

2. Выполняем операцию условного математического ожидания $\mathbf{u}(n) = \mathbf{E}\{\tilde{\mathbf{u}}^A(n) | \xi^n\}$, где $\xi^n = (\xi(0), \xi(1) \dots \xi(n))$.

3. Редуцируем описание (1) с учетом достигнутых предельных соотношений $\psi_1(n) = 0$, $n \rightarrow \infty$.

4. Находим зависимость $\xi(n) = f_\xi(\mathbf{x}(n), \psi(n))$, как функцию наблюдаемых состояний объекта на основе описания, полученного на шаге 3.

5. Исключаем переменную $\xi(n)$ из выражения $\hat{\mathbf{u}}(n) = \mathbf{E}\{\tilde{\mathbf{u}}^A(n) | \xi^n\}$. Конструирование стохастического дискретного регулятора закончено.

Утверждение 2. Управление $\mathbf{u} = \mathbf{u}_D$, если существует, обеспечивает выполнение требований:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{\psi(n+1) + \omega\psi(n)\} &= 0, \mathbf{D}\{\psi(n+1) + \omega\psi(n)\} \rightarrow \min, n \rightarrow \infty; \\ \mathbf{E}\{\Phi_D\} &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (9)$$

и асимптотическую устойчивость объекту управления (1) в среднем в окрестности $\mathbf{E}\{\psi(n)\} = 0$, $n \rightarrow \infty$.

3.2. Алгоритм конструирования непрерывного регулятора для объекта (2).

1. Расширение фазового пространства за счет перевода внешнего возмущения $\zeta(t)$ во внутреннюю дополнительную фазовую переменную $\mathbf{z}$:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}) + \mathbf{z}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t), \\ \dot{\mathbf{z}}(t) &= \eta\psi(t), \eta = \text{const} > 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициент пропорциональности η – параметр синтезируемой системы управления.

2. Вывод структуры синтезируемого регулятора реализуется методологией аналитического проектирования агрегированных регуляторов [4, 5] для замкнутой системы (10). При этом на конечном уровне иерархии синтеза используется макропеременная вида $\psi^{fin} = \psi + k\mathbf{z}$, $k = \text{const} > 0$, где ψ – целевая макропеременная из постановки задачи управления, и формулируется соответствующая вариационная задача $(\Phi_C^{fin}, \psi^{fin})$.

Итоговая система управления для модели (2) представляет собой совокупность уравнений объекта управления (3) и регулятора, полученного на основе расширенной системы (10).

Утверждение 3. Управление $\mathbf{u} = \mathbf{u}_c$, если существует, обеспечивает асимптотическую устойчивость в среднем объекту управления (2) в некоторой окрестности $\psi(t) = 0, t \rightarrow \infty$.

4. Решение задач управления объектами (5) - (7). Подробный вывод для читабельности рассмотрим для объекта 2-го порядка в общем виде, далее, применяя алгоритм конструирования для систем иммунологии и биоочистки сточных вод, приведем итоговые системы управления и представим графические интерпретации результатов численного моделирования.

4.1. Дискретный регулятор для системы 2-го порядка. Исходное описание для применения алгоритма 3.1 имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1(n+1) &= g_1(n), \quad g_1(n) = g_1(x_1(n), x_2(n)), \quad n \in \{0, 1, \dots\}, \\ x_2(n+1) &= g_2(n), \quad g_2(n) = g_2(x_1(n), x_2(n)) + u(n) + \xi(n+1) + c\xi(n), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{E}\{\xi(n)\} = 0$, $\mathbf{D}\{\xi(n)\} = \sigma_\xi^2$, $0 < c < 1, n \geq 0$.

Правые части описания (11) для объекта (7) после применения схемы Эйлера с параметром дискретизации $\tau_0 > 0$ имеют вид:

$$\begin{aligned} g_1(n) &= x(n) + \tau_0(ax(n) - bx(n)y(n)), \quad n \in \{0, 1, \dots\}, \\ g_2(n) &= y(n) + \tau_0(-dy(n) + mx(n)y(n)), \end{aligned}$$

а искомое управление будет определяться в виде $\tau_0 u(n)$.

Ставится задача 2.3. Применяя алгоритм 3.1, получаем

$$\begin{aligned} u_D(n) &= \tau_0^{-1} \left(\varphi(n+1) - w_1 \psi^{(1)}(n) - y(n) \right) - mx(n)y(n) + \\ &+ dy(n) - c\tau_0^{-1} \left(\psi^{(1)}(n) + w_1 \psi^{(1)}(n-1) \right), \\ \varphi(n) &= (bx(n)\tau_0)^{-1} \psi^*(n)(w_2 + 1) + \frac{a}{b}, \quad \psi^{(1)}(n) = y(n) - \varphi(n), \end{aligned} \quad (12)$$

где w_1, w_2 – параметры регулятора, обусловленные двумя вариационными задачами $(\Phi_D^i, \psi_i), i = 1, 2$.

Моделирование системы управления (11), (12) осуществлялось в следующих условиях:

$$\begin{aligned} a &= 3, \quad b = 2, 7, \quad d = 2, \quad m = 1, \quad w_1 = 0, 05, \quad w_2 = 0, 1, \quad x^* = 0, \\ \tau_0 &= 0, 01, \quad g = 0, 1, \quad \sigma_\xi = 0.5, \quad u_{\min} = 0, \quad u_{\max} = 4, \quad x(0) = 5, \quad y(0) = 3. \end{aligned}$$

Для обеспечения выполнения ограничений $u_{\min}, u_{\max}$ по управляющему воздействию использовалась функция отсечения $u := u_D$, если $u_{\min} \leq u_D \leq u_{\max}$.

На рис. 2 представлены кривые не только для системы (11), (12), но и для сравнения кривая, полученная для случая, когда в регулятор поступала сглаженные траектории на основе ядерной регрессии (Надарая-Ватсона).

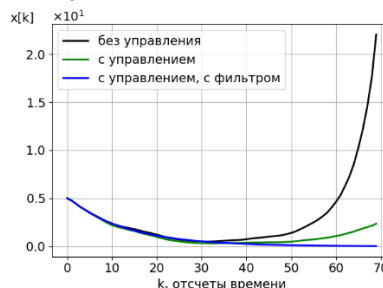


Рис. 2. График изменения численности антигенов в условиях шумов, нормально распределенных

4.2. Непрерывный регулятор для объекта 2-го порядка с неопределенностью в описании. Пусть исходное описание объекта имеет вид:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2), \quad \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + \zeta + u. \quad (13)$$

Пусть цель управления отражает задачу стабилизации $\psi(x_1) = x_1 - x_1^*$.

1. Переводим внешнее возмущение ζ во внутреннюю фазовую переменную z :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2), \quad \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + z + u, \\ \dot{z}(t) &= \eta\psi(t), \eta = \text{const} > 0. \end{aligned}$$

2. Выводим структуру регулятора из решения 1-й вариационной задачи (Φ_C^1, ψ_1) :

$$\Phi_C^1 = \int_0^\infty (\psi_1^2 + w_1^2 \dot{\psi}_1^2) dt \rightarrow \min, \psi_1 = x_2 - \varphi(x_1, z),$$

где $\varphi(x_1, z)$ – внутреннее управление, а согласно утверждению 1, уравнение для экстремалей для Φ_C^1 имеет вид: $w_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$, $w_1 = \text{const} > 0$. Получим

$$u = -w_1^{-1} \psi_1 - f_2(x_1, x_2) - z + \dot{\varphi}(x_1, z). \quad (14)$$

3. Используем макропеременную вида $\psi_2 = \psi + kz$, $k = \text{const} > 0$, и формулируем 2-ю вариационную задачу (Φ_C^2, ψ_2) с уравнением для экстремали: $w_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$, $w_2 > 0$. При этом будем использовать редуцированную систему с учетом предельного равенства $x_2 = \varphi(x_1, z)$: $\dot{x}_1 = f_1(x_1, \varphi(x_1, z))$, $\dot{z}(t) = \eta\psi(t)$. Из следствия уравнения Эйлера-Лагранжа для функционала Φ_C^2 получим уравнение относительно функции $\varphi(x_1, z)$: $w_2 f_1(x_1, \varphi(x_1, z)) + \psi_2 = 0$, $w_2 > 0$.

Синтез закончен, и итоговая система управления для модели (7) представляет собой совокупность уравнений объекта управления (13) и регулятора (14), полученного на основе алгоритма 3.2 (рис. 3):

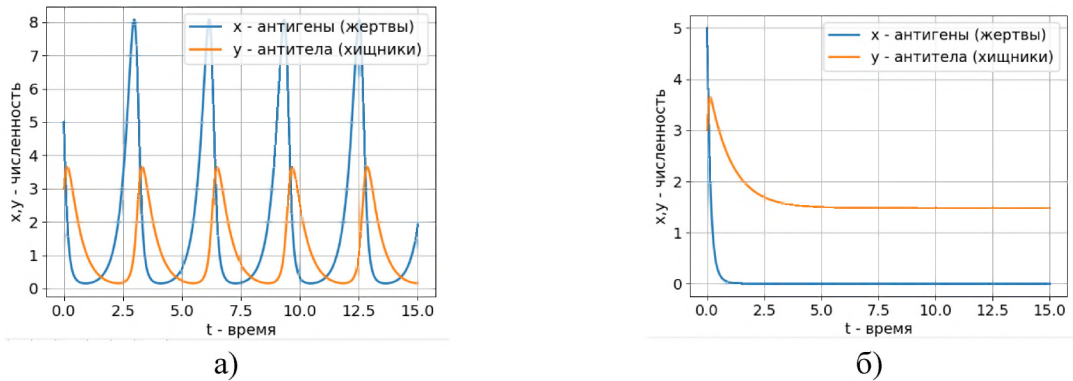


Рис. 3. График изменения численности жертв и хищников в свободном от управления состоянии – а) поведение системы (7) в условиях систематических постоянных возмущений и цели управления $\psi_4(y) = y(t) - \rho x(t) = 0, t \rightarrow \infty$

Условия моделирования для (7) $a = 3, b = 2.7, c = 2, m = 1, x_1(0) = x(0) = 5, x_2(0) = y(0) = 3$.

5. Численное моделирование систем управления биоинженерными объектами в условиях неопределенности. Подставляя в полученные формулы (11)-(14) явный вид функций $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$ и $g_1(\cdot)$, $g_2(\cdot)$ (из примеров 1, 2), получим системы управления (объект управления и регулятор), графическая интерпретация которых представлена на рис. 4-5.

Примем в модели (5) следующие значения параметров (рис. 4):

$$a_1 = 1,54, a_2 = 0,77, a_3 = 880, a_4 = 0,15, a_5 = 0,5, a_6 = 12,$$

$$a_7 = 0,12, a_8 = 8, V(0) = 10^{-6}, S(0) = 1, F(0) = 1, m(0) = 0,1, t_0 = 1, V^* = 0.$$

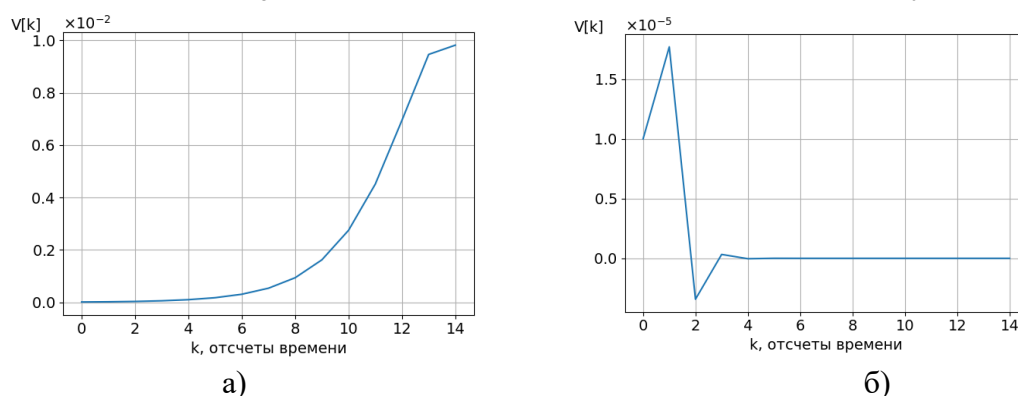


Рис. 4. График изменения численности антигенов в условиях систематических постоянных возмущений для модели иммунологии с параметрами фатального заболевания (5) а) – без управления; б) - с управлением (без ограничения на значения)

Примем в модели (6) следующие начальные значения параметров (рис. 5):

$$S(0) = S_{in}(0) = 10, B_1 = B_2 = 0.25, Q(0) = \theta(0) = 35, G(0) = P(0) = 0, V = 1000.$$

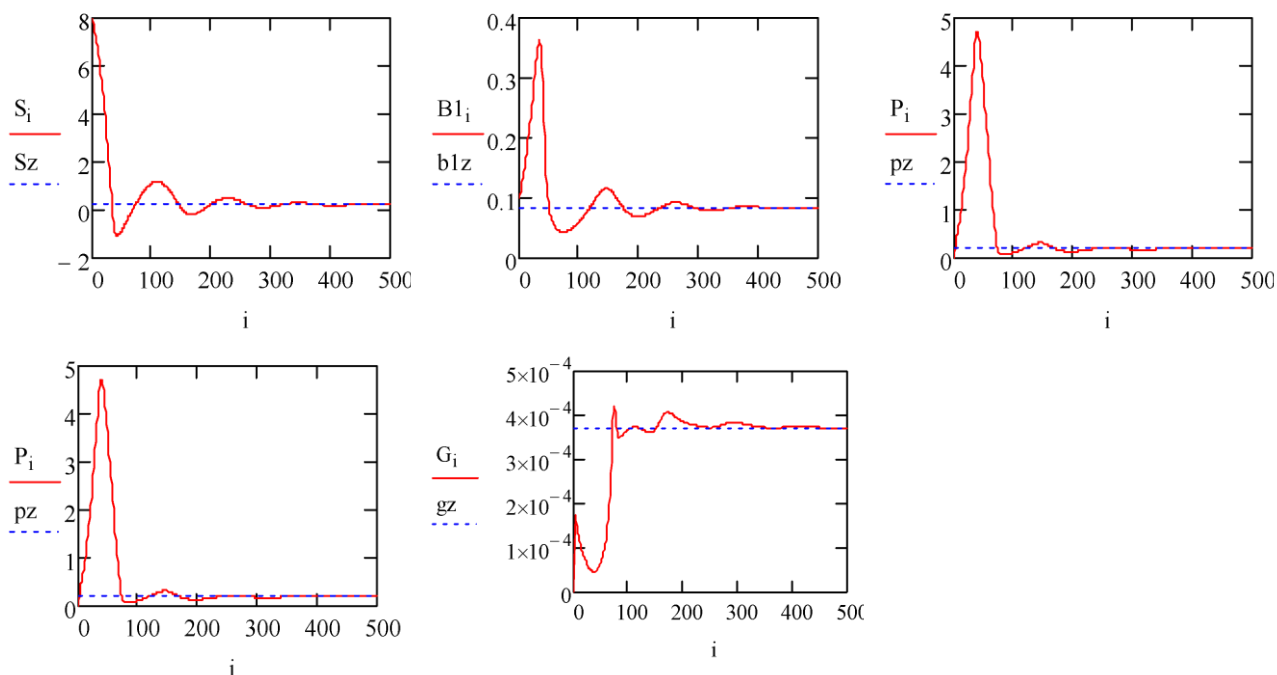


Рис. 5. Характер сходимости показателей к устойчивой стационарной точке при выбранном управляющем показателе для всех переменных системы (6)

Из рисунков (4), (5) следует работоспособность представленных методик, нуждающихся в развитии автоматизации процесса подбора параметров.

Заключение. Представленные в статье алгоритмы конструирования управления нелинейными объектами биоинженерной направленности обладают рядом преимуществ перед имеющимися подходами в открытой печати, а именно:

- 1) математический формализм проектирования закона вмешательства в динамику биохимических-биомедицинских-биофизических процессов теоретически не зависит от вида инварианта, логичен, инженерно прозрачен и позволяет его автоматизацию;
- 2) формирование различных целевых инвариантов позволяет выявление и изучение новых закономерностей (свойств) целевой системы;

- 3) положения 1) и 2) есть мотивация к формированию продукционных правил «...если, то...» как основы баз знаний, создание которых – первоочередная задача цифрового здравоохранения [35];
- 4) учет в модели управления систематических и случайных возмущений повышает надежность прогностического анализа поведения целевой системы при параметрических флуктуациях и неточностях их оценивания;
- 5) исследование управляемости модели в зависимости от формы внешних возмущений (гладких, случайных).

Полученные результаты могут быть полезны при создании и развитии существующих систем поддержки принятия решений.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00336).

Автор благодарит выпускника СПб ГУАП Авраменка В.А. и доцента ТГУ Цветницкую С.А. за проведение численного моделирования полученных систем управления.

Список источников

1. Анохин П.К. Избранные труды. Кибернетика функциональных систем / П.К. Анохин под ред. К.В. Судачкова. – М.: Медицина, 1998. – 475 с.
2. Prigogine, I. Stengers. Order out of chaos. Urss. 2022, 320 p.
3. Колмогоров А.Н. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме / А.Н. Колмогоров, И.Г. Петровский, И.С. Пискунов // Бюллетень МГУ. Секция А, 1937. – Т. 1. – № 6. – С. 1-25.
4. Kolesnikov A.A. Introduction of synergetic control. American control conference (ACC-2014), Portland, Oregon, USA, Institute of electrical and electronics engineers Inc., 2014, pp. 3013-3016.
5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза / А.А. Колесников. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.
6. Марчук Г.И. Математическое моделирование в иммунологии и медицине. Избранные Труды / Г.И. Марчук. – М.: РАН, 2018. – 650 с.
7. Li M., Zu J. The review of differential equation models of HBV infection dynamics. Journal of Virological Methods, 2019, vol. 266, pp. 103-113, DOI:10.1016/j.jviromet.2019.01.014.
8. Андриюхина В.Н. Гарантирующее управление в задаче применения антивирусных препаратов и результаты математического моделирования / В.Н. Андриюхина, В.Н. Афанасьев // Проблемы управления, 2012. – № 3. – С. 41-48.
9. Болодурина И.П. Оптимальное управление динамикой взаимодействия иммунной системы человека с инфекционными заболеваниями / И.П. Болодурина, Ю.П. Луговская // Вестник Самарского государственного университета. Естественно-научная серия, 2009. – Т. 8(74). – С. 138-153.
10. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Synergetic control algorithms for a multidimensional biomedical model under conditions of nonrandom and random disturbances using kernel regression, Journal of Physics: Conference Series, 2021, DOI:10.1088/1742-6596/1745/1/012094.
11. Vieira L.S., Laubenbacher R.C. Computational models in systems biology: standards, dissemination, and best practices. Current Opinion in Biotechnology, 2022, vol. 75, DOI:10.1016/j.copbio.2022.102702.
12. Kareva I. et al. Predator-prey in tumor-immune interactions: A wrong model or just an incomplete one? Frontiers in immunology, 2021, vol. 12, available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fimmu.2021.668221>. (accessed: 06/13/2023).
13. Kolesnikova S.I. Synthesis of controller for vector plant, based on integral adaptation method for disturbance suppression. Differential equations and control processes, 2022, no. 3, pp. 27-45, available at: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/22303-jdecp-kolesnikova.pdf>. (accessed: 06/13/2023).
14. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики и задачи управления движениями материальных систем / А.С. Галиуллин // Дифференц. уравнения, 1972. – Т. 8. – № 9. – С. 1535-1541.
15. Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления / К.Ю. Острем. – М.: Мир, 1973. – 326 с.
16. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive control. New York, Dover Publications, 2008, 590 p.
17. Astolfi A., Karagiannis D., Ortega R. Nonlinear and adaptive control with applications springer, 2008, p. 290.
18. Kokotović P.V., Arcak M. Constructive nonlinear control: progress in the 90's. Proceedings of 14th IFAC World Congress, Beijing, China, 1999, p. 49-77.

19. Иваницкий Г.Р. Самоорганизующаяся динамическая устойчивость биосистем, далёких от равновесия / Г.Р. Иваницкий // Успехи физических наук, 2017. – Т. 187. – № 7. – С. 757-784.
20. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления / А.А. Красовский // Автоматика и телемеханика, 1990. – №. 1. – С. 3-28.
21. Чирков М.В. Методика моделирования управления процессом иммунного ответа в условиях неопределённости: диссертация на соискание ученой степени канд. ф-м. наук / Чирков Михаил Владимирович, Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2017. – 133 с.
22. Kolesnikova S.I. A multiple-control system for nonlinear discrete object under uncertainty. Optimization Methods and Software, 2018, vol. 34, no. 3, pp. 578-585, DOI:10.1080/10556788.2018.1472258.
23. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций / А.Д. Базыкин. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 368 с.
24. Ott E., Grebogi C., Yorke J. Controlling chaos. Phys. Rev. Lett., 1990, vol. 64 (11), pp. 1196-1199.
25. Marchuk G.I., Petrov R.V., Romanyukha A.A., Bocharov G. Mathematical model of antiviral immune response. I. Data analysis, generalized picture construction and parameters evaluation for hepatitis B. Journal of theoretical biology, 1991, vol. 151(1), pp. 1-40, DOI:10.1016/S0022-5193(05)80142-0.
26. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Application of stochastic control method on manifold at immunology problem. Journal of Physics, Conference Series, 2020, 1515 (5), DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052015.
27. Колесникова С.И. Динамические стратегии управления качеством мониторинга сложного биоинженерного объекта / С.И. Колесникова, А.А. Фоменкова // Информационно-управляющие системы, 2023. – № 2. – С. 51-60. – DOI:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60.
28. Kolesnikova S., Fomenkova A. Formalization of data exchange between the systems of monitoring and control over an anaerobic bioreactor. IEEE, 2022, pp. 550-555, DOI:10.1109/SUMMA57301.2022.9973923 2022.
29. Singh B.K., Chattopadhyay J., Sinha S. The role of virus infection in a simple phytoplankton zooplankton system. Journal of Theoretical Biology, 2004, vol. 231, iss. 2, pp. 153-166, DOI:10.1016/j.jtbi.2004.06.010.
30. Романюха А.А. Математические модели в иммунологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний. / А.А. Романюха // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 296 с.
31. Lotka A.J. Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems. Proc. Natl. Acad. Sci., USA, 1920, pp. 410-415.
32. Трубецков Д.И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней / Д.И. Трубецков // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика, 2011. – Т. 19. – № 2. – С. 69-88.
33. Ljung L. Analysis of recursive stochastic algorithms. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, vol. 22, no. 4, pp. 551-575.
34. Derevitsky D.P., Fradkov A.L. Two models for analyzing dynamics of adaptation algorithms. Autom. Remote Control, 1974, vol. 35, no. 1, pp. 59-67.
35. Ugalmugle S., Swain R. Digital health market size, 2020-2026. 2020, available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-health-market> (accessed: 06/13/2023).

Колесникова Светлана Ивановна. Д.т.н., профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Института вычислительных систем и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Научные интересы включают нелинейное управление с неопределённостью в описании, интеллектуальный анализ данных. AuthorID: 150312, SPIN: 1928-8626, ORCID: 0000-0001-7158-2747, skolesnikova@yandex.ru, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

UDC 51-76; 519.714

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.010

Application of the principles of invariance for modeling bioengineering control objects

Svetlana I. Kolesnikova

St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Russia, St. Petersburg, skolesnikova@yandex.ru

Abstract. The results of applying the invariance conditions as the basic principle of the synergetic control theory to stochastic objects of bioengineering orientation: immunology, biological treatment systems and the simplest ecosystem model are presented. It is shown on three nonlinear control objects that the assumptions of controllability of the object in the state space and the analytical description of the target invariant of the system

are sufficient conditions for the existence of a stochastic controller that minimizes the variance of the output macrovariable when the random control object is output to the target set of states.

Keywords: stochastic object of immunology, biological treatment system, ecosystem, nonlinear control of a bioengineering object, system invariant, state-space control of a dynamic system

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00336).

References

1. Anokhin P.K. Izbrannyye trudy. Kibernetika funktsional'nykh sistem [Selected works. Cybernetics of Functional Systems]. Ed. K.V. Sudakov, M. Meditsina, 1998, 475 p.
2. Prigogine I., Stengers I. Order out of chaos. Urss. 2022, 320 p.
3. Kolmogorov A.N., Petrovsky I.G., Piskunov I.S. Issledovaniye uravneniya diffuzii, soyedinennoy s vozrastaniyem kolichestva veshchestva, i yego primeneniye k odnoy biologicheskoy probleme [Investigation of the diffusion equation associated with an increase in the amount of a substance, and its application to a biological problem]. Byulleten' MGU. Sektsiya A, [Bulletin of Moscow State University, Section A], 1937, vol.1, no. 6, pp. 1-25.
4. Kolesnikov A.A. Introduction of synergetic control. American Control Conference (ACC-2014), Portland, Oregon, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 3013-3016.
5. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskiye metody upravleniya slozhnyimi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods of complex systems management: theory of system synthesis]. Moscow, Librocom [Librokom], 2012, 240 p.
6. Marchuk G.I. Matematicheskoye modelirovaniye v immunologii i meditsine [Mathematical modeling in immunology and medicine]. Izbrannyye Trudy [Selected Works], Moscow, RAN, 2018, 650 p.
7. Li M., Zu J. The review of differential equation models of HBV infection dynamics. Journal of Virological Methods, 2019, vol. 266, pp. 103-113, DOI:10.1016/j.jviromet.2019.01.014.
8. Andryukhina V.N., Afanasiev V.N. Garantiruyushcheye upravleniye v zadache primeneniya antivirusnykh preparatov i rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya [Guaranteed control in the problem of using antiviral drugs and the results of mathematical modeling]. Problemy upravleniya [Problems of management], 2012, no. 3, pp. 41-48.
9. Bolodurina I. P., Lugovskaya Yu. P. Optimal'noye upravleniye dinamikoym vzaimodeystviya immunnogo sistema cheloveka s infektsionnymi zabolevaniyami [Optimal control of the dynamics of interaction between the human immune system and the infectious diseases]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Estestvenno-Nauchnaya Seriya [Bulletin of the Samara State University. Natural science series], 2009, vol. 8(74), pp. 138-153.
10. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Synergetic control algorithms for a multidimensional biomedical model under conditions of nonrandom and random disturbances using kernel regression, Journal of Physics: Conference Series, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012094.
11. Vieira L.S., Laubenbacher R.C. Computational models in systems biology: standards, dissemination, and best practices. Current Opinion in Biotechnology, 2022, vol. 75, DOI:10.1016/j.copbio.2022.102702 (accessed: 06/13/2023).
12. Kareva I. et al. Predator-prey in tumor-immune interactions: A wrong model or just an incomplete one? Frontiers in immunology, 2021, vol. 12, available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fimmu.2021.668221>. (accessed: 06/13/2023)
13. Kolesnikova S.I. Synthesis of controller for vector plant, based on integral adaptation method for disturbance suppression. Differential equations and control processes, 2022, no. 3, pp. 27-45, available at: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/22303-jdecp-kolesnikova.pdf>. (accessed: 06/13/2023)
14. Galiullin A.S. Obratnyye zadachi dinamiki i zadachi upravleniya dvizheniyami material'nykh sistem [Inverse problems of dynamics and problems of motion control of material systems]. Differents. Uravneniya [Differ. Equations], 1972, vol. 8, no. 9, pp. 1535-1541.
15. Ostrem K.Yu. Vvedeniye v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya [Introduction to stochastic control theory]. Moscow, Mir, 1973, 326 p.
16. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive control. New York, Dover Publications, 2008, 590 p.
17. Astolfi A., Karagiannis D., Ortega R. Nonlinear and adaptive control with applications. Springer, 2008, 290 p.
18. Kokotović P.V., Arcak M. Constructive nonlinear control: progress in the 90's. Proceedings of 14th IFAC World Congress, Beijing, China, 1999, pp. 49-77.
19. Ivanitsky G.R. Samoorganizuyushchayasya dinamicheskaya ustoychivost' biosistem, dalokikh ot ravnovesiya [Self-organizing dynamic stability of biosystems far from equilibrium]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical sciences], 2017, vol. 187, no. 7, pp. 757-784.
20. Krasovskiy A.A. Problemy fizicheskoy teorii upravleniya [Problems of control physical theory] Avtomatika i telemekhanika [Automatic and telemechanics], 1990, no. 1, pp. 3-28.

21. Chirkov M.V. Metodika modelirovaniya upravleniya protsessom immunnogo otveta v usloviyakh neopredelennosti [Methodology for modeling the control of the immune response process under conditions of uncertainty]. Dissertation for the degree of Cand. f-m. Sciences, Perm State National Research University, Perm, 2017, 133 p.
22. Kolesnikova S.I. A multiple-control system for nonlinear discrete object under uncertainty. Optimization Methods and Software, 2018, vol. 34, no. 3, pp. 578-585, DOI:10.1080/10556788.2018.1472258.
23. Bazykin A.D. Nelineynaya dinamika vzaimodeystvuyushchikh populyatsiy. [Nonlinear dynamics of interacting populations]. M., Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy [Izhevsk, Institute of Computer Science], 2003, 368 p.
24. Ott E., Grebogi C., Yorke J. Controlling chaos. Phys. Rev. Lett., 1990, vol. 64 (11), pp. 1196-1199.
25. Marchuk G.I., Petrov R.V., Romanyukha A.A., Bocharov G. Mathematical model of antiviral immune response. I. Data analysis, generalized picture construction and parameters evaluation for hepatitis B. Journal of theoretical biology, 1991, vol. 151(1), pp. 1-40, DOI:10.1016/S0022-5193(05)80142-0.
26. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Application of stochastic control method on manifold at immunology problem. Journal of Physics, Conference Series, 2020, 1515 (5), DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052015.
27. Kolesnikova S.I. Dinamicheskiye strategii upravleniya kachestvom monitoringa slozhnogo bioinzhenernogo ob"yektu [Dynamic strategies for control over the quality of monitoring of a complex bioengineering object]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 51-60, DOI:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60.
28. Kolesnikova S.; Fomenkova A. Formalization of data exchange between the systems of monitoring and control over an anaerobic bioreactor. IEEE, 2022, pp. 550-555, DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973923 2022.
29. Singh B.K., Chattopadhyay J., Sinha S. The role of virus infection in a simple phytoplankton zooplankton system. Journal of Theoretical Biology, 2004, vol. 231, iss. 2, pp. 153-166, DOI:10.1016/j.jtbi.2004.06.010.
30. Romanyukha A.A. Matematicheskiye modeli v immunologii i epidemiologii infektsionnykh zabolevaniy [Mathematical models in immunology and epidemiology of infectious diseases]. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy [Knowledge Lab], 2015, 296 p.
31. Lotka A.J. Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems. Proc. Natl. Acad. Sci., USA, 1920, pp. 410-415.
32. Trubetskov D.I. Fenomen matematicheskoy modeli Lotki-Vol'terry i skhodnykh s ney [Phenomenon of Lotka-Volterra mathematical model and similar models]. Izvestiya Vysshih Uchebnykh Zavedeniy. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika [Applied Nonlinear Dynamics], 2011, vol. 19, no. 2, pp. 69-88, DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-2-69-88.
33. Ljung L. Analysis of recursive stochastic algorithms. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, vol. 22, no.4, pp. 551-575.
34. Derevitsky D.P., Fradkov A.L. Two models for analyzing dynamics of adaptation algorithms. Autom. Remote Control, 1974, vol. 35, no. 1, pp. 59-67.
35. Ugalmugle S., Swain R. Digital health market size, 2020-2026. 2020, available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-health-market> (accessed: 06/13/2023).

Kolesnikova Svetlana Ivanovna. Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Technologies and Software Engineering, Institute of Computing Systems and Programming, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Scientific interests include non-linear control with uncertainty in the description, data mining. AuthorID: 150312, SPIN: 1928-8626, ORCID: 0000-0001-7158-2747, skolesnikova@yandex.ru, 190000, St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya, 67, lit. A.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 11.07.2023; принята к публикации 18.08.2023.

The article was submitted 06/13/2023; approved after reviewing 07/11/2023; accepted for publication 08/18/2023.

УДК 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011

Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора

Дунаев Михаил Павлович, Довудов Сарфароз Умедович

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск, mdunaev10@mail.ru

Аннотация. В статье представлена функциональная схема системы управления электроприводом шагающего экскаватора. Разработаны структурно-параметрические модели электроприводов постоянного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления. Проведено моделирование электроприводов постоянного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления в среде Matlab/Simulink. Приведено сравнение результатов моделирования систем управления.

Ключевые слова: система управления, электропривод, моделирование

Цитирование: Дунаев М.П. Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 117-123. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011.

Введение. Производственные комплексы по добыче минерального сырья, включающие мощные шагающие экскаваторы разных типов, составляют важную часть современного промышленного оборудования производственных и транспортных систем [1]. Производительность промышленного оборудования производственных систем во многом зависит от качества управления электроприводами (ЭП) постоянного и переменного тока, являющихся основой силового электрооборудования (ЭО) шагающих экскаваторов (ШЭ) и управляемых с помощью современных полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторов и силовых полупроводниковых модулей [2-4].

В настоящее время самыми востребованными способами управления ЭО ШЭ по праву можно считать способы управления с применением систем импульсно-фазового управления (СИФУ) и широтно-импульсного управления (ШИУ), которые могут обеспечить необходимые параметры управления ЭО ШЭ [5-8].

Тем не менее у способа управления с СИФУ можно отметить ряд недостатков, касающихся его эффективности: сравнительно низкое быстродействие системы управления, сравнительно низкий коэффициент мощности, значительные искажения формы напряжения питающей сети [9]. Способ ШИУ также имеет ряд недостатков, а именно: сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя и значительные потери мощности при включении и выключении полупроводниковых ключей управляемого силового преобразователя [10-18].

Повышению эффективности промышленного оборудования шагающих экскаваторов может способствовать применение частотно-импульсного управления (ЧИУ) [19].

Однако следует отметить, что этот способ управления ЭО ШЭ до сих пор полностью не изучен.

Моделирование электропривода шагающего экскаватора. На рис.1 приведена разработанная функциональная схема ЭП подъема ковша ШЭ постоянного тока, где БЗС – блок задания угловой скорости, РН – регулятор напряжения, РТ – регулятор тока, БТО – блок токоограничения, ВГ – возбудитель генератора, Г – генератор постоянного тока, Д – два двигателя постоянного тока, МП – механизм подъема ковша, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения. В качестве ВГ может выступать тиристорный преобразователь (ТПВГ) или импульсный преобразователь (ИПВГ).

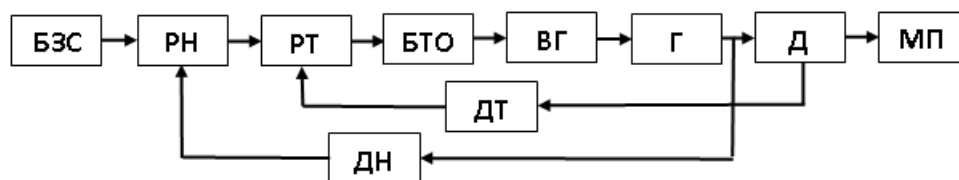


Рис. 1. Функциональная схема ЭП подъема ШЭ постоянного тока

Для получения максимальной производительности работы ШЭ требуется оптимизировать настройки системы управления ЭП. Система управления настраивается на модульный оптимум (МО) отдельно по контурам регулирования тока и напряжения. Настройка на МО обеспечивает необходимую компенсацию большой постоянной времени в контуре регулирования и позволяет получить следующие характеристики переходного процесса: статическая ошибка $\delta < 10\%$; время переходного процесса при пуске $t_{пп} = 4,7 T_\mu$, где T_μ - суммарная малая некомпенсируемая постоянная времени контура; максимальное перерегулирования $\sigma_{\max} < 4,3\%$.

Структурная схема контура регулирования тока показана на рис. 2, где $U_{зг}$ – сигнал задания тока, $K_{ТПВГ}$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя возбуждения генератора, $T_{ТПВГ}$ – постоянная времени СИФУ тиристорного преобразователя возбуждения генератора, K_G – коэффициент усиления генератора, T_1 – постоянная времени обмотки возбуждения генератора, T_2 – постоянная времени обмотки якоря генератора, $T_{яц}$ – постоянная времени якорной цепи двигателя, $K_{от}$ – коэффициент обратной связи по току, $K_{дт}$ – коэффициент датчика тока.

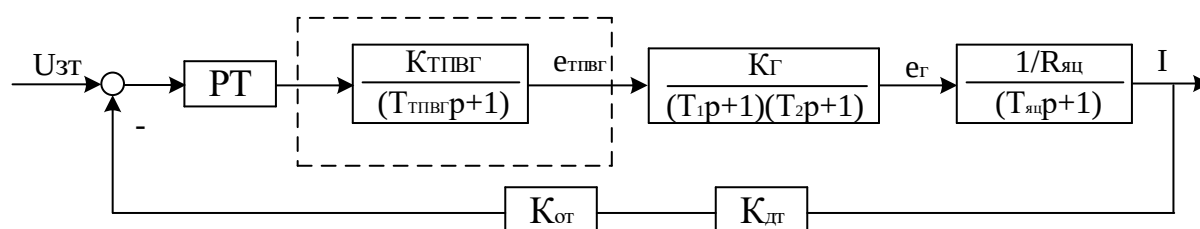


Рис. 2. Структурная схема контура тока

Коэффициент усиления РТ будет равен:

$$K_{РТ} = \frac{T_1 \cdot R_{яц}}{K_{ТПВГ} \cdot K_G \cdot K_T \cdot \alpha_T \cdot T_{\mu Г}} \cdot \left(1 + \left(\frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $T_{\mu Г}$ – суммарная малая постоянная времени контура тока.

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока будет иметь вид:

$$W(p)_{T.ЗМ} = \frac{\frac{1}{K_{ТО}} \cdot \frac{1 + \left(\frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2}}{\frac{2 \cdot T_{\mu Г}^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2} \cdot p^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu Г}^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)} \cdot p + 1}. \quad (2)$$

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока имеет вид:

$$W(p)_{T.3AM} = \frac{1}{\frac{K_T}{2 \cdot T_{\mu TЭ}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu TЭ} \cdot p + 1}}. \quad (3)$$

Оптимизация контура напряжения также проводится на МО. Этот контур включает в себя оптимизированный замкнутый контур тока.

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура напряжения имеет вид:

$$W(p)_{H.3AM} = \frac{1}{\frac{K_H \cdot 2 \cdot C}{2 \cdot T_{\mu H}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu H} \cdot p + 1}}, \quad (4)$$

где $T_{\mu H}$ – суммарная малая постоянная времени контура напряжения, C – постоянная двигателя.

Структурно-параметрическая модель ЭП подъема ШЭ с СИФУ представлена на рис. 3, а переходные процессы показаны на рис. 4.

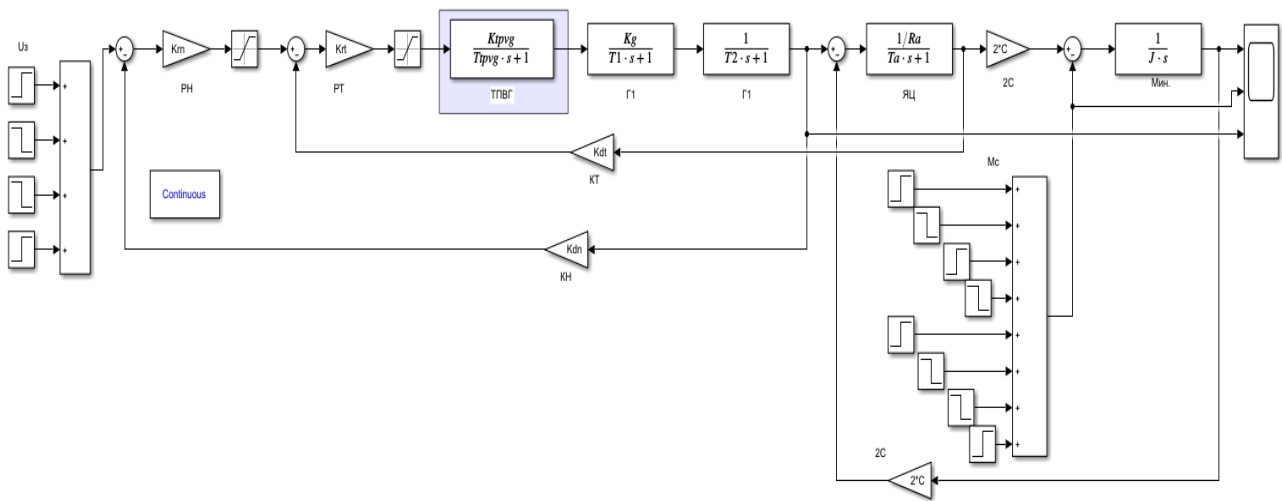


Рис. 3. Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с СИФУ

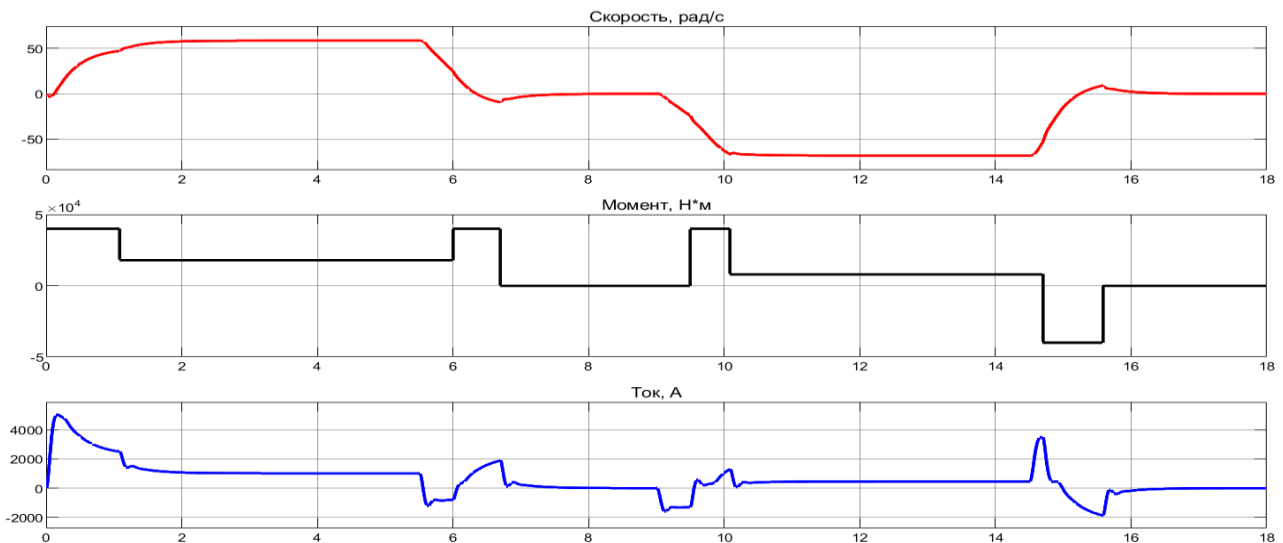


Рис. 4. Переходные процессы в ЭП ШЭ с СИФУ по угловой скорости, моменту и току

После настройки системы управления на МО и компенсации больших постоянных времени быстродействие системы ЭП определяется оставшимися некомпенсированными малыми постоянными времени T_μ .

Как известно, у способа управления с СИФУ, реализованного в блоке ТПВГ (рис.3), наблюдается сравнительно низкое быстродействие системы управления, обусловленное величиной постоянной времени СИФУ тиристорного преобразователя возбуждения генератора $T_{ТПВГ} = 0,00167$ с.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать способ ЧИУ, имеющий значительно меньшую постоянную времени в системе управления $T_{ИПВГ} = 0,0005$ с.

Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с ЧИУ (блок ИПВГ), реализованная в среде Matlab/Simulink и настроенная на модульный оптимум, представлена на рис. 5, а переходные процессы показаны на рис. 6.

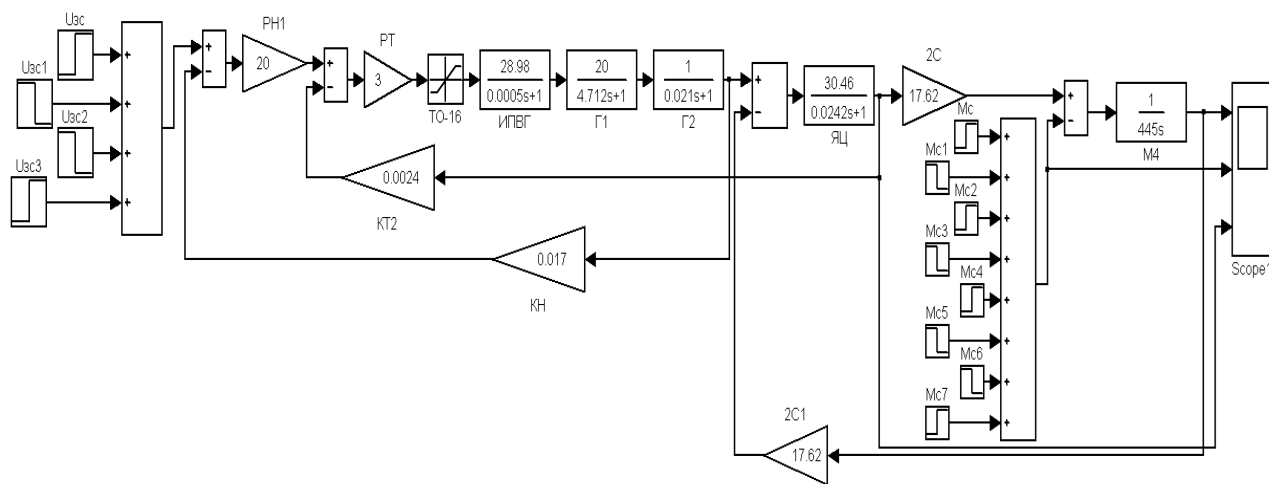


Рис. 5. Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с ЧИУ

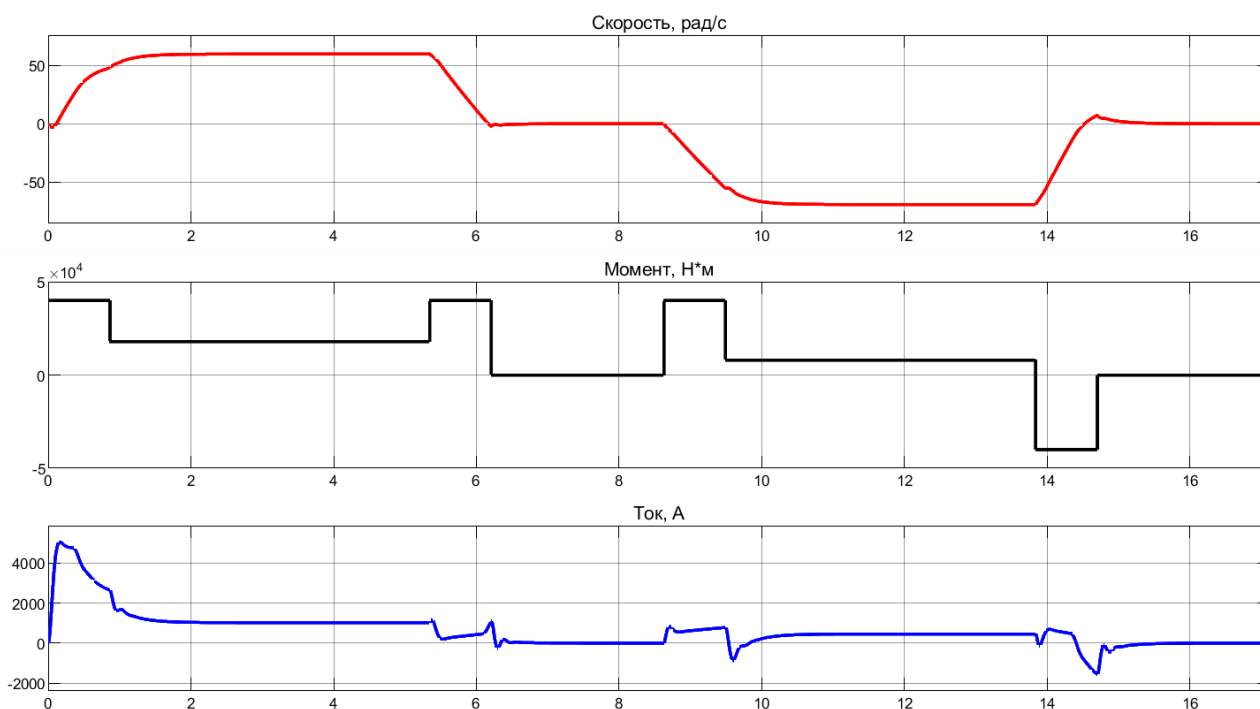


Рис. 6. Переходные процессы в ЭП ШЭ с ЧИУ по угловой скорости, моменту и току

Сравнение результатов моделирования угловой скорости ЭП ШЭ с СИФУ и ЧИУ представлено на рис. 7.

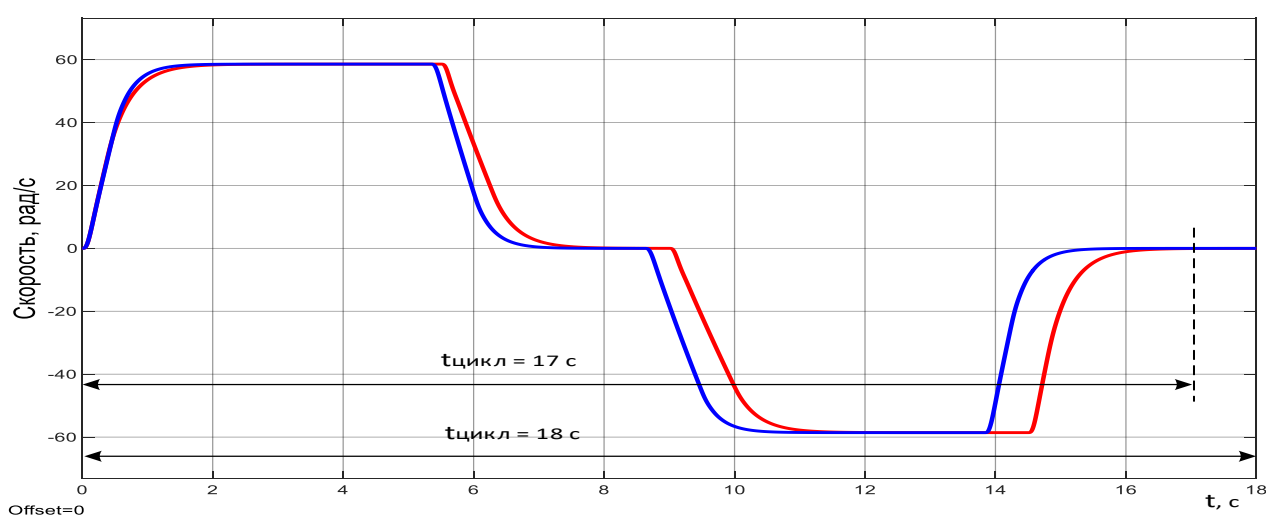


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования ЭП ШЭ с СИФУ (1) и ЧИУ (2)

Как видно из рис.7, за счет ускорения динамических процессов в ЭП ШЭ способ ЧИУ обеспечивает сокращение цикла работы ШЭ на 1 с, что увеличивает производительность работы ШЭ на 5 %.

Заключение. Проанализировано современное состояние разработок в области ЭП ШЭ и предложен способ повышения производительности ШЭ. Разработаны функциональная и структурно-параметрические модели ЭП ШЭ, позволяющие определять динамические характеристики ЭО ШЭ. Реализованы модели ЭП ШЭ с СИФУ и ЧИУ в среде Matlab/Simulink. Показано, что использование способа ЧИУ позволит на 5 % увеличить производительность ШЭ.

Список источников

1. Кругликов О.В. Разработка, производство и применение энергоэффективных электрических машин и приводов / О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров, С.В. Пискунов // *Электротехника*, 2015. – № 3. – С. 4-8.
2. Жемеров Г.Г. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей / Г.Г. Жемеров, В.В. Ивахно, О.И. Ковальчук // *Электротехника и электромеханика*, 2011. – № 4. – С. 21-28.
3. Дунаев М.П. Моделирование электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // *Междунар. научно-практическая конференция «Энергетика региона: состояние и перспективы развития»: труды.* - Душанбе: Изд-во ТТУ, 2019. – С.101-106.
4. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи / С.Г. Герман-Галкин. – Л.: Энергия, 1979. – 96 с.
5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th international conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp. 768-773.
6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilna O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using matlab/simulink subsystem. *electrical, control and communication engineering*, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
7. Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordiienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho universytetu*, 2020, no. (2), pp 82-88.
8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tiewu Kang. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. *Energy Procedia*, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102.
9. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами / М.П. Дунаев. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 103 с.
10. Bai Baodong, Chen Dezhi. Inverter IGBT loss analysis and calculation, 2013 IEEE International conference on industrial technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI:10.1109/ICIT.2013.6505733.

11. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J., Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European conference on power electronics and applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
12. Дунаев М.П. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Всерос. научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири»: труды. – № 1. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – С. 3-6.
13. Shahin A., Payman A., Martin J., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. “Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter,” IECON 2010 - 36th Annual conference on IEEE industrial electronics society, Glendale, AZ, 2010, pp. 373-378.
14. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. Electronics and electrical engineering, 2011, no. 7(113), pp. 9-14, ISSN 1392 – 1215.
15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International Conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.
16. Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Вестник ИрГТУ, 2020. – № 2. – С. 345-355.
17. Shirahama H., Muto T. A Novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
18. Zhu Y., Xiao M., Su X. et al. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied Sciences, 2020, no. 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539.
19. Дунаев М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении., 2020. – № 2. – С.134-143.

Дунаев Михаил Павлович. Доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. AuthorID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Довудов Сарфароз Умедович. ассистент Иркутского национального исследовательского технического университета. ORCID: 0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011

Simulation of the electric drive control system of a walking excavator

Mikhail P. Dunaev, Sarfaro U. Dovudov

National Research Irkutsk State Technical University,

Russia, Irkutsk, mdunaev10@mail.ru

Abstract. The article presents a functional diagram of the control system of the electric drive of a walking excavator. Structural-parametric models of DC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system have been developed. Simulation of DC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system in the Matlab/Simulink environment was carried out. A comparison of the results of modeling control systems is given.

Keywords: control system, electric drive, simulation

References

1. Kruglikov O.V., Makarov L.N., Piskunov S.V. Razrabotka, proizvodstvo i primeneniye energoefektivnykh elektricheskikh mashin i privodov [Development, production and application of energy efficient electrical machines and drives], Elektrotehnika [Electrical Engineering], 2015, no. 3, pp. 4-8.
2. G.G. Zhemerov, V.V. Ivakhno, O.I. Koval'chuk. Raschetmoshchnosti poter' i temperatury struktury tranzistorno-diodnykh moduley pri komp'yuternom modelirovanii preobrazovateley [Calculation of power losses and temperature of the structure of transistor-diode modules in computer modeling of converters] Elektrotehnika i

- elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics], 2011, no. 4, pp. 21-28, ISSN 2074-272X.
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy shirotno-impul'snogo preobrazovatelya [Modeling a pulse-width converter circuit]. In: Povysheniye effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyakh Sibiri: Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Improving efficiency of electric energy production and use in the conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22-26 April 2019, Irkutsk], Irkutsk, Irkutsk National Research Technical university, 2019, vol. 1, pp. 3-6.
 4. German-Galkin S.G. Shirotno-impul'snyye preobrazovateli [Pulse-width converters]. L.: Energy, 1979, 96 p.
 5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th International Conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp 768-773, DOI: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
 6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using matlab/simulink subsystem. Electrical, control and communication engineering, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
 7. Plakhtii O.A., Nerubatskiy V.P., Hordiienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020, no. (2), pp 82-88.
 8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tieyu Kang. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. Energy Procedia, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102.
 9. Dunaev M.P. Rezonansnyye inventory dlya upravleniya elektroprivodami [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk, IrGTU [Irkutsk State Technical University], 2004, 103 p.
 10. Bai Baodong, Chen Dezhi. Inverter IGBT loss analysis and calculation, 2013 IEEE International Conference on industrial technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505733.
 11. Feix G., Dieckerhoff, S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
 12. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy chastotno-impul'snogo preobrazovatelya [Simulation of the frequency-pulse converter circuit]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15), pp. 144-152.
 13. Shahin A., Payman A., Martin J., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter, IECON 2010 - 36th Annual conference on IEEE industrial electronics society, Glendale, AZ, 2010, pp. 373-378.
 14. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. Electronics and electrical engineering, 2011, no. 7(113), pp. 9-14, ISSN 1392 – 1215.
 15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International Conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.
 16. Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters]. Vestnik IrGTU [ISTU bulletin], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355.
 17. Shirahama H., Muto T. A Novel Power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
 18. Zhu Y., Xiao M., Su X. [et al.] Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied Sciences, 2020, no. 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539.
 19. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye odnofaznogo dvukhurovneвого avtonomnogo invertora napryazheniya s chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2 (18), pp. 134-143.

Dunaev Mikhail Pavlovich. Doctor of technical sciences, professor, Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Dovudov Sarfaroz Umedovich. Assistant, Irkutsk National Research Technical University. ORCID: 0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 06/08/2023; approved after reviewing 08/21/2023; accepted for publication 09/18/2023.

УДК 517:519.8: 004: 63

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.012

О трех моделях линейного программирования применительно к производству аграрной продукции

Иваньо Ярослав Михайлович, Ковадло Илья Андреевич,

Федурин Нина Ивановна

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,

Россия, Иркутск, *iytex@rambler.ru*, *kovadlo95@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматриваются три модели линейного программирования для оптимизации производства аграрной продукции в условиях неоднородности земель. Первая модель описывает сочетание отраслей растениеводства и животноводства. Вторая модель параметрического программирования позволяет планировать производство аграрной продукции на определенную перспективу. Третья модель характеризует ситуацию оптимизации получения аграрной продукции в условиях рисков. Приведены примеры реализации разработанных моделей.

Ключевые слова: моделирование производства, аграрная продукция, математическое моделирование, математическое моделирование

Цитирование: Иваньо Я.М. О трех моделях линейного программирования применительно к производству аграрной продукции / Я.М. Иваньо, И.А. Ковадло, Н.И. Федурин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С.124-135. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.012.

Введение. Современная экономика аграрного сектора все больше требует от руководителей умения видеть перспективы, принимать эффективные стратегические управленческие решения в сложившихся рискованных условиях хозяйствования [1]. Более того, специфические особенности самого сельского хозяйства объективно требуют учета факторов неопределенности при планировании сельскохозяйственного производства. Эффективным инструментом для решения сложных задач является моделирование разных сторон процессов экономики. Теорией и практическими аспектами применения задач оптимизации, в том числе задач линейного программирования, и их решения занимались многие исследователи [2 - 10].

При планировании производства аграрной продукции можно использовать задачи параметрического программирования при условии связи коэффициентов при неизвестных и (или) правых частях ограничений с параметром или параметрами [11 - 13].

Помимо этого, для более качественного учета факторов производственного риска хорошо себя зарекомендовали оптимизационные стохастические модели, описанные в работах [14 - 17]. В исследованиях [13, 18, 19, 20] обосновано значительное влияние на производство аграрной продукции качества и плодородия земель и их неоднородность.

Научная новизна работы заключается в обобщении трех видов моделей, которые связаны между собой благодаря возможности выделения в многолетних рядах некоторых производственно-экономических характеристик многоуровневых трендов [21], позволяющих моделировать усредненные, благоприятные и неблагоприятные ситуации производства аграрной продукции [22]. В отличие от многоуровневых моделей, приведенных в работе [22], эти модели учитывают неоднородность сельскохозяйственных угодий, обладающих разным плодородием [13, 20]. Кроме того, с помощью трендов последовательностей нижних уровней рядов определяются вероятностные события [21], которые учитываются при оптимизации производства аграрной продукции в условиях больших ущербов. Другими словами, в отличие от ранее разработанных моделей, предложенные модели отражают неоднородность земель в сочетании с особенностью иерархии рядов характеристик, описывая разные условия производства аграрной продукции. Практическое значение такого подхода к планированию связано с улучшением моделирования реальной ситуации за счет уменьшения неопределенности характеристик моделей. Преимущество предлагаемых моделей относительно других [6, 8, 9,

14] заключается в возможности привлечения для решения задачи значительно большего объема информации за счет современных средств мониторинга, определяющих состояние разных аспектов деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя.

Целью работы является описание трех моделей линейного программирования для оптимизации производства аграрной продукции в условиях неоднородности земель: сочетание отраслей растениеводства и животноводства; планирование аграрного производства на основе прогностических зависимостей и учета вероятных потерь урожая.

Материалы и методы. При построении математических моделей и решении задач привлечены следующие материалы: 1) производственно-экономические характеристики, описывающие производство аграрной продукции; 2) сведения о земельных ресурсах, их механическом, почвенном, химическом и биологическом составе; 3) данные об урожайности зерновых культур и другие. Для решения поставленных задач использованы методы математического программирования, теории вероятностей и математической статистики [2, 3, 23]. Дополнительно к этому осуществлялось выделение из рядов производственно-экономических характеристик последовательностей верхних и нижних уровней [21] согласно методу [24] для построения многоуровневых трендов. В группу событий выделены значения, располагающиеся ниже тренда последовательностей низких уровней рядов производственно-экономических характеристик. Для вероятностной оценки событий формировались ряды разностей фактических данных и значений тренда последовательности нижних уровней ряда. В качестве закона распределения использовано распределение Пирсона III типа.

При решении задач на примерах использованы данные условного сельскохозяйственного предприятия Усольского района и многолетние сельскохозяйственные характеристики муниципального образования за 1996 – 2022 годы.

Решением задачи параметрического программирования являются оптимальные планы объемов производства аграрной продукции на краткосрочную перспективу для усредненных и благоприятных ситуаций при максимизации прибыли.

При реализации модели стохастического программирования определялись оптимальные планы с учетом вероятных событий при максимизации прибыли. Другими словами, рассматривалось планирование в условия больших потерь урожая.

Решение задач по выделению многоуровневых трендов осуществлялось с помощью разработанного программного комплекса «Многоуровневое прогнозирование показателей аграрного производства», в создании которого участвовал один из авторов статьи. Что касается решения задач математического программирования, то для этого использован разработанный программный комплекс «Управление рисками при планировании аграрного производства» (Иванько Я.М., Петрова С.А., 2016), в котором применена библиотека `lp_solve`. Оба программных комплекса прошли тестирование и апробацию и получили свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты. Для оптимизации производства аграрной продукции были разработаны три вида математических моделей, учитывающих неоднородность земельных ресурсов по плодородию.

В этих моделях в качестве целевой функции могут быть использованы доход или прибыль организации, муниципального района, природно-климатической зоны от деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей. Ограничением задачи математического программирования являются земельные, производственные и топливные ресурсы, соответствующие показателю продуктивности участков пашни.

Для решения задачи оптимизации производства аграрной продукции с учетом неоднородности земель разработаны три математические модели.

Линейная модель оптимизации сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции. Максимальная прибыль, получаемая от производства растениеводческой и животноводческой продукции равна:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} c_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} c_{klv} x_{klv} \quad (1)$$

где c_{ijs} – прибыль, получаемая с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s (руб./га); c_{klv} – прибыль, получаемая от производства единицы продукции вида v по технологии l от животного вида k (руб./гол.); x_{ijs}, x_{klv} – неизвестные задачи линейного программирования с размерностями га и гол..

Ограничения по ресурсам имеют вид:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijs} \leq A_s, \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} x_{klv} \leq B_k, \quad (3)$$

где A_s и B_k – имеющиеся в распоряжении предприятия земельные ресурсы для производства продукции s (га) и возможности по содержанию сельскохозяйственных животных вида k (гол.).

Неравенство по производству заданного объема продукции выглядит так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \beta_{klv} x_{klv} \geq D, \quad (4)$$

где α_{ijs} и β_{klv} – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га) и объемы производства животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k (т/гол.); D – заданный объем получения продукции (т).

Ограничение по использованию трудовых ресурсов:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} w_{klv} x_{klv} \leq E, \quad (5)$$

где d_{ijs} и w_{klv} – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j (чел.ч/га) и животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k (чел. ч/гол.); E – возможности использования трудозатрат (чел. ч).

Связь отраслей растениеводства и животноводства посредством введения ограничения по обеспеченности животных элементами питания:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} (u_{z i j s} \alpha_{i j s} + \lambda_{z i j s} m_{i j s}) x_{i j s} \geq \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} b_{z k l v} x_{k l v}, \quad (6)$$

где $u_{z i j s}$ – содержание элемента питания z в единице кормовой продукции, полученной от производства растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j (кг/т); $\alpha_{i j s}$ – объем производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га); $\lambda_{z i j s}$ – содержание элемента питания z в единице побочной кормовой продукции (кг/т); $m_{i j s}$ – выход с единицы площади побочной кормовой продукции, полученной от производства кормов s с единицы площади поля i на участке j (т/га); $b_{z k l v}$ – минимальная потребность в элементе питания z единицы поголовья от производства животноводческой продукции v по технологии l животного вида k (кг/гол.). Причем $z \in Z$, где Z – количество элементов питания.

Очевидно, что неизвестные модели должны быть неотрицательными:

$$x_{ijs}, x_{klv} \geq 0. \quad (7)$$

Параметрическая модель оптимизации производства аграрной продукции. Модель (1) – (7) может быть преобразована при условии, что коэффициенты при неизвестных и/или ограничения связаны с параметрами. В этом случае задачу линейного программирования можно

преобразовать в задачу параметрического программирования. Опыт показывает, что во многих случаях трудозатраты на производство единицы продукции и урожайность сельскохозяйственных культур, которые входят в левые части ограничений, могут быть описаны значимыми трендами или авторегрессионными выражениями [11].

В этом случае целевая функция (1) останется неизменной. Аналогичным образом не претерпят преобразования ограничения (2), (3), (6) и (7). Что касается неравенств (4) и (5), то они примут следующий вид.

Неравенства по производству продукции и затратам ресурсов:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs}(t) x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \beta_{klv}(t) x_{klv} \geq D(t), \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs}(t) x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} w_{klv}(t) x_{klv} \leq E(t), \quad (9)$$

где $\alpha_{ijs}(t)$ и $\beta_{klv}(t)$ – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га) и объемы производства животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k (т/гол.); $D(t)$ – объем получения продукции (т), связанный с t ; $d_{ijs}(t)$ и $w_{klv}(t)$ – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s (чел. ч/га) с единицы площади поля i на участке j и животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k (чел. ч/гол.); $E(t)$ – возможности использования трудозатрат (чел. ч) в зависимости от t . В неравенствах (8) и (9) t – параметр, характеризующий время.

Приведенная модель является однопараметрической и предполагает, что некоторые коэффициенты левых частей ограничений характеризуются значимыми трендами. Решение задачи (1) – (3), (6) – (9) позволяет определять оптимальные планы, соответствующие максимальной прибыли в зависимости от параметра t . Поскольку с помощью тренда можно получить прогностические значения, их использование в экстремальной задаче позволяет с определенной точностью планировать производственные показатели.

Стохастическая модель оптимизации производства аграрной продукции с учетом рисков производства аграрной продукции. Помимо неоднородности участков земельных ресурсов в модели учитываются риски, связанные с неблагоприятными климатическими условиями и экстремальными событиями, а также вредителями и болезнями растений, заразными и незаразными болезнями сельскохозяйственных животных. Возможно сочетание биологических и гидрометеорологических событий в течение одного года.

С одной стороны, учет неоднородности земель способствует повышению уровня адекватности описания реальной ситуации при производстве аграрной продукции. Однако увеличение доходов сельскохозяйственного товаропроизводителя при правильном использовании разных по продуктивности участков не гарантирует отсутствия потерь, вызванных неблагоприятными гидрометеорологическими и биологическими событиями. Эти события с разной степенью влияют на производственно-экономические показатели хозяйства, муниципального района и природно-климатической зоны, включающей в себя группу районов. Особый интерес вызывает моделирование производства аграрной продукции при формировании редкого события.

Максимальный доход от производства растениеводческой и животноводческой продукции запишем как:

$$P[f(X, \varphi, \psi) \geq \chi], \quad (10)$$

где X – вектор неизвестных модели, включающий в себя x_{ijs} , x_{klv} – искомые переменные с размерностями га и гол., φ и ψ – векторы случайных коэффициентов, в которые входят φ_{wijs}^p – вероятностная оценка потерь с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s от

экстремального явления вида w (т/га) и ψ_{wklv}^p – вероятностная оценка потерь от производства единицы продукции вида v по технологии l от животного вида k , вызванные экстремальным явлением вида w (руб./гол.), P – вероятность; χ – некоторый порог целевой функции;

Ограничения по ресурсам:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijs} \leq A_s - \Phi_w^p, \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} x_{klv} \leq B_k - \Psi_w^p, \quad (12)$$

где A_s и B_k – имеющиеся в распоряжении предприятия земельные ресурсы (га) и возможности по содержанию сельскохозяйственных животных (гол.); Φ_w^p – вероятные потери площадей (га), подверженных экстремальным явлениям w , Ψ_w^p – вероятные потери продукции животноводства как результата влияния события w (гол.).

Неравенство по производству продукции можно записать как:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \beta_{klv} x_{klv} - \sum_{w \in W} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \omega_{wijs}^p x_{ijs} - \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} \xi_{wklv}^p x_{klv} \geq D, \quad (13)$$

где α_{ijs} и β_{klv} – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га) и объемы производства животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k (т/гол.); ω_{wijs}^p – вероятные потери продукции с единицы площади поля i на участке j вида s , вызванные событием w (т/га); ξ_{wklv}^p – вероятные потери производства животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k под воздействием события w (т/гол.); D – заданный объем получения продукции (т).

Ограничение по использованию трудовых ресурсов запишем в виде:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} w_{klv} x_{klv} \leq E + \sum_{w \in W} M_w^p, \quad (14)$$

где d_{ijs} и w_{klv} – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j (чел. ч/га) и животноводческой продукции v по технологии l вида k (чел. ч/гол.); E – возможности использования трудозатрат (чел. ч); M_w^p – дополнительные трудозатраты по смягчению потерь от воздействия события w (чел. ч).

Связь отраслей растениеводства и животноводства посредством введения ограничения по обеспеченности животных элементами питания:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} (u_{zjis} \alpha_{ijs} + \lambda_{zjis} m_{ijs} - u_{zjis} \rho_{ijs}^p - \lambda_{zjis} \theta_{ijs}^p) x_{ijs} \geq \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} b_{zklv} x_{klv}, \quad (15)$$

где u_{zjis} – содержание элемента питания z в единице кормовой продукции, полученной от производства растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j (кг/т); α_{ijs} – объем производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га); λ_{zjis} – содержание элемента питания z в единице побочной кормовой продукции s , полученной с поля i на участке j (кг/т); m_{ijs} – выход с единицы площади побочной продукции, полученной от производства кормов s с единицы площади поля i на участке j (т/га); b_{zklv} – минимальная потребность в элементе питания z единицы поголовья от производства животноводческой продукции v по технологии l животного вида k (кг/гол.); ρ_{ijs}^p – вероятные (p) потери продукции с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s

(т/га); θ_{ijs}^p – вероятные (p) потери побочной продукции с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s (т/га), причем $z \in Z$.

Неотрицательность неизвестных модели описывается неравенством (7).

Информационное обеспечение моделей оптимизации производства аграрной продукции. Информационное обеспечение моделей оптимизации производства аграрной продукции включает в себя сбор, хранение и анализ данных. Для обеспечения модели достоверными сведениями можно использовать средства дистанционного зондирования земли, показатели датчиков сельскохозяйственной техники и мониторинга разных видов животных.

Важным этапом является сбор данных о физических, химических и биологических свойствах почвы, агроклиматических условиях, о развитии биомассы растений и урожая и других факторах, влияющих на результаты производства. Кроме того, необходимы экономические данные, связанные с затратами на производство, доходами, ценами на продукцию и топливо, семенами, удобрениями, техникой; технологическим перевооружением.

Для расширения возможностей использования моделей необходимо накапливать и хранить производственно-экономическую, агрометеорологическую, гидрологическую, экологическую, историко-архивную и другие виды информации. Поэтому создаются базы знаний и базы данных с большими объемами данных.

Примеры реализации моделей. Для разработки модели производства аграрной продукции были проанализированы основные характеристики условного предприятия:

- посевная площадь разных сельскохозяйственных культур;
- энергозатраты;
- объемы производства;
- трудозатраты;
- экономические характеристики;
- потери как результат влияния неблагоприятных условий,

Модель описывает предприятие с тремя неоднородными по плодородию полями для выращивания пшеницы, ячменя и овса, т.е. рассмотрена растениеводческая отрасль без животноводства. Каждое поле разделено на неоднородные участки, урожайность на каждом из которых имеет свои особенности. Поскольку модель позволяет оптимизировать площади или объемы производства растениеводческой продукции, при ее реализации использованы первое слагаемое целевой функции (1), ограничения (2), а также (7), (8) и (9) без учета отрасли животноводства.

Для построения задач параметрического программирования использованы тренды урожайности сельскохозяйственных культур, отображающие тенденции всего ряда и последовательности ложбин [24]. В качестве трендов определены логистическая и асимптотическая функции для описания коэффициентов $a_{ijs}(t)$ неравенства (8):

$$a_{ijs}(t) = \frac{a_{ijs}^{\max}}{(1 + e^{-\rho_{ijs}t})}, \quad (16)$$

$$a_{ijs}(t) = a_{ijs}^{\max} - (a_{ijs}^{\max} - a_{ijs}^{\min})e^{-\rho_{ijs}t}, \quad (17)$$

где $a_{ijs}^{\max}$ – уровень насыщения, $a_{ijs}^{\min}$ – значение функции в начальный момент времени, ρ_{ijs} – скорость роста функции.

Уровень насыщения выделен по наибольшему значению урожайности зерновых культур с добавлением точности ее оценки.

В приведенном примере принято допущение, что трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j $d_{ijs}(t)$, входящие в неравенство (9), являются постоянными за рассматриваемый период. При этом участки в пределах поля обладают однородностью. В качестве заблаговременности при прогнозировании урожайности зерновых культур принят 1 год.

Задача решена для уровней, характеризующих усредненную и низкую урожайность, согласно методике [24]. В таблице 1 приведены значения коэффициентов модели, используемые при оптимизации производства зерновых культур. Общая площадь зерновых составила 9800 га: пшеницы (4866 га), ячменя (3100 га) и овса (1934 га).

Таблица 1. Значения коэффициентов целевой функции и ограничений, используемых в моделях оптимизации производства зерновых культур на предприятии

Характеристика	Коэффициент использования сельскохозяйственных угодий	Затраты на горюче-смазочные материалы, руб./га	Оплата труда руб./га	Цена реализации зерна
Значение	1	2800 - 3400	3000 - 3500	4330 - 8600

В таблицах 2 и 3 приведены прогностические значения урожайности пшеницы, ячменя и овса для разных полей в усредненных и неблагоприятных условиях ведения производства. Рассмотрено семь разных полей пшеницы, четыре – ячменя и одно – овса. Оптимальные планы приведены в виде объемов производства, поскольку площади сельскохозяйственных угодий в задачах оставались неизменными.

Таблица 2. Результаты решения задачи параметрического программирования в усредненных условиях для зерновых культур

Характеристики	Пшеница						
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
Урожайность ц/га	25,4	24,1	23,2	25,9	23,7	23,4	25,9
Объём ц.	11520,0	13350,0	8008,0	12870,0	16140,0	38584,0	18265,0
Характеристики	Ячмень				Овес	Доход	Прибыль
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}		
Урожайность ц/га	24,5	24,7	24,4	24,5	23,1	70159,3 тыс. руб.	12022,4 тыс. руб.
Объём ц.	7425,2	18000,0	15207,5	50524,8	46260,0		

Согласно полученным результатам в усредненных условиях предприятие окажется с прибылью более 12 млн руб. В случае деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей в неблагоприятных условиях прибыль уменьшится на 42,4 % относительно усредненной ситуации, а потери урожая составят более 3400 т зерна или 13,4 %.

Таблица 3. Результаты решения задачи параметрического программирования при неблагоприятных условиях для зерновых культур

Характеристики	Пшеница						
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
Урожайность ц/га	19,2	26,7	28,6	23,4	26,9	21,2	28,1
Объём ц.	10263,42	12093,42	6551,42	11613,80	14883,42	33327,42	17008,88
Характеристики	Ячмень				Овес	Доход	Прибыль
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}		
Урожайность ц/га	22,60	19,50	21,70	22,70	17,70	63512,9 тыс. руб.	6925,4 тыс. руб.
Объём ц.	5968,62	16743,80	13950,92	45268,22	34270,6		

Помимо неблагоприятных ситуаций, тенденция которых может быть описана в виде значимого тренда, некоторые значения могут находиться ниже тренда последовательности нижних уровней ряда, представляя собой события [21]. Для оценки событий использованы законы распределения вероятностей, в конкретном случае – распределение Пирсона III типа. Определение вероятностей выделенных событий осуществляется на основе согласования аналитической функции распределения эмпирическим данным, полученным как разность фактических значений исходного ряда и значений тренда последовательности ложбин. После оценки значений и вероятностей событий формируется модель с целевой функцией и ограничениями, реализуемая с помощью программного комплекса «Управление рисками при планировании аграрного производства». В таблице 4 приведен один случай моделирования с оценками вероятностей наименьших урожайностей, наблюдавшихся на рассматриваемых полях (наихудший вариант производства зерна за почти 30-летний период). Согласно полученному результату, прибыль уменьшится почти на 75 % относительно усредненных условий, а потери зерновых превысят 23 %. Оптимальное решение соответствует усредненной вероятности 0,127.

Для моделирования других ситуаций с использованием метода статистических испытаний определяются разные сочетания вероятностей и соответствующие им урожайности сельскохозяйственных культур. Для каждой ситуации строится модель и рассчитывается оптимальное решение. При моделировании вероятностей можно использовать их диапазон $<0,008 - 0,46>$, полученный на основе эмпирических данных. При необходимости этот диапазон можно изменить.

Таблица 4. Результаты решения задачи с вероятностными оценками с учетом влияния на производство событий

Характеристики	Пшеница						
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
Урожайность ц/га	15,3	15,5	17,8	18,9	15,8	19,6	18,4
Вероятность	0,0080	0,0090	0,020	0,027	0,044	0,050	0,20
Объём ц.	10763,20	7668,47	10035,00	8488,61	10475,74	34820,35	12748,63
Характеристики	Ячмень				Овес	Доход	Прибыль
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	67192,5 тыс. руб.	3050,6 тыс. руб.
Урожайность ц/га	20,00	21,10	20,80	17,10	16,7		
Вероятность	0,060	0,23	0,17	0,24	0,46		
Объём ц.	13560,00	2681,25	13020,00	37738,75	34226,52		

Заключение. Описаны три математические модели оптимизации производства аграрной продукции с учетом неоднородностей земельных ресурсов: линейная модель сочетания отраслей растениеводства и животноводства; параметрическая модель оптимизации производства аграрной продукции и модель оптимизации производства аграрной продукции в условиях влияния на производственные процессы экстремальных событий.

Приведены примеры решения предложенных моделей для оптимизации производства зерновой продукции с учетом неоднородности земельных ресурсов в усредненных, неблагоприятных условиях деятельности товаропроизводителей, а также с учетом влияния экстремальных событий на производство.

Выполнено сравнение результатов, полученных с помощью предложенных моделей.

Использование рассмотренных математических моделей позволяет оптимизировать разные ситуации производственной деятельности товаропроизводителя для принятия эффективных управленческих решений.

Список источников

1. Проблемы и перспективы развития АПК и сельских территорий. Монография. Изд-во: ООО “Центр развития научного сотрудничества” (Новосибирск), 2014. – 281с.
2. Афанасьев М.Ю. Исследование операций в экономике: модели, задачи, решения: Учеб. пособие. / М.Ю. Афанасьев, Б.П. Суворов. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 444 с.
3. Ашманов С.А. Линейное программирование / С.А. Ашманов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 340 с.
4. Булатов В.П. Об одном эффективном методе выпуклого программирования / В.П. Булатов, Н.И. Федурин // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2, 2004. – Т. 11. – № 1. – С. 1-5.
5. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. Книга 1 / Ф.П. Васильев. – М.: МЦНМО, 2011. – 620 с.
6. Гатаулин А.М. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин, Г.В. Гавриков, Т.М. Сорокина и др. – М.: Агропромиздат, 1990. – 432 с.
7. Данциг Д. Линейное программирование, его применения и обобщения / Д. Данциг. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.
8. Кардаш В.А. Модели управления производственно-экономическими процессами в сельском хозяйстве / В.А. Кардаш. – М.: Экономика, 1981. – 183 с.
9. Иваньо Я.М. Решение задач управления аграрным производством в условиях неполной информации. Монография / Я.М. Иваньо, П.Г. Асалханов, М.Н. Барсукова [и др.] – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2012. – 200 с.
10. Таха Х.А. Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ / Х.А. Таха. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
11. Вараница-Городовская Ж.И. Модели оптимизации затрат труда на производство аграрной продукции с учетом нелинейных функций с экстремальными оценками / Ж.И. Вараница-Городовская, Я.М. Иваньо // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика, 2017. – № 3. – С. 21-31.
12. Иваньо Я.М. Задача параметрического программирования с моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, М.Н. Барсукова [и др.] // Прикладная информатика, 2021. – Т. 16. – № 6 (96). – С. 131-143. – DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16- 6-131-143.
13. Ковадло И.А. О модели параметрического программирования для производства аграрной продукции на неоднородных землях / И.А. Ковадло, Я.М. Иваньо // В сборнике: Развитие агропромышленного комплекса в условиях становления цифровой экономики в России и за рубежом. Материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения Почетного работника высшего профессионального образования РФ, доктора экономических наук Винокурова Геннадия Михайловича. – Молодежный, 2021. – С. 135- 142.
14. Давыденко А.Ю. Эколого-математическая модель производства сельскохозяйственной продукции со случайными параметрами / А.Ю. Давыденко, Я.М. Иваньо, Е.А. Хогоева // Вестник ИрГСХА, 2014. – Вып. 61. – С. 115-121.
15. Носонов А.М. Современные методы моделирования развития сельскохозяйственной продукции / А.М. Носонов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: естественные науки, 2018. – № 3. – С. 62-74.
16. Ivanyo Ya., Asalkhanov P., Bendik N. Management of the Agro-industrial enterprise: optimization uncertainty expert assessments. International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon, 2019, 7 p., DOI:10.1109/FarEastCon.2019.8934788.
17. Ivanyo Ya., Petrova S., Polkovskaya M. et al. Modeling of the production of agrarian products under the conditions of influence of droughts, rainfall and their combinations. Proceedings of the Vth International workshop “Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security” (IWCI 2018). Advances in intelligent systems research, 2018, v. 158, pp. 78-84, DOI:10.2991/ iwci-18.2018.
18. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем / О.Д. Сиротенко. – Л: Гидрометеиздат, 1981. – 188 с.
19. Хлыстовский А.Д. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести / А.Д. Хлыстовский. – М.: Наука, 1992. – 192 с.
20. Ivanyo Ya., Petrova S., Polkovskaya M. Optimization models of agricultural production with heterogeneous land resources. Journal of physics: Conference Series 18. “XVIII International conference on prospects of fundamental sciences development, PFSD 2021”, 2021, pp. 012041.
21. Иваньо Я.М. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки, 2022. – № 42. – С. 48-57.

22. Барсукова М.Н. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях // М.Н. Барсукова, Я.М. Иванько, С.А. Петрова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 3 (19). – С. 73-85.
23. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации: Задачи и методы стохастического программирования / Д.Б. Юдин. – М.: Ленанд, 2017. – 400 с
24. Дружинин И.П. Долгосрочный прогноз и информация / И.П. Дружинин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 255 с.

Иванько Ярослав Михайлович. Доктор технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации, профессор кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. Основные научные интересы: математическое моделирование разных аспектов получения продовольственной продукции с учетом климатических, техногенных и биологических рисков. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, 664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

Ковадло Илья Андреевич. Аспирант кафедры информатики и математического моделирования, институт экономики, управления и прикладной информатики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. kovadlo95@gmail.com, 664038 Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

Федурина Нина Ивановна. Кандидат технических наук, доцент, руководитель центра управления качеством образования, доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. Основные научные интересы: математическое моделирование и прогнозирование производства аграрной продукции с учетом неопределенности параметров. AuthorID: 460753, SPIN: 9556-2188, ORCID: 0000-0002-8714-6859, fedurina_n@mail.ru, 664038 Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

UDC 517:519.8:004:63

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.012

About three models of linear programming in relation to the production of agricultural products

Yaroslav M. Ivanyo, Ilya A. Kovadlo, Nina I. Fedurina

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky,
Russia, Irkutsk, iymex@rambler.ru, kovadlo95@gmail.com

Abstract. The article discusses three linear programming models for optimizing the production of agricultural products in conditions of land heterogeneity. The first model describes a combination of crop and livestock industries. The second parametric programming model allows you to plan the production of agricultural products for a certain perspective. The third model characterizes the situation of optimizing the production of agricultural products under conditions of risks. Examples of the implementation of the developed models are given.

Keywords: modeling of production, agricultural products, mathematical modeling, mathematical modeling

References

1. Problemy i perspektivy razvitiya APK i sel'skikh territoriy. Monografiya [Problems and prospects for the development of the agro-industrial complex and rural areas]. Izd-vo: ООО "Tsentr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva" [Publishing house: Limited liability company "Center for the development of scientific co-operation"], Novosibirsk, 2014. 281p.
2. Afanasiev M. Yu., Suvorov B.P. Issledovaniye operatsiy v ekonomike: modeli, zadachi, resheniya: Ucheb. posobiye [Research operations in the economy: models, tasks, solutions: Proc. Allowance]. M.: INFRA-M, 2003, 444 p.
3. Ashmanov S.A. Lineynoye programmirovaniye [Linear programming]. M., Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury [The main edition of physical and mathematical literature], 1981, 340 p.

4. Bulatov V.P., Fedurina N.I. Ob odnom effektivnom metode vypuklogo programmirovaniya [On one effective method of convex programming]. Diskretnyy analiz i issledovaniye operatsiy. Seriya 2 [Discrete analysis and research of operations. Series 2], 2004, vol. 11, no. 1, pp. 1-5.
5. Vasiliev F. P. Metody optimizatsii. Kniga 1 [Optimization methods. Book 1]. M., MTSNMO, 2011, 620 p.
6. Gataulin A.M., Gavrikov G.V., Sorokina T.M. [et al.] Matematicheskoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov v sel'skom khozyaystve [Mathematical modeling of economic processes in agriculture]. M., Agropromizdat, 1990, 432 p.
7. Danzig D. Lineynoye programmirovaniye, yego primeneniya i obobshcheniya [Linear programming, its applications and generalizations]. M., Progress, 1966, 600 p.
8. Kardash V.A. Modeli upravleniya proizvodstvenno-ekonomicheskimi protsessami v sel'skom khozyaystve [Models of management of production and economic processes in agriculture]. M., Economics, 1981, 183 p.
9. Ivan'o YA.M., Asalkhanov P.G., Barsukova M.N. [et al.] Resheniye zadach upravleniya agrarnym proizvodstvom v usloviyakh nepolnoy informatsii [Solving the problems of managing agricultural production in conditions of incomplete information]. Irkutsk, Izd-vo IRGSHA, 2012, 200 p.
10. Taha H.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy, 7-ye izdaniye [Introduction to operations research, 7th edition]. M., Izdatel'skiy dom "Vil'yams" [Publishing house "Williams"], 2005, 912 p.
11. Varanitsa-Gorodovskaya Zh.I., Ivan'o Ya.M. Modeli optimizatsii zatrat truda na proizvodstvo agrarnoy produktsii s uchetom nelineynykh funktsiy s ekstremal'nymi otsenkami [Models of optimization of labor costs for the production of agricultural products, taking into account nonlinear functions with extreme estimates]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika [Bulletin of the Buryat State University. Mathematics, computer science], 2017, no. 3, pp. 21-31.
12. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A., Barsukova M.N. [et al.] Zadacha parametricheskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [The task of parametric programming with models for predicting the productivity of agricultural crops]. Prikladnaya informatika [Applied Informatics], 2021, vol. 16, no. 6 (96), pp. 131-143, DOI:10.37791/2687-0649-2021-16-6-131-143.
13. Kovadlo I.A., Ivan'o Ya.M. O modeli parametricheskogo programmirovaniya dlya proizvodstva agrarnoy produktsii na neodnorodnykh zemlyakh [On the model of parametric programming for the production of agricultural products on heterogeneous lands]. V sbornike: Razvitiye agropromyshlennogo kompleksa v usloviyakh stanovleniya tsifrovoy ekonomiki v Rossii i za rubezhom. Materialy vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 85-letiyu so dnya rozhdeniya Pochetnogo rabotnika vysshego professional'nogo obrazovaniya RF, doktora ekonomicheskikh nauk Vinokurova Gennadiya Mikhaylovicha [In the collection: Development of the agro-industrial complex in the context of the formation of the digital economy in Russia and abroad. Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 85th anniversary of the birth of the honorary worker of higher professional education of the Russian Federation, doctor of economics Gennady Mikhailovich Vinokurov], Molodezhny, 2021, pp. 135-142.
14. Davydenko A.Yu., Ivanyo Ya. M., Khogoeva E.A. Ekologo-matematicheskaya model' proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii so sluchaynymi parametrami [Ecological-mathematical model of agricultural production with random parameters]. Vestnik IrGSHA, 2014, iss. 61, pp. 115-121.
15. Nosonov A.M. Sovremennyye metody modelirovaniya razvitiya sel'skokhozyaystvennoy produktsii [Modern methods of modeling the development of agricultural products]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: yestestvennyye nauki [Bulletin of the Moscow state regional university. Series: natural sciences], 2018, no. 3, pp. 62-74.
16. Ivanyo Ya., Asalkhanov P., Bendik N. Management of the Agro-industrial enterprise: optimization uncertainty expert assessments. International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon, 2019, 7 p., DOI:10.1109/FarEastCon.2019.8934788.
17. Ivanyo Ya., Petrova S., Polkovskaya M. [et al.] Modeling of the production of agrarian products under the conditions of influence of droughts, rainfall and their combinations. Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018). Advances in intelligent systems research, 2018, v. 158, pp. 78-84, DOI:10.2991/iwci-18.2018.
18. Sirotenko O.D. Matematicheskoye modelirovaniye vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem. [Mathematical modeling of water-thermal regime and productivity of agroecosystems]. L., Gidrometeoizdat, 1981, 188 p.
19. Khlystovsky A.D. Plodorodiye pochvy pri dlitel'nom primenenii udobreniy i izvesti [Soil fertility with long-term use of fertilizers and lime], M., Nauka [Science], 1992, 192 p.

20. Ivanyo Ya., Petrova S., Polkovskaya M. Optimization models of agricultural production with heterogeneous land resources. Journal of physics: Conference Series 18. "XVIII International conference on prospects of fundamental sciences development, PFSD 2021", 2021, pp. 012041.
21. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nykh urovney vremennogo ryada dlya otsenki riskov [On one algorithm for selecting anomalous levels of a time series for risk assessment]. Aktual'nyye voprosy agrarnoy nauki [Actual issues of agrarian science], 2022, no. 42, pp. 48-57.
22. Barsukova M.N., Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [On one model of optimizing the production of agricultural products in favorable and unfavorable external conditions]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 3 (19), pp. 73-85.
23. Yudin D.B. Matematicheskiye metody upravleniya v usloviyakh nepolnoy informatsii: Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya [Mathematical methods of control in conditions of incomplete information: Problems and methods of stochastic programming]. M., Lenand, 2017, 400 p.
24. Druzhinin I.P. Dolgosrochnyy prognoz i informatsiya [Long-term forecast and information]. Novosibirsk, Nauka [Science], 1987, 255 p.

Ivano Yaroslav Mikhailovich. Doctor of technical sciences, professor. Position: vice-rector for Digital transformation, professor of the Department of informatics and mathematical modeling, Irkutsk state agrarian university named after A.A. Yezhevsky. Main scientific interests: mathematical modeling of various aspects of obtaining food products, taking into account climatic, technogenic and biological risks. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny.

Kovadlo Ilya Andreevich. Postgraduate student of the Department of informatics and mathematical modeling, institute of economics, Management and applied informatics. Irkutsk state agrarian university named after A.A. Yezhevsky. kovadlo95@gmail.com, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny.

Fedurina Nina Ivanovna. Candidate of technical sciences, associate professor, head of the education quality management center, associate professor of the Department of informatics and mathematical modeling, Irkutsk state agrarian university named after A.A. Yezhevsky. Main scientific interests: mathematical modeling and forecasting of agricultural production, taking into account the uncertainty of parameters. AuthorID: 460753, SPIN: 9556-2188, ORCID: 0000-0002-8714-6859, fedurina_n@mail.ru, 664038 Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny.

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; одобрена после рецензирования 06.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 06/27/2023; approved after reviewing 09/06/2023; accepted for publication 09/25/2023.

УДК 519.862.6

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.013

Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий

Базилевский Михаил Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, mik2178@yandex.ru

Аннотация. Ранее были предложены модели модульной линейной регрессии, содержащие в качестве регрессоров модули отклонений значений объясняющих переменных от неизвестных коэффициентов. Известен алгоритм их точного оценивания с помощью метода наименьших модулей и алгоритм приближенного оценивания с помощью метода наименьших квадратов. Программных продуктов, реализующих эти алгоритмы, до сегодняшнего дня разработано не было. Данная статья посвящена описанию разработанного программного комплекса оценивания модульных линейных регрессий (ПК МОДУЛИР-1). В нём при оценивании модульной линейной регрессии с помощью метода наименьших модулей по заданным настройкам автоматически формируется задача частично-булевого линейного программирования для пакета LPSolve. В случае приближенного оценивания с помощью метода наименьших квадратов осуществляется полный перебор всех возможных вариантов моделей и выбирается лучшая по величине коэффициента детерминации модульная регрессия со всеми значимыми по t-критерию Стьюдента коэффициентами. С помощью ПК МОДУЛИР-1 решена задача моделирования грузооборота железнодорожного транспорта Забайкальского края. Коэффициент детерминации построенной с помощью метода наименьших квадратов модульной регрессии с пятью объясняющими переменными составил 0,94, что примерно в 4 раза выше, чем у традиционной линейной регрессии. При этом все коэффициенты модульной регрессии оказались значимы по t-критерию Стьюдента. Показано, как можно интерпретировать построенную модульную регрессию.

Ключевые слова: модульные регрессии, программное обеспечение, метод наименьших квадратов, метод наименьших модулей, коэффициент детерминации, t-критерий Стьюдента, грузооборот

Цитирование: Базилевский М.П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий / М.П. Базилевский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 136-146. – DOI:10. 25729/ESI.2023.31.3.013.

Введение. В настоящее время методы машинного обучения [1, 2] находят широкое применение на практике и постоянно совершенствуются. Одним из наиболее известных методов машинного обучения является регрессионный анализ [3, 4], суть которого состоит в построении по имеющейся выборке статистических данных регрессионной модели зависимости выходной переменной от одной или нескольких входных переменных. Построенную математическую модель в дальнейшем можно использовать, например, для прогнозирования будущих значений выходной переменной. Простейшей моделью в регрессионном анализе считается модель множественной линейной регрессии следующего вида:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n – объем выборки; l – число входных (объясняющих) переменных; $y_i, i = \overline{1, n}$ – значения выходной (объясняемой) переменной; $x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}$ – значения входных переменных; $\alpha_j, j = \overline{0, l}$ – неизвестные параметры модели; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации.

Для нахождения оценок неизвестных параметров модели (1) в регрессионном анализе разработан широкий арсенал методов. Наиболее эффективным из них принято считать метод наименьших квадратов (МНК), суть которого состоит в решении задачи минимизации суммы квадратов ошибок:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \alpha_0 - \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Об аппроксимационном качестве оцененной с помощью МНК регрессии принято судить по величине коэффициента детерминации R^2 , который связан с суммой квадратов остатков $\sum_{i=1}^n e_i^2$ (суммой квадратов разностей между фактическими и прогнозными значениями выходной переменной) следующим равенством:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\bar{y}$ – среднее значение выходной переменной. Коэффициент детерминации R^2 принимает значения от 0 до 1. Чем ближе его значение к 1, тем выше аппроксимационное качество модели.

Проверка значимости коэффициентов оцененной с помощью МНК линейной регрессии (1) проверяется с помощью t-критерия Стьюдента. Для этого сначала определяется критическое значение критерия, зависящее от заданного уровня значимости α и числа степеней свободы $n - (l + 1)$. Затем для каждого коэффициента регрессии определяются наблюдаемые значения критерия по формулам:

$$t_{\text{набл}}(\alpha_j) = \frac{\tilde{\alpha}_j}{se(\tilde{\alpha}_j)}, \quad j = \overline{0, l},$$

где $\tilde{\alpha}_j$, $j = \overline{0, l}$ – найденные с помощью МНК оценки линейной регрессии; $se(\tilde{\alpha}_j)$ – стандартные ошибки оценок коэффициентов модели. Потом наблюдаемые значения сравниваются с критическим значением критерия и делаются выводы о значимости коэффициентов регрессионной модели. Незначимые коэффициенты рекомендуется исключить, переоценив регрессию.

Реальные зависимости между исследуемыми факторами на практике зачастую носят нелинейный характер, поэтому в регрессионном анализе помимо линейных регрессий (1) разработаны и другие весьма эффективные спецификации. К ним относятся, например, логистические [5], полиномиальные [6], неэлементарные [7, 8], степенные [9], специфицированные на основе функций Леонтьева регрессии [9, 10].

В работе [11] впервые были предложены модели модульной линейной регрессии следующего вида:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j |x_{ij} - \lambda_j| + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где λ_j , $j = \overline{1, l}$ – неизвестные параметры.

Очевидно, что при $x_{ij} \geq 0$ и при $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_l = 0$ модульная регрессия (2) трансформируется в линейную регрессию (1). В той же работе [11] был предложен следующий алгоритм численного МНК-оценивания нелинейной модели (2).

1. Находятся области определения параметров $\lambda_j \in [x_{\min}^j, x_{\max}^j]$, $j = \overline{1, l}$, где $x_{\min}^j$, $x_{\max}^j$ – минимальное и максимальное значение j -й входной переменной.

2. На каждом отрезке $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$ равномерно выбирается p точек.

3. Полным перебором всех возможных $(p+2)^l$ комбинаций точек из отрезков $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$ с помощью МНК оцениваются уже линейные регрессии (2).

4. Выбирается та модель, у которой $\sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \min$.

5. В работе [12] задача точного оценивания модульной регрессии (2) с помощью метода наименьших модулей (МНМ) сведена к задаче частично-булевого линейного программирования.

Цель настоящей статьи состоит в описании разработанного программного комплекса, позволяющего оценивать модульные линейные регрессии с помощью МНК и МНМ.

1. Программный комплекс МОДУЛИР-1. Для идентификации неизвестных параметров модели (2) с помощью МНМ и МНК в среде программирования Delphi был разработан программный комплекс оценивания модульных линейных регрессий (ПК МОДУЛИР-1). Главное окно ПК МОДУЛИР-1 приведено на рис.1.

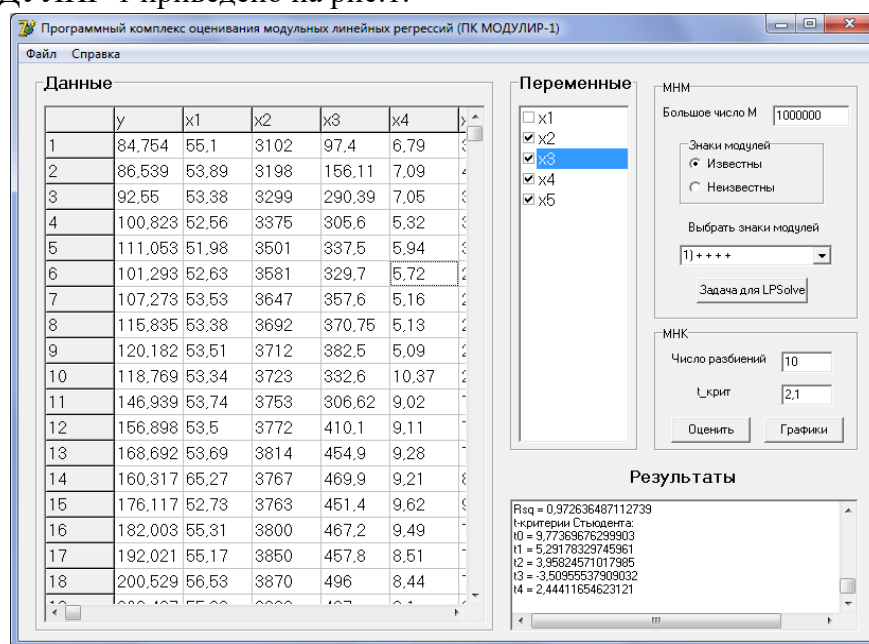


Рис. 1. Главное окно ПК МОДУЛИР-1

Для начала работы с ПК в его главном меню нужно воспользоваться командой Файл => Загрузка. Затем выбрать текстовый файл с расширением «.txt», хранящий исходную выборку данных. Этот файл должен содержать только прямоугольную таблицу с числами. Первый её столбец соответствует значениям объясняемой переменной y , второй – объясняющей переменной x_1 и т.д. Столбцы отделяются друг от друга символом «Tab». Целые и дробные части вещественных чисел отделяются друг от друга символом «,».

После выбора файла с данными они отобразятся на панели «Данные», а на панели «Переменные» появится список объясняющих переменных с переключателями. Используя эти переключатели, можно менять состав входящих в модель объясняющих переменных. Для дальнейшей работы хотя бы один из этих переключателей должен быть активирован.

Для оценивания модульной регрессии с помощью МНМ нужно на панели «МНМ» задать большое положительное число M , знаки коэффициентов, стоящих перед модулями, и нажать кнопку «Задача для LPSolve». После чего в поле «Результаты» будет сформирована задача частично-булевого линейного программирования для пакета LPSolve. Решение в нём сформированной задачи даёт точные МНМ-оценки выбранной модульной регрессии.

Для приближенного МНК-оценивания в ПК МОДУЛИР-1 модульной линейной регрессии нужно на панели «МНК» выбрать 2 параметра.

1. Число разбиений (razb). Этот параметр означает количество точек, разбивающих отрезки $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$. Чем больше этих точек задано, тем дольше будет происходить оценивание модульной регрессии, но тем ближе её МНК-оценки к оптимальным.

2. Критическое значение t-критерия Стьюдента (t_крит). Выбор этого параметра зависит от цели исследования. Если модульная регрессия нужна только для прогнозирования значений зависимой переменной, то t_крит нужно выбрать равным 0. Если модульную регрессию требуется интерпретировать, то t_крит выбирается в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы $n - (l + 1)$. В последнем случае нужно использовать таблицу критических значений t-критерия Стьюдента.

После выбора этих двух параметров на панели «МНК» нужно нажать кнопку «Оценить». Далее ПК МОДУЛИР-1 начинает работать по алгоритму, представленному на рис. 2. Рассмотрим подробнее его блоки.

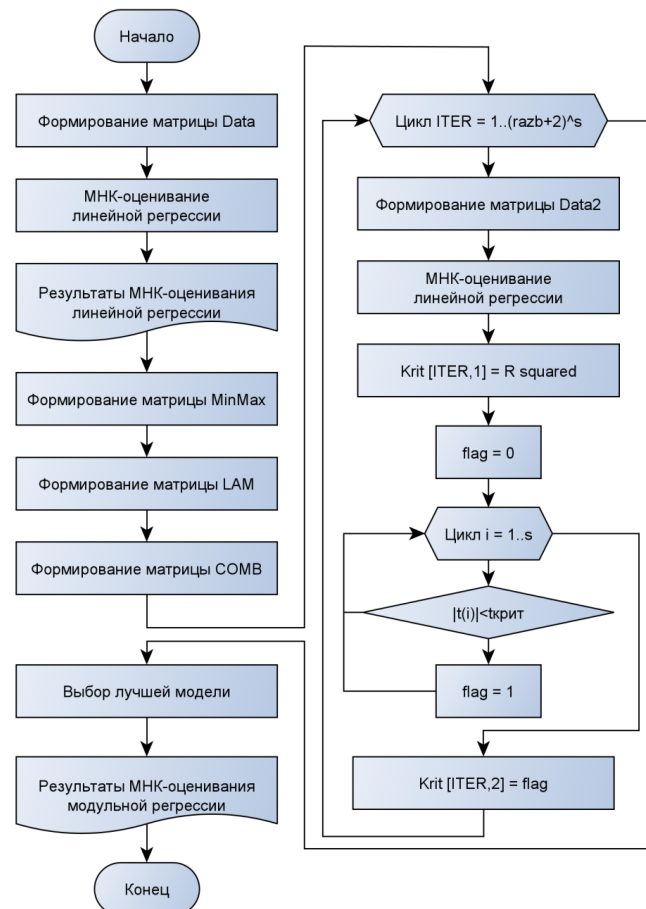


Рис. 2. Алгоритм работы ПК МОДУЛИР-1 при МНК-оценивании

Сначала формируется матрица Data размера $n \cdot (s + 1)$, где n – объем выборки, s – число выбранных пользователем объясняющих переменных. Матрица Data содержит в первом столбце значения зависимой переменной y , а в оставшихся – значения s выбранных объясняющих переменных. Затем по матрице Data с помощью МНК оценивается линейная регрессия (1) и в поле «Результаты» главного окна ПК МОДУЛИР-1 выводится следующая информация: число наблюдений, список выбранных объясняющих переменных, МНК-оценки линейной регрессии, её коэффициент детерминации, наблюдаемые значения t-критерия Стьюдента для каждого коэффициента.

После чего формируется матрица MinMax размера $2 \cdot s$, содержащая в первой строке минимальные значения выбранных объясняющих переменных, во второй – их максимальные значения. Потом с помощью MinMax формируется матрица лямбда-параметров LAM размера

$(\text{razb} + 2)^*s$, содержащая по столбцам возможные значения этих параметров для каждой выбранной объясняющей переменной. Далее формируется матрица COMB размера $((\text{razb} + 2)^*s)^*s$, содержащая по строкам в лексикографическом порядке все возможные комбинации размещений с повторениями из $(\text{razb} + 2)$ по s .

Затем создается критериальная матрица Krit размера $((\text{razb} + 2)^*s)^*2$, в первом столбце которой будут храниться значения коэффициентов детерминации моделей, а во втором – число 0, если все коэффициенты регрессии значимы по t-критерию, и 1, если имеется хотя бы один незначимый коэффициент. После чего запускается цикл с параметром ITER по строкам матрицы COMB, т.е. по всем возможным комбинациям значений параметров λ_j в модульной регрессии. Для каждой такой комбинации сначала формируется матрица Data2, содержащая в первом столбце значения зависимой переменной y , а в оставшихся столбцах – значения новых объясняющих переменных z_{ij} , преобразованных по правилу $z_{ij} = |x_{ij} - \lambda_j|$. Потом по матрице Data2 находятся МНК-оценки параметров α_j модульной регрессии (2), значение коэффициента детерминации сохраняется в первом столбце критериальной матрицы Krit и в результате проверки значимости коэффициентов по t-критерию Стьюдента во второй столбец матрицы Krit вносится число 0 или 1. По завершению работы цикла с параметром ITER критериальная матрица Krit будет полностью заполнена.

Далее с помощью критериальной матрицы Krit выбирается модель со всеми значимыми по t-критерию Стьюдента оценками и с наибольшим значением коэффициента детерминации R^2 . Для найденной модульной регрессии в поле «Результаты» главного окна ПК МОДУЛИР-1 выводится следующая информация: общее количество оцененных регрессий $((\text{razb} + 2)^*s)$, количество моделей со всеми значимыми коэффициентами, МНК-оценки модульной регрессии, её коэффициент детерминации, наблюдаемые значения t-критерия Стьюдента для каждого коэффициента.

В ПК МОДУЛИР-1 также предусмотрена возможность вывода графиков наблюдаемых и прогнозных значений зависимой переменной для линейной и модульной линейной регрессий. Это можно сделать, нажав на панели «МНК» после оценивания модульной регрессии кнопку «Графики».

2. Решение прикладной задачи. Грузооборот – это основной показатель выполнения работы железной дороги. От него зависят такие важные экономические показатели, как доходы от перевозок и расходы по перевозкам.

Актуальной задачей, несомненно, можно считать моделирование грузооборота, являющегося одним из важнейших оперативных индикаторов экономической активности в реальном секторе, в частности экспортной активности [13]. Так, например, в [14] авторы моделировали прогнозирование грузооборота и объема перевезенных грузов.

Внешние и внутренние факторы оказывают существенное влияние на динамику и структуру грузооборота железнодорожного транспорта. Некоторые из них приведены на рис. 3.

Рассмотрим такой фактор, как наличие схем НТУ (непредусмотренные технические условия). Данная схема требуется для тех вагонов, в которых не предусмотрены техническими условиями способы размещения и крепления грузов для разовых, либо нерегулярных перевозок грузов, имеющих строго определённые размеры и массу. Схемы НТУ должны быть разработаны непосредственно к прибытию вагонов на станцию, но на практике наблюдается обратная ситуация – вагоны прибывают без схем, которые разрабатываются уже непосредственно после прибытия. На разработку и утверждение схемы затрачивается от трех дней (разработка схемы, создание реквизита крепления, работа бригады и т.д.). Соответственно возникают задержки при отправлении составов, которые затем суммируются и влияют на общее количество

отправленного груза в год. Чем больше вагонов, требующих разработки схем НТУ, тем меньше величина отправленного груза.



Рис. 3. Факторы, влияющие на грузооборот

В статье рассмотрим влияние на грузооборот задержек грузовых поездов, отказов 1-й и 2-й категорий, отказов в работе вследствие человеческого фактора и опасных отказов в работе технических средств. Именно эти факторы наиболее сильно влияют на грузооборот.

В зависимости от последствий отказов в работе технических средств вводится их следующая классификация по категориям:

- отказы 1-й категории – отказы, приводящие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 час и более, либо приводящие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;
- отказы 2-й категории – отказы, вызвавшие задержку пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 минут до 1 часа, либо ухудшение эксплуатационных показателей [15].

Опасные отказы перечислены в Правилах технической эксплуатации (ПТЭ). К некоторым из них относятся [16]: перевод стрелки под составом; ложная свобода участка; установление маршрута на занятый путь на станции и др.

Для построения модульной регрессии использовались ежемесячные статистические данные (табл. 1) за 2022 год, полученные от сотрудников Забайкальской железной дороги для следующих переменных: Y – грузооборот, млрд тарифных тонно-км; X_1 – отказы 1-й категории, ед.; X_2 – отказы 2-й категории, ед.; X_3 – задержки грузовых поездов, ед; X_4 – отказы в работе технических средств вследствие человеческого фактора; X_5 – опасные отказы в работе технических средств.

Таблица 1. Статистические данные

переменная месяц	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
январь	219,68	20	5	79	24	24
февраль	202,15	16	6	102	20	22
март	193,83	5	18	57	15	23
апрель	223,2	5	6	24	28	11
май	245,83	6	11	45	22	17
июнь	209,1	3	20	29	35	23
июль	253,43	6	16	34	19	22
август	188,24	11	30	67	33	41
сентябрь	175,88	9	23	53	20	28
октябрь	200,1	3	18	70	15	25
ноябрь	243,36	7	15	69	29	31
декабрь	280,95	10	26	115	27	36

Графики временных рядов для каждой переменной приведены на рис. 4 (а)-(е).

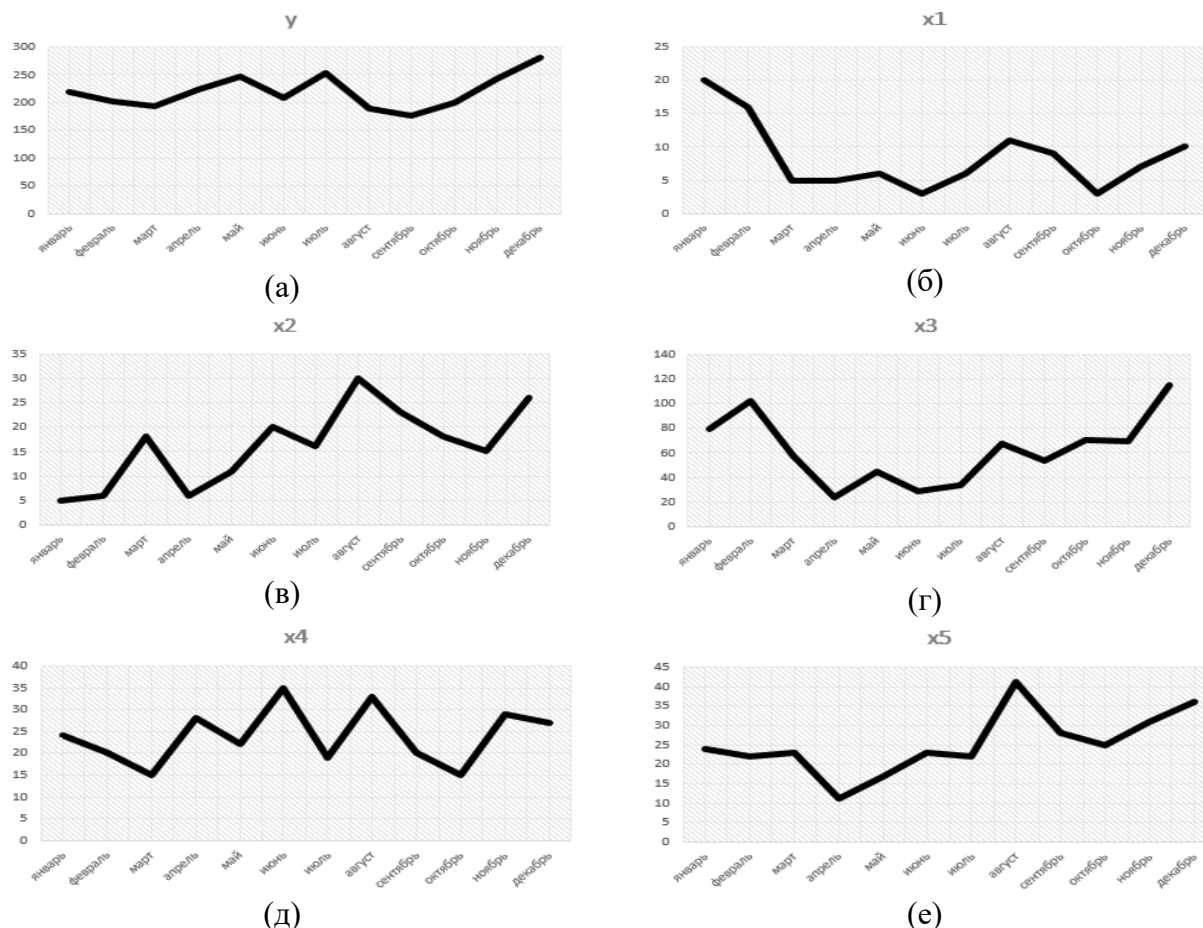


Рис. 4. Графики временных рядов

Анализируя графики, можно сделать вывод, что грузооборот слабо менялся в первом полугодии. Во втором полугодии с августа немного снизился и после октября начал возрастать. Связано это с всесторонним подходом к использованию возможностей Восточного полигона. Можно заметить, что отказов 1-й категории было меньше на протяжении года, чем отказов 2-й категории. Задержек грузовых поездов было больше в начале и в конце года, но больше, чем в середине года. Отказы работы технических средств вследствие человеческого фактора заметно снижались в марте (до 15 случаев) и в октябре (до 15 случаев), больше всего случаев отказа произошло в июне – всего 35. Самое большое количество случаев опасных отказов было зафиксировано в августе (41 случай), а самое низкое – в апреле (11 случаев). Тем не менее, итоги работы компании превзошли все ожидания, холдинг в прошлом году справился с масштабными вызовами и показал результаты, которые можно считать выдающимися [17].

По данным из таблицы 1 с помощью МНК получено уравнение линейной регрессии

$$\tilde{y} = 191,552 - 3,334 x_1 - 1,557 x_2 + 0,705 x_3 + 1,702 x_4 - 0,124 x_5. \quad (3)$$

(-0,882)
(-0,388)
(1,006)
(0,85)
(-0,027)

В скобках под коэффициентами этого уравнения указаны наблюдаемые значения t-критерия Стьюдента. Коэффициент детерминации R^2 регрессии (3) составил 0,242, что говорит о её низком аппроксимационном качестве. Причем, все коэффициенты модели (3) оказались незначимы по t-критерию Стьюдента.

Для оценивания модульной регрессии с помощью МНК был использован ПК МОДУЛИР-1. Число разбиений отрезков $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$, $j = \overline{1,5}$ было выбрано равным 10, а критическое значение t-критерия Стьюдента равным 2,45 [18]. В результате автоматически было оценено 248832 регрессий и выбрана лучшая из них по величине суммы квадратов остатков:

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & 163,450 + \underset{(7,356)}{11,645} |x_1 + 16,910| + \underset{(7,079)}{8,587} |x_2 + 25,454| + \\ & + \underset{(8,164)}{2,038} |x_3 + 73,636| - \underset{(-6,123)}{6,631} |x_4 + 22,273| - \underset{(-8,273)}{11,059} |x_5 + 38,273|. \end{aligned} \quad (4)$$

Для модульной регрессии (4) $R^2 = 0,94$. Таким образом, модель (4) обладает высоким качеством аппроксимации, превосходя линейную регрессию (3) по величине R^2 примерно в 4 раза. Все коэффициенты регрессии (4) значимы по t-критерию Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$.

На рис. 5 приведены графики, автоматически построенные в ПК МОДУЛИР-1, демонстрирующие превосходство модульной регрессии (4) над линейной (3) по качеству.

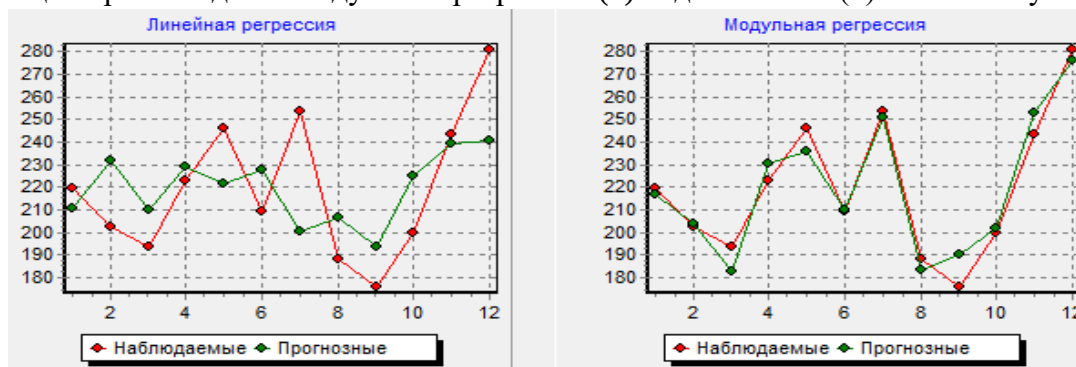


Рис. 5. Графики наблюдаемых и прогнозных значений зависимой переменной у для моделей (3) и (4)

Для интерпретации полученной модульной регрессии (4) необходимо представить её в кусочно-заданном виде, раскрыв знаки модулей. В нашем случае такая форма будет содержать 32 аналитических выражения, поэтому, чтобы не загромождать ею текст статьи, приведем вид модульной регрессии только при условиях $x_1 \geq 10,104$, $x_2 \geq 19,404$, $x_3 \geq 74,419$, $x_4 \geq 28,704$, $x_5 \geq 30,308$:

$$\tilde{y} = 1300,233 + 11,645x_1 + 8,587x_2 + 2,038x_3 - 6,631x_4 - 11,059x_5. \quad (5)$$

Это выражение можно интерпретировать следующим образом: если отказов 1-й категории x_1 не меньше, чем 10,104, отказов 2-й категории x_2 не меньше, чем 19,404, задержек грузовых поездов x_3 не меньше, чем 74,419, отказов технических средств вследствие человеческого фактора x_4 не меньше, чем 28,704, а опасных отказов в работе технических средств x_5 не меньше, чем 30,308, то на размер грузооборота y независимые переменные x_1 , x_2 и x_3 влияют со знаком «+», а x_4 и x_5 – со знаком «-». Причем с ростом x_1 на 1 единицу грузооборот y возрастает в среднем на 11,645 млрд тарифных тонно-км, с ростом x_2 на 1 единицу – на 8,587 млрд тарифных тонно-км, с ростом x_3 на 1 единицу – на 2,038 млрд тарифных тонно-км, с ростом x_4 на 1 единицу y убывает в среднем на 6,631 млрд тарифных тонно-км, а с ростом x_5 на 1 единицу y убывает в среднем на 11,059 млрд тарифных тонно-км.

Аналогично можно интерпретировать и другие аналитические выражения модульной регрессии (4).

Заключение. В данной статье приведено описание разработанного программного комплекса МОДУЛИР-1, позволяющего оценивать модульные линейные регрессии с помощью МНК и МНМ. ПК МОДУЛИР-1 относится к универсальным программным продуктам и может

быть использован для решения задач обработки и анализа данных из любых предметных областей. С помощью ПК МОДУЛИР-1 успешно решена задача моделирования грузооборота железнодорожного транспорта Забайкальского края. Построенная с помощью МНК модульная регрессия оказалась высокого качества, превзойдя линейную регрессию по величине коэффициента детерминации примерно в 4 раза. К тому же в модульной регрессии все коэффициенты установились значимыми по t-критерию Стьюдента. Полученный результат позволяет сделать предположение о том, что модульные регрессии являются весьма эффективным инструментом для прогнозирования поведения разного рода процессов и явлений. Безусловно, данное предположение подразумевает проведение в будущем специальных экспериментальных исследований. По их результатам можно будет судить об эффективности модульных регрессий и о том, какое место они занимают в области машинного обучения. К тому же вызывает научный интерес задача сопоставления вычислительных аспектов МНК и МНМ при оценивании модульных регрессий.

Список источников

1. Рашка С. Python и машинное обучение: пер. с англ / С. Рашка. – М.: Диалектика-Вильямс, 2022. – 848 с.
2. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных: пер. с англ / П. Флах. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 402 с.
3. Тищенко С.А. Методы машинного обучения в малом бизнесе: содержание и управление / С.А. Тищенко, М.А. Шахмурадян // Вестник Российского экономического университета им. ГВ Плеханова, 2019. – № 6 (108). – С. 83-95.
4. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining, G.G. Introduction to linear regression analysis, John Wiley & Sons, 2021, 704 p.
5. Zabor E.C., Reddy C.A., Tendulkar R.D., Patil S. Logistic regression in clinical studies. International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 2021, v.112(2), pp.271-277.
6. Narayan V., Daniel A.K. Energy efficient protocol for lifetime prediction of wireless sensor network using multivariate polynomial regression model. Journal of Scientific & Industrial Research, 2022, v. 81(12), pp. 1297-1309.
7. Базилевский М.П. Метод построения неэлементарных линейных регрессий на основе аппарата математического программирования / М.П. Базилевский // Проблемы управления, 2022. – № 4. – С. 3-14.
8. Базилевский М.П. Оценивание линейно-неэлементарных регрессионных моделей с помощью метода наименьших квадратов / М.П. Базилевский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020. – Т. 8. – № 4 (31).
9. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение / Г.Б. Клейнер. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
10. Носков С.И. Программный комплекс построения некоторых типов кусочно-линейных регрессий / С.И. Носков, А.А. Хоняков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2019. – № 3 (4). – С. 47-55.
11. Базилевский М.П. Моделирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Забайкальского края / М.П. Базилевский, А.Б. Ойдопова // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2022. – № 2 (14). – С. 8-18.
12. Базилевский М.П. Оценивание модульных линейных регрессионных моделей с помощью метода наименьших модулей / М.П. Базилевский, А.Б. Ойдопова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2023. – № 45. – С. 130-146.
13. Ворона А.А. Тенденции и перспективы грузооборота железнодорожного транспорта в России / А.А. Ворона // Таможенная политика России на Дальнем Востоке, – 2020. – № 3(92). – С. 93-99.
14. Краковский Ю.М. Разработка многофакторных моделей прогнозирования грузооборота и объема перевезенных грузов / Ю.М. Краковский, Т. Давааням // Современные технологии, системный анализ, моделирование, 2014. – №4 (44). – С. 110-113.
15. Об утверждении Положения об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ и положения об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ: распоряжение ОАО «РЖД» N 2160/р от 1 октября 2018 г. – 69 с.

16. Классификатор опасных отказов технических средств хозяйства пути и сооружений утвержден и введен в действие Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 апреля 2006 г. – 821 с.
17. Гусев С. Итоги работы ОАО «РЖД» в 2022 году превзошли ожидания / С. Гусев // «Гудок» Экономика. Электрон. журн., 2023. – URL: https://gudok.ru/news/util_avto (дата обращения: 01.04.2023).
18. Герасимов А.Н. Эконометрика (продвинутый уровень) / А.Н. Герасимов, Е.И. Громов, Ю.С. Скрипниченко – М.: Феникс, 2016. – 272 с. – EDN: XADINH.

Базилевский Михаил Павлович. Доцент, кандидат технических наук, Иркутский государственный университет путей сообщения. AuthorID: 679277, SPIN: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского д.15

UDC 519.862.6

DOI:10.5729/ESI.2023.31.3.013

Software for estimating modular linear regressions

Mikhail P. Bazilevskiy

Irkutsk State Transport University,

Irkutsk, Russian Federation, mik2178@yandex.ru

Abstract. Previously, the author proposed modular linear regression models containing as regressors modules of deviations of the values of explanatory variables from unknown coefficients. An algorithm for their exact estimation using the least absolute deviation and an algorithm for approximate estimation using the least squares method is known. Software products implementing these algorithms have not been developed until today. This article is devoted to the description of the software package developed by the author for evaluating modular linear regressions (PC MODULIR-1). In it, when evaluating modular linear regression using the method of smallest modules according to the specified settings, a mixed-integer 0-1 linear programming problem for the LPSolve package is automatically generated. And in the case of approximate estimation using the least squares method, a complete search of all possible model variants is carried out and the best modular regression with all coefficients significant according to the Student's t-test is selected. The problem of modeling the freight turnover of railway transport in the Zabaykalsky krai was solved with the help of PC MODULAR-1. The coefficient of determination of the modular regression constructed using the least squares method with five explanatory variables was 0.94, which is about 4 times higher than that of traditional linear regression. At the same time, all the coefficients of modular regression turned out to be significant according to the Student's t-test. It is shown how the constructed modular regression can be interpreted.

Keywords: modular regressions, software, least absolute deviation, least squares method, coefficient of determination, Student's t-test, cargo turnover

References

1. Rashka S. Python i mashinnoye obucheniye [Python and machine learning]. – М.: Dialektika-Vil'yams [Dialectics-Williams], 2022, 848 p.
2. Flach P. Mashinnoye obucheniye. Nauka i iskusstvo postroyeniya algoritmov, kotoryye izvlekayut znaniya iz dannykh [Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data]. М., DMK Press, 2022, 402 p.
3. Tishchenko S.A., Shakhmuradyan M. A. Metody mashinnogo obycheniya v malom biznese: soderganie i upravlenie [Methods of machine-aided training in small business: content and management]. Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. GV Plehanova [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2019, vol.6, pp. 83-95.
4. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining, G. G. Introduction to linear regression analysis, John Wiley & Sons, 2021, p. 704.
5. Zabor E.C., Reddy C.A., Tendulkar R.D., Patil S. Logistic regression in clinical studies. International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 2021, v.112(2), pp.271-277.
6. Narayan V., Daniel A.K. Energy efficient protocol for lifetime prediction of wireless sensor network using multivariate polynomial regression model. Journal of Scientific & Industrial Research, 2022, v.81(12), pp.1297-1309.

7. Bazilevsky M.P. Metod postroeniya neelementarnykh lineynykh regressiy na osnove apparata matematicheskogo programmirovaniya [A method for constructing nonelementary linear regressions based on mathematical programming]. Problemy upravleniya [Control Sciences], 2022, no. 4, pp. 3-14.
8. Bazilevsky M.P. Otsenivanie lineynoy-neelementarnykh regressionnykh modelei s pomoschyu metoda naimenshikh kvadratov [Estimation linear non-elementary regression models using ordinary least squares]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [The scientific journal modeling, optimization and information technology], 2020, vol. 8, no. 4 (31).
9. Kleiner G.B. Proizvodstvennye funktsii: teoriya, metody, primeneniye [Production functions: theory, methods, application]. M.: Finansy i statistika [Moscow, Finance and statistics], 1986, 239 p.
10. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Programnyi kompleks postroeniya nekotorykh tipov kusochno-lineynykh regressiy [Software complex for building some types pieces of linear regressions]. Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnyimi sistemami [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems], 2019, no. 3(4), pp. 47-55.
11. Bazilevsky M.P., Oydopova A.B. Modelirovaniye vibrosoy zagryaznyushchikh veshchestv v atmosfere Zabaykalskogo kraya [Modeling of emissions of pollutants into the atmosphere of the Zabaikalsky kray]. Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnyimi sistemami [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems], 2022, no. 2 (14), pp. 8-18.
12. Bazilevsky M.P., Oydopova A.B. Otsenivanie modulnykh lineynykh regressionnykh modelei s pomoschyu metoda naimenshikh modulei [Estimation of modular linear regression models using the least absolute deviations]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya [Perm National Research Polytechnic University Bulletin. electro-technics, informational technologies, control systems], 2023, no. 45, pp. 130-146.
13. Vorona A.A. Tendentsii i perspektivi gruzooborota geleznodorozhnogo transporta v Rossii [Trends and prospects of freight turnover of railway transport in Russia]. Tamozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke [The scientific and practical journal Customs Policy of Russia in the Far East], 2020, no. 3(92), pp. 93-99.
14. Krakovskiy Y.M., Tamir D. Razrabotka mnogofakturnykh modelei prognozirovaniya gruzooborota i obiema perevezennykh gruzov [Development of the multivariate model for goods turnover forecasting and transported cargo volume]. Sovremennyye tekhnologii, sistemnyy analiz, modelirovaniye [Modern technologies system analysis modeling], 2014, no. 4 (44), pp. 110-113.
15. Ob utverzhdenii Polozheniya ob uchete, rassledovanii i analize otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv na infrastrukture OAO "RZHD" s ispol'zovaniyem avtomatizirovannoy sistemy KASANT i polozheniya ob uchete, rassledovanii i analize tekhnologicheskikh narusheniy v perevozochnom protsesse na infrastrukturu OAO "RZHD" s ispol'zovaniyem avtomatizirovannoy sistemy KASAT: rasporyazheniye OAO "RZHD" N 2160/r ot 1 oktyabrya [On approval of the Regulations on accounting, investigation and analysis of failures in the operation of technical means on the infrastructure of "The Russian Railways" using the automated system KASANT and regulations on accounting, investigation and analysis of technological violations in the transportation process on the infrastructure of JSC "Russian Railways" using the automated system KASAT: order of JSC "Russian Railways" N 2160/r, October, 1], 2018, 69 p.
16. Klassifikator opasnykh otkazov tekhnicheskikh sredstv khozyaystva puti i sooruzheniy utverzhden i vveden v deystviye Rasporyazheniyem OAO "RZHD" ot 28 aprelya [The classifier of dangerous failures of technical means of track management and structures was approved and put into effect by the Order of "The Russian Railways" dated April 28], 2006, 821 p.
17. Gusev S.I. Itogi raboty OAO «RZD» v 2022 godu prevzoshly ogidaniya [The results of the work of «The Russian Railways» in 2022 exceeded expectations]. "Gudok" Ekonomika Elektron. zhurn ["Gudok" Economy], 2023, available at: https://gudok.ru/news/util_avto (accessed: 04/01/2023).
18. Gerasimov A.N. Ekonometrika (prodvinytyi uroven) [Econometrics, advanced level], Moscow, Phoenix, 2016, 272 p., EDN: XADINH.

Mikhail Pavlovich Bazilevskiy. Associate professor, candidate of technical sciences, Irkutsk state transport university. AuthorID: 679277, SPIN: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Russia, Irkutsk, 15 Chernyshevskogo St.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023; одобрена после рецензирования 11.07.2023; принята к публикации 17.08.2023.

The article was submitted 06/28/2023; approved after reviewing 07/11/2023; accepted for publication 08/17/2023.

УДК 004.94:691.32

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.014

Экспериментально-теоретический подход к оценке параметров макрокинетики гидратации цементных систем

Когай Алина Дмитриевна, Дмитриева Мария Александровна

Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

Россия, Калининград, *ad.kogai@yandex.ru*

Аннотация. В работе обсуждается предложенный экспериментально-теоретический подход к оценке параметров макрокинетики гидратации многокомпонентных бетонов с частичным замещением цемента микрокремнеземом и цеолитом. Параметры энергии активации необходимы для анализа реакционной способности используемых компонентов и моделирования процесса набора ранней прочности бетона с позиций модели связанных физико-химических процессов в реагирующих средах. Для определения макрокинетических параметров гидратации используется метод изотермической калориметрии. Результаты расчетов показали эффективность данного подхода для получения информации об активности исследуемых комплексных вяжущих.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, гидратация цемента, мелкозернистый бетон, добавки, макрокинетика, энергия активации

Цитирование: Когай А.Д. Экспериментально-теоретический подход к оценке параметров макрокинетики гидратации цементных систем / А.Д. Когай, М.А. Дмитриева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С.147-155. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.014.

Введение. Бетон является представителем реакционных композиционных материалов, в основе структурообразования которого лежит реакция гидратации – процесс связывания воды и клинкерных минералов цемента в кристаллогидраты – основные носители прочностных характеристик бетона. Интенсивность, продолжительность и общий характер реакции определяют механизмы набора прочности бетона для достижения предъявляемых требований к физико-механическим характеристикам материала. Возможность регулирования и прогнозирования гидратационных процессов цементных систем в бетоне позволяет создавать современные строительные материалы с заданными свойствами.

Гидратационные процессы в бетоне, сопровождающие набор прочностных характеристик, являются сложными, многофазовыми и многостадийными, однако к настоящему времени известны основные и общепринятые механизмы структурообразования бетона [1]. Гидратация цемента начинается с гидролиза его составляющих сразу же после затворения смеси водой, при этом формируемая система является динамично развивающейся во времени, и все первоначальные характеристики структуры непрерывно изменяются. Поэтому гидратацию цемента принято рассматривать в совокупности отдельных периодов, каждый из которых характеризуется собственным спектром характеристик, отражающих интенсивность и скорость реакции. Как правило, выделяют пять периодов гидратации, а именно: начальный, индукционный, ускоренный, замедленный и период твердения (медленного взаимодействия) [2]. В течение начального периода трехкальциевый силикат C_3S активно вступает в реакцию с водой, что характеризуется резким скачком тепловыделения, после чего скорость реакции падает с образованием пленки вокруг первичных гидратированных частиц цемента, что, в свою очередь, определяет начало следующего периода. Индукционный период характеризуется низкой скоростью реакции и сохранением пластичности цементного теста. Многие авторы утверждают, что причина снижения интенсивности гидратации заключается в затратах энергии на разрушение защитного слоя вокруг зерен цемента в системе [3, 4]. Следующий этап определяется самоускорением и высокой интенсивностью реакции гидратации, что вызвано срастанием гидратированных частиц в единую систему. Далее скорость тепловыделения падает и к пятому периоду в течение окончания реакции выделяется небольшое количество теплоты.

Сложность описания многофазовых превращений способствует развитию модельных представлений о гидратации, позволяющих детально исследовать все основные механизмы реакции. При этом, учитывая, что прочность бетона первостепенно зависит от прочности формируемого цементного камня, математическое моделирование ее набора сводится к определению прочности именно цементной фазы [5].

Многоступенчатый и многофазовый характер гидратации способствуют развитию множества подходов к изучению реакции, заложенных в основу модельных представлений о гидратации цемента. Многостороннее развитие подходов к моделированию необходимо для лучшего понимания механизмов гидратации и требует учета наиболее значимых факторов, влияющих на набор прочности материала, например, многокомпонентного состава и влияния добавок и наполнителей на свойства бетона. Простейшие модели позволяют описывать основные изменения на начальных этапах реакции [6], более сложные и комплексные используются для прогнозирования химических и физических явлений на поздних стадиях [7, 8].

Самые ранние простейшие модели гидратации цемента основывались на описании гидратации одной частицы, как правило, трехкальциевого силиката C_3S . Например, в модели Р.Кондо [9] описывается механика формирования защитного слоя на поверхности частицы цемента после контакта с водой и влияние его толщины на процесс растворения. В данной работе автор сделал предположение, что рост метастабильного слоя замедляет тепловыделение и объясняет наступление индукционного периода. Данная модель легла в основу работы Поммершайма, Клифтона и Фронсдоффа [10], в которой также описывается одночастичная гидратация, но более строго с математической точки зрения, описывая диффузию на границе двух фаз. Решение основано на балансе массы сокращающегося ядра C_3S и растущего слоя продукта гидратации. Однако эти модели не описывают кинетику реакции полидисперсных порошков с учетом межчастичного взаимодействия и эффекта гранулометрической картины системы.

Дальнейшее развитие моделей принимало во внимание гранулометрический эффект и различную удельную поверхность частиц, базируясь на значениях размерности частиц и показателе влажности системы. Так, в 1984 году был сформулирован ряд уравнений [8] для моделирования гидратации каждой клинкерной фазы (трехкальциевого силиката C_3S , двухкальциевого силиката C_2S , трехкальциевого алюмината C_3A и четырехкальциевого алюмоферрита C_4AF). Данная система уравнений является существенно модифицированной версией более ранних одночастичных моделей, применяемых к каждой фазе клинкера, но скорректированной с учетом глобальных микроструктурных эффектов. Важно отметить, что подобные модели могут адекватно спрогнозировать свойства только тех цементных смесей, параметры которых заложены в основу подгоночных коэффициентов, что осложняет их применение касательно смесей с иными параметрами.

Новое поколение имитационных моделей гидратации цемента зарождалось постепенно, так как нехватка вычислительных мощностей тормозила их развитие. В 1986 году была опубликована модель [11], частицы цемента в которой были представлены в виде сфер, помещенных в кубический объем пасты из воды и песка. В основе моделирования процесса гидратации лежал рост слоев продукта реакции на поверхности частиц, но с учетом их распределения по размерам и фазам, расположению ядер и общего объема. Однако, в предложенной модели отсутствовал учет химии порового пространства и фильтрации воды по твердофазному каркасу. Модель HYMOSTRUC [12], представленная в 1997 году, имела похожую концепцию и учитывала микроструктурные изменения растворения и осаждения отдельных фаз статическим образом, но, как и предыдущая, не учитывала химию раствора. Позже появилась ее более рас-

ширенная версия [13], позволяющая выполнять расчет усадки и анализ пор. Наиболее развитой является модель HydratiCA [14], основанная на принципах детального баланса и действия масс, которые используются для объединения всех кинетических процессов в единую структуру моделирования.

Составы современных бетонов проектируют с учетом наполняющих добавок различного спектра действия, используемых для придания определенных свойств композиту. Отдельные виды наполнителей, к которым можно отнести микрокремнезем, золу-уноса, известь, доменный шлак и т. д., могут выступать в качестве дополнительных вяжущих материалов. Замещающая часть вяжущего, добавки способствуют улучшению экологических и эксплуатационных характеристик материала [15], так как их использование ведет к минимизации энергопотребления и выбросов углекислого газа при производстве цемента [16]. Оказываемый эффект может быть оценен по изменению физико-механических характеристик бетонов, полученных на основе комплексных вяжущих с частичной заменой цемента добавкой, при этом может наблюдаться увеличение показателей качества материала в различные моменты твердения системы [17, 18]. Изменение гидратационных процессов и химического состава реагентов и продуктов реакции оказывает существенное влияние на свойства бетона, в связи с чем при прогнозировании и моделировании набора прочности бетона необходимо учитывать реакционную способность наполнителя и его свойства.

Начальное структурообразование реакционных композиционных материалов на основе цемента можно прогнозировать на базе модели связанных процессов в реагирующих средах [19]. Макрокинетический подход, лежащий в основе предложенной модели, позволяет описать активационную природу гидратации. Макрокинетика процессов гидратации цемента на начальных этапах удовлетворяет уравнению Аррениуса (1), устанавливающего зависимость константы скорости реакции от температуры:

$$k = A \cdot \exp(-E_a/RT), \quad (1)$$

где T – температура; R – универсальная газовая постоянная; E_a – энергия активации; A – предэкспоненциальный множитель.

Определение кажущейся энергии активации возможно с применением метода изотермической калориметрии путем фиксации температурного параметра. С учетом экзотермического характера гидратации цемента кинетика тепловыделения дает возможность оценить стадию завершенности процесса, тем самым позволяя установить связь между степенью гидратации и временем. Степень гидратации может быть определена по изменению теплоты реакции.

Помимо макрокинетики химических превращений в математическую модель входят нестационарные задачи теплового баланса и фильтрационные процессы [6, 19]. Исследуемый материал рассматривается как смесь реагентов с инертным наполнителем, однако, как обсуждалось ранее, современные бетоны характеризуются более сложным многокомпонентным составом, включающим различные модифицирующие добавки, применяемые для достижения требований к реологическим и прочностным характеристикам композита. В этой связи актуальным направлением исследования является развитие подходов определения параметров макрокинетики гидратации многокомпонентных цементных систем.

Материалы и методы. В качестве основного вяжущего компонента был выбран цемент марки М500, которой соответствует класс прочности I 42,5 производства ООО «Петербургцемент». В качестве модифицирующих компонентов были использованы активные минеральные добавки техногенного и природного происхождения. Среди материалов, получаемых в качестве отходов производства, можно выделить микрокремнезем, синтезируемый как побочный продукт выплавки ферросилиция. Благодаря наличию диоксида кремния аморфной модифи-

кации микрокремнезем активно участвует в процессах гидратации цемента, а ультрадисперсный характер частиц способствует уплотнению структуры бетона [20]. Применение природных материалов, таких, как цеолит, актуально для отдаленных регионов, в которых остро стоит вопрос нехватки местного сырья для производства строительных материалов. Цеолиты представляют собой минералы вулканическо-осадочного происхождения, реактивный кремнезем в составе которых вместе с оксидом алюминия способствует улучшению процессов структурообразования бетона [21,22].

Исследуемые составы формировались путем частичного замещения цемента минеральными наполнителями: состав №1 – базовый (контрольный), состав №2 – с 5% микрокремнезема (МКР5), состав №3 – с 10% микрокремнезема (МКР10), состав №4 – с 5% цеолита (ЦЕО5), состав №5 – с 10% цеолита (ЦЕО10).

Учет дополнительных компонентов в модели связанных физико-химических процессов в реагирующих средах требует установления механизмов действия добавок и их влияния на развитие реакционной активности системы. Последнее можно оценить по изменению тепловыделения комплексного вяжущего. Количественное определение параметров теплоты гидратации модифицированных цементных систем производилось методом изотермической калориметрии с использованием 8-канального калориметра ТАМ Air. В стеклянные ампулы объемом 20 мл помещалась навеска 6 г комплексного вяжущего, полученного путем замещения части цемента добавкой, которая затворялась 3 мл воды. Емкость герметизировалась крышкой и помещалась в соответствующий канал. В парное отделение помещалась ампула с эталонным инертным заполнителем – песком. Испытания проводились при обеспечении внутри каждого канала постоянной температуры 20, 30, 40 ($\pm 0,02$) °С.

Результаты и обсуждение. По итогам калориметрического анализа были получены значения теплового потока системы, отслеживаемого на протяжении всего испытания. Для анализа изменения гидратационной активности комплексных вяжущих на основе интегрирования теплового потока были построены графики зависимости суммарной тепловой энергии от времени по нормализованным значениям, приведенным к массе образцов (рис.1 и 2).

На представленных графиках отдельно выделен период гидратации, ограниченный 10 часами, так как в разрабатываемой модели связанных процессов в реагирующих средах в настоящее время особое внимание уделяется начальному структурообразованию бетонной смеси. Можно наблюдать, что с введением добавок суммарная тепловая энергия системы не претерпевает значительных изменений. Однако, отмечается следующая тенденция: при 20°С для всех составов характерно увеличение тепловыделения с ростом концентрации добавки, при 30°С графики практически накладываются друг на друга, при 40°С отмечается уменьшение тепловыделения с ростом концентрации модификатора.

Степень превращения можно определить по изменению теплоты гидратации в соответствии с формулой (2):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{Q_m} \frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

где: Q_m – максимальное значение суммарной тепловой энергии, Дж [23].

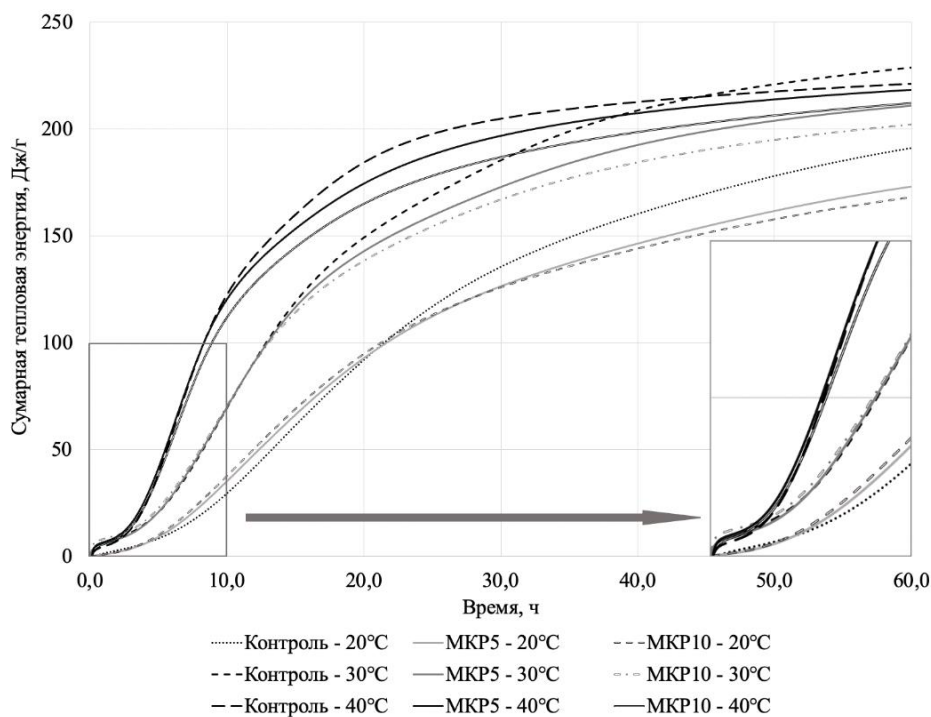


Рис.1. Графики суммарной тепловой энергии составов с введением микрокремнезема

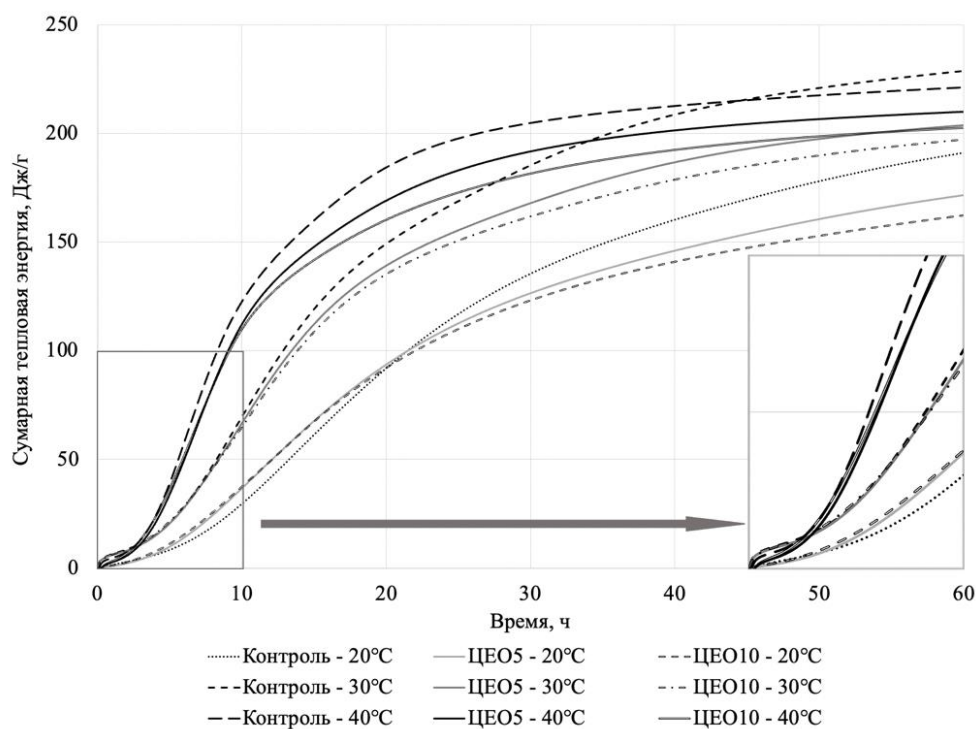


Рис.2. Графики суммарной тепловой энергии составов с введением цеолита

Оценить скорость реакции можно по интенсивности химических превращений одного из компонентов смеси. Так как в процессе гидратации наблюдаются транспортные процессы жидкой фазы в теле каркаса, что усложняет оценку ее превращения, необходимо рассматривать константу скорости реакции с учетом степени гидратации цемента: $k = \partial z / \partial t$. Принимая $k = \partial z / \partial t$ и прописываем уравнение (1) в логарифмической форме:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT} \quad (3)$$

Энергия активации для каждого исследуемого состава определяется из решения задачи оптимизации методом наименьших квадратов:

$$F(A, E_a) \rightarrow \min, \quad (4)$$

при условии $A = \text{const}$.

В качестве целевой функции принимается величина F , определяемая выражением (5):

$$F = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - y_i)^2, \quad (5)$$

где: $\bar{x}_i$ – среднее значение логарифма константы скорости реакции гидратации, определяемой по формуле (2) с использованием результатов, полученных экспериментально методом изотермической калориметрии при температуре T_i , ($i=1...n$); $y_i = \ln k$, определяемое по формуле (3).

В соответствии с полученными результатами можно заключить, что с увеличением дозировки, вводимой по массе цемента добавки, уменьшаются значения энергии активации, необходимой для инициирования реакции с водой. Следовательно, рассматриваемые добавки на начальных этапах структурообразования проявляют себя как активные компоненты, вступающие в химическую реакцию.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Энергия активации исследуемых составов

Состав	Энергия активации E_a , кДж/моль
№1 (контрольный)	51,058
№2 (МКР5)	46,695
№3 (МКР10)	41,443
№4 (ЦЕО5)	43,331
№5 (ЦЕО10)	41,675

Проведенные расчеты показали, что исследуемые комплексные вяжущие обладают меньшими значениями энергии активации в сравнении с цементом.

Заключение. По результатам данной работы была показана эффективность предлагаемого подхода для определения макрокинетических параметров гидратации многокомпонентных цементных систем, модифицированных минеральными добавками, с применением метода изотермической калориметрии. Активационная природа гидратации позволяет применять закон Аррениуса для описания скорости химической реакции в зависимости от температуры в рамках моделирования процесса набора ранней прочности реакционных композиционных материалов на основе цемента. При моделировании гидратации исследуемых составов исследуемые добавки будут рассматриваться как реагенты.

Список источников

1. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента / В.А. Лотов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 99-110.
2. Вовк А.И. Гидратация C_3S и структура C-S-H-фазы: новые подходы, гипотезы и данные / А.И. Вовк // Цемент и его применение, 2012. – № 3. – С. 89-92.
3. Эльмурзаев М.Б. Механизм формирования на цементном зерне защитного слоя, определяющего продолжительность индукционного периода / М.Б. Эльмурзаев, В.Х. Межидов, С-А.Ю. Муртазаев // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2015. – № 1. – С. 16-21.
4. Лотов В.А. Периодичность процессов гидратации и твердения цемента / В.А. Лотов // Строительные материалы, 2018. – № 7. – С. 55-59.
5. Федосов С.В. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Ибрагимов и др. // Строительные материалы, 2011. – № 11. – С. 38-41.

6. Когай А.Д. Развитие модельных представлений о гидратации цемента / А.Д. Когай // VII Международный студенческий строительный форум - 2022: Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 227-233.
7. Tomosawa F. Development of a kinetic model for hydration of cement. In: H. Justnes (Ed.). Proceedings of the tenth international congress on the chemistry of cement, Göteborg, Sweden, 1997, pp. 20-51.
8. Parrot L.J., Killoh D.C. Prediction of cement hydration. Proceedings of the British ceramic society, 1984, no.35, pp. 41-53.
9. Kondo R., Ueda S. Kinetics and mechanisms of the hydration of cements. Proceedings of the fifth international symposium on the chemistry of cement, Tokyo, 1968, pp. 203-248.
10. Pommersheim J.M., Clifton J.R., Frohnsdorff G. Mathematical modeling of tricalcium silicate hydration. Hydration submodels and the effect of model parameters. Cement and concrete research, 1982, no. 12, pp. 765-772.
11. Jennings H.M., Johnson S.K. Simulation of microstructure development during the hydration of a cement compound. Journal of the American Ceramic Society, 1986, no. 69, pp. 790-795.
12. Bentz D.P. Three-dimensional computer simulation of cement hydration and microstructure development. Journal of the American Ceramic Society, 1997, no. 80, pp. 3-21, DOI:10.1111/j.1151-2916.1997.tb02785.x.
13. Koenders E.A.B., Breugel K. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. Cement and concrete research, 1997, no. 27, pp. 1489-1499, DOI:10.1016/S0008-8846(97)00170-1.
14. Bullard J.W. A three-dimensional microstructural model of reactions and transport in aqueous mineral systems. Modelling and simulation in materials science and engineering, 2007, no. 15, pp. 711-738, DOI:10.1088/0965-0393/15/7/002.
15. Juenger M.C., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. Cement and concrete research, 2015, no. 78, pp. 71-80, DOI:10.1016/j.cemconres.2015.03.018.
16. Wang D., Zhou X., Meng Y., Chen Z. Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing- thawing and sulfate attack. Construction and building materials, 2017, no. 147, pp. 398-406, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.172.
17. Lee B., Kim G., Nam J., Cho B., Hama Y., Kim R. Compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and freezing/thawing of slag-replaced concrete and cementless slag concrete containing desulfurization slag activator. Construction and building materials, 2016, no.128, pp. 341-348, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.075.
18. Yoo S.-W., Kwon S.-J. Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBF. Construction and building materials, 2016, no. 115, pp. 247-255, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.010.
19. Лейцин В.Н. Моделирование связанных процессов в реагирующих средах: монография / В.Н. Лейцин, М.А. Дмитриева. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2012. – 240 с.
20. Бабков В.В. Аморфный микрокремнезем в процессах структурообразования и упрочнения цементного камня / В.В. Бабков, А.И. Габитов, Р.Р. Сахибгареев // Башкирский химический журнал, 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 206-210.
21. Rahul P., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V. Durability assessment of Self-Curing high performance concretes containing zeolite admixture. Materials Today: Proceedings, 2022, DOI:10.1016/j.matpr.2022.01.352.
22. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Ali Libre N., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. Structures, 2021, no. 34, pp. 2617-2627, DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.025.
23. Kada-Benameur H., Wirquin E., Duthoit B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. Cement and concrete research, 2000, no. 30, pp. 301-305, DOI:10.1016/S0008-8846(99)00250-1.

Когай Алина Дмитриевна. Аспирант, ассистент ОНК «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта. Основное направление исследований: компьютерное моделирование процессов набора прочности бетонов, аддитивные технологии, современные строительные бетоны. Author ID: 1091769, SPIN: 3535-8391, ORCID: 0000-0002-1635-9371, ad.kogai@yandex.ru, Калининград, Александра Невского, 14.

Дмитриева Мария Александровна. Доктор физико-математических наук, профессор ОНК «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта. Основное направление исследований: компьютерное моделирование процессов синтеза материалов, механика многофазных сред, механохимия. Author ID 115921, SPIN 9582-8995, ORCID 0000-0002-9593-8653, admitrieva@kantiana.ru, Калининград, Александра Невского, 14.

Experimental-theoretical approach to estimating the parameters of the macrokinetics of cement systems hydration

Alina D. Kogai, Maria A. Dmitrieva

Immanuel Kant Baltic Federal University,
Russia, Kaliningrad, ad.kogai@yandex.ru

Abstract. The paper discusses the proposed experimental-theoretical approach for estimating the parameters of the macrokinetics of hydration of multicomponent cement systems with partial replacement of cement with silica fume and zeolite. Activation energy parameters are necessary to analyze the reactivity of the components used and to model the process of curing concrete from the standpoint of a model of related physical and chemical processes in reacting media. Isothermal calorimetry is used to determine the macrokinetic parameters of hydration. The calculation results showed the effectiveness of this approach for obtaining information about the activity of the investigated complex binders and their modeling.

Keywords: computer modeling, cement hydration, fine-grained concrete, additives, macrokinetics, activation energy

References

1. Lotov V.A. O vzaimodejstvii chastic cementa s vodoj ili variant mekhanizma processov gidratatsii i tverdeniya cementa [On the interaction of cement particles with water or a variant of the mechanism of the processes of hydration and hardening of cement]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 2018, vol. 329, no. 1, pp. 99-110.
2. Vovk A.I. Gidratatsiya C3S i struktura C-S-H-fazy: novye podhody, gipotezy i dannye [Hydration of C3S and the structure of the C-S-H phase: new approaches, hypotheses and data]. *Cement i ego primeneniye* [Cement and its application], 2012, no. 3, pp. 89-92.
3. El'murzaev M.B., Mezhidov V.H., Murtazaev S-A.YU. Mekhanizm formirovaniya na cementnom zerne zashchitnogo sloya, opredelyayushchego prodolzhitel'nost' indukcionnogo perioda [The mechanism of formation of a protective layer on the cement grain, which determines the duration of the induction period]. *Vestnik BGTU im. V.G.SHuhova* [Vestnik BSTU im. V.G. Shukhova], 2015, no. 1, pp. 16-21.
4. Lotov V.A. Periodichnost' processov gidratatsii i tverdeniya cementa [Periodicity of the processes of hydration and hardening of cement]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2018, no.7, pp.55-59.
5. Fedosov S.V., Bobylev V.I., Ibragimov A.M., Kozlova V.K., Sokolov A.M. Modelirovanie nabora prochnosti betonom pri gidratatsii cementa [Simulation of concrete strength development during cement hydration]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2011, no.11, pp. 38-41.
6. Kogai A.D. Razvitiye model'nyh predstavlenij o gidratatsii cementa [Development of model ideas about cement hydration]. VII Mezhdunarodnyj studencheskij stroitel'nyj forum - 2022: Sbornik dokladov VII Mezhdunarodnogo studencheskogo stroitel'nogo foruma, Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova [VII International Student Building Forum - 2022: Collection of reports of the VII International Student Building Forum, Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova], 2022, pp.227-233.
7. Tomosawa F. Development of a kinetic model for hydration of cement. In: H. Justnes (Ed.). *Proceedings of the tenth international congress on the chemistry of cement*, Göteborg, Sweden, 1997, pp. 20-51.
8. Parrot L.J., Killoh D.C. Prediction of cement hydration. *Proceedings of the British ceramic society*, 1984, no. 35, pp. 41-53.
9. Kondo R., Ueda S. Kinetics and mechanisms of the hydration of cements. *Proceedings of the fifth international symposium on the chemistry of cement*, Tokyo, 1968, pp. 203-248.
10. Pommersheim J.M., Clifton J.R., Frohnsdorff G. Mathematical modeling of tricalcium silicate hydration. Hydration submodels and the effect of model parameters. *Cement and concrete research*, 1982, no. 12, pp. 765-772.
11. Jennings H.M., Johnson S.K. Simulation of microstructure development during the hydration of a cement compound. *Journal of the American Ceramic Society*, 1986, no. 69, pp. 790-795.
12. Bentz D.P. Three-dimensional computer simulation of cement hydration and microstructure development. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, no. 80, pp. 3-21, DOI:10.1111/j.1151-2916.1997.tb02785.x.
13. Koenders E.A.B., Breugel K. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and concrete research*, 1997, no. 27, pp. 1489-1499, DOI:10.1016/S0008-8846(97)00170-1.

14. Bullard J.W. A three-dimensional microstructural model of reactions and transport in aqueous mineral systems. Modelling and simulation in materials science and engineering, 2007, no. 15, pp. 711-738, DOI:10.1088/0965-0393/15/7/002.
15. Juenger M.C., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. Cement and concrete research, 2015, no. 78, pp. 71-80, DOI:10.1016/j.cemconres.2015.03.018.
16. Wang D., Zhou X., Meng Y., Chen Z. Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing- thawing and sulfate attack. Construction and building materials, 2017, no. 147, pp. 398-406, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.172.
17. Lee B., Kim G., Nam J., Cho B., Hama Y., Kim R. Compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and freezing/thawing of slag-replaced concrete and cementless slag concrete containing desulfurization slag activator. Construction and building materials, 2016, no. 128, pp. 341-348, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.075.
18. Yoo S.-W., Kwon S.-J. Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBF. Construction and building materials, 2016, no. 115, pp. 247-255, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.010.
19. Lejcin V.N., Dmitrieva M.A. Modelirovanie svyazannyh processov v reagiruyushchih sredah [Modeling of coupled processes in reacting media]. Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta [Kaliningrad: Izd-vo IKBFU], 2012, 240 p.
20. Babkov V.V., Gabitov A.I., Sahibgareev R.R. Amorfnyj mikrokremnezem v processah strukturoobrazovaniya i uprochneniya cementnogo kamnya [Amorphous microsilica in the processes of structure formation and hardening of cement stone]. Bashkirskij himicheskij zhurnal [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 206-210.
21. Rahul P., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V. Durability assessment of Self-Curing high performance concretes containing zeolite admixture. Materials Today: Proceedings, 2022, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.352.
22. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Ali Libre N., Nasrollahpour S. Characterizing fiber rein-forced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. Structures, 2021, no. 34, pp. 2617-2627. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.025.
23. Kada-Benameur H., Wirquin E., Duthoit B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. Cement and concrete research, 2000, no. 30, pp. 301-305.

Kogai Alina Dmitrievna. Post-graduate student, assistant at the Institute of High Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University. The main area of research: computer modeling of concrete strength curing processes, additive technologies, modern building concretes. Author ID: 1091769, SPIN: 3535-8391, ORCID: 0000-0002-1635-9371, ad.kogai@yandex.ru, Kaliningrad, Alexander Nevsky, 14.

Dmitrieva Maria Aleksandrovna. Doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Institute of high technologies of the Baltic Federal University named after Immanuel Kant. Main area of research: computer simulation of materials synthesis processes, mechanics of multiphase media, mechanochemistry. Author ID: 115921, SPIN: 9582-8995, ORCID: 0000-0002-9593-8653, admtrieva@kantiana.ru, Kaliningrad, Alexander Nevsky, 14.

Статья поступила в редакцию 30.08.2023; одобрена после рецензирования 08.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 08/30/2023; approved after reviewing 09/08/2023; accepted for publication 09/25/2023.

УДК 519.248; 519.254

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.015

Алгоритм предобработки музыкального ряда для его продолжения на основе аппарата анализа нестационарных временных рядов

Фомин Дмитрий Андреевич, Колесникова Светлана Ивановна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, demetrey@ro.ru

Аннотация. Представлен подход к предобработке музыкального ряда, реализующий его алгоритм и результаты применения к задаче продления музыкальной композиции, интерпретированной как нестационарный временной ряд, к которому применен метод модовой декомпозиции с последующей оригинальной обработкой функций внутренних мод для построения правила прогноза.

Ключевые слова: временной ряд, музыкальная композиция, генерация продолжения композиции, алгоритм модовой декомпозиции, горизонт прогноза

Цитирование: Фомин Д.А. Алгоритм предобработки музыкального ряда для его продолжения на основе аппарата анализа нестационарных временных рядов / Д.А. Фомин, С.И. Колесникова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 156-166. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.015.

Введение. Под «автоматизацией искусства» понимают роботизацию некоторых простых творческих процессов через совершенствование и разработку новых методов, алгоритмов для целевой аудитории определенной направленности: музыканты/композиторы, звукорежиссеры, разработчики игровой индустрии и т.д.

Под простыми здесь понимаются процессы, машинное представление которых обеспечивает сохранение исходной информации и «поддается» алгоритмизации без ее критической потери. В частности, простейшие полифонические мелодии, представляющие сумму мелодий, в которых имеется звучание одной ноты, удовлетворяют этому требованию.

Автоматизация генерации музыкальных композиций может быть сведена к предсказанию последовательностей нот, звуков (волн). Несмотря на существование четкой формализации основ составления музыкальных композиций, правила эти нередко нарушаются самими композиторами, поэтому задача воссоздания процесса сочинения мелодии человеком («поверить алгеброй гармонию») крайне проблематична и в целом не решена даже с появлением удобного формата MIDI (Musical Instrument Digital Interface) для реализации замыслов музыкантов и имеющих непосредственное отношение к продуцированию музыкальных композиций (кодирования в цифровой форме нажатия клавиш, громкости, тембра, темпа, тональности и т.д.).

На данный момент аналогии такой задачи, как правило, в основном решаются нейросетевыми методами, позволяющими строить предсказание последовательности нот на основе обучающей выборки (как уже известного результата творческой деятельности).

Если представить музыкальную композицию как временной ряд [1-6] $Y(t) = \{y_t\}_{t=1}^T$ (поступательного изменения амплитуды сигнала, являющегося суммой амплитуд звуковых волн (рис. 1)), то возможна постановка другой задачи – о генерации «продолжения» исходного музыкального фрагмента методами прогнозирования нестационарных временных рядов с оценкой качества прогноза на основе как объективных, так и субъективных показателей.

Цель настоящего исследования: во-первых, представить некоторый обзор достижений в области применения технических методов к прогнозированию музыкального ряда, описание которого включает взаимовлияющие процессы; во-вторых, сформулировать основные положения алгоритма обработки фрагмента музыкального временного ряда как основу реализации подхода к решению задачи «продления» фрагмента музыкальной композиции (рис.1).

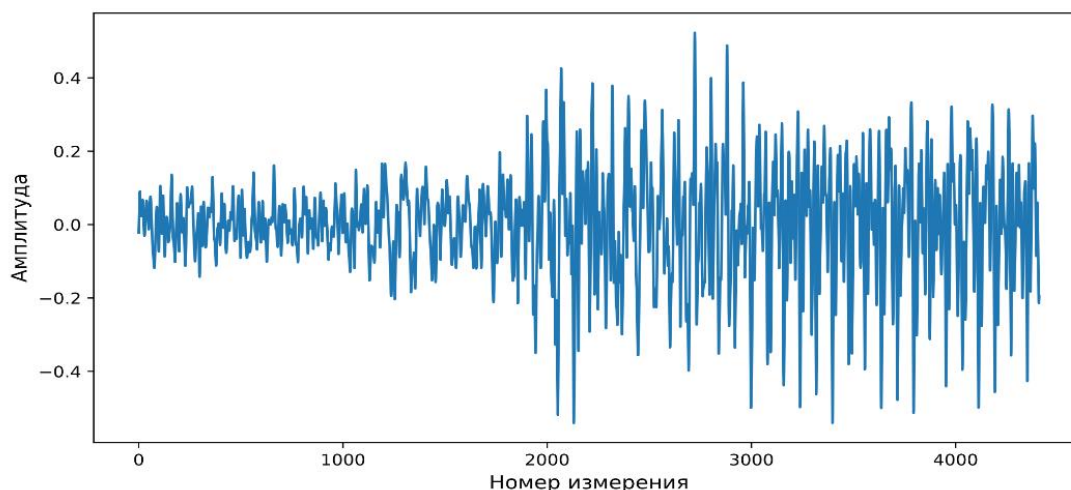


Рис. 1. Нестационарный временной ряд из амплитуд сигнала (6,9 – 7,0 с)

1. Постановка задачи.

1.1. Некоторые понятия. Нестационарный временной ряд обладает изменяющейся со временем функцией распределения (как следствие, изменяющимися во времени математическим ожиданием и/или дисперсией, и/или ковариацией), и может быть представлен в простейшем случае в виде аддитивной свертки детерминированной и случайной компонент:

$$Y(t) = f(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $f(t)$ – детерминированная составляющая (например, тренд), $\varepsilon(t)$ – шумовая составляющая как функция времени.

Задача прогнозирования временного ряда заключается в определении будущих значений на заданном интервале, называемом горизонтом прогноза на основе окна актуальной предыстории, ширина (глубина исторических данных) которого есть параметр оптимизации конструируемого правила прогнозирования [2-5].

Музыкальная композиция представляет собой сумму гармонических колебаний звуковых волн с разными параметрами (частота, амплитуда) и некоторой шумовой составляющей, воспроизводимых как одновременно, так и в разные промежутки времени. Рассмотрение звуковых временных рядов как совокупности отдельных компонент может привести к увеличению точности прогнозирования (на обучении), что, в свою очередь, позволит достичь лучшего результата звучания и общей целостности полученной композиции.

Под «продлением» понимается генерация продолжения композиции на основе заданного шаблона (фрагмента), части которого выступают в качестве «музыкальных паттернов», под которыми понимаются непривязанные к конкретным параметрам звучания (частота, амплитуда) последовательности нот, повторяющиеся в композиции, и которые в терминах временных рядов могут быть интерпретированы как сезонные составляющие.

1.2. Обзор существующих методов генерации музыкальных композиций и новизна предлагаемого подхода. Тот факт, что музыкальная композиция имеет удобное машинное представление в виде бинарных векторов для каждого нотоносца, делает этот объект удобным для алгоритмической обработки. Кратко охарактеризуем некоторые из подходов, наиболее часто упоминаемые в публикациях [7-11], затем укажем отличительные черты подхода, представленного в данной работе.

1. Композиция как последовательность нот, образующая цепь Маркова [7, 8]. К положительным характеристикам отнесем возможность генерации учебных (академических с хорошо структурированной системой правил) композиций, и, как следствие, формализованного критерия оценки результата. Однако, в популярных жанрах отступление от правил – далеко

не редкость, поэтому в результатах генерации может присутствовать нарушение целостности структуры композиции.

2. Генетический алгоритм [8]. Положительные характеристики генетического алгоритма совпадают с таковыми для цепи Маркова. При их применении для задач генерации композиций популярных жанров рассматриваются различные подходы к построению функции приспособленности особей популяции: применение критериев оценки на основе структурированной системы правил (что далеко не всегда является возможным); привлечение экспертов, которым требуется оценить результаты многих поколений популяций множества особей, что также представляет отдельную проблему.

3. Алгоритм на основе гармонического поиска [9-11]. Основная сложность применения данного алгоритма заключается в постановке задачи генерации композиции как задачи многокритериальной оптимизации и построении функции оценки результатов генерации. Проблема равносильна формированию функции приспособленности при применении генетических алгоритмов.

4. Методы на основе машинного обучения (например, [8, 10]), основным из которых является нейросетевой подход и подходы, использующие его совместно с другими алгоритмами. Алгоритмы на их основе дают возможность генерации разножанровых музыкальных композиций на базе множества соответствующих обучающих выборок. К отрицательным чертам можно отнести: а) отсутствие формализованного критерия оценки результата; б) ограничение возможных вариантов генерации объемом обучающей выборки.

Следует отметить, что генерация композиций с четкой структурой правил (учебные композиции, простейшие полифонические мелодии) наиболее поддается формализации. В любом случае имеется необходимость составления функции оценки пригодности композиций:

- на основе экспертного оценивания результатов нескольких прецедентов генерации;
- в форме математической формулировки показателя «приемлемости» продолжения (для учебных мелодий);
- как степень близости с исходной мелодией или ее составляющей (для полифонических мелодий).

В отличие от рассмотренных выше подходов в предлагаемом алгоритме продолжения музыкальной композиции:

- 1) не используется традиционное правило построения композиции, основанное на представлении ряда как последовательности нот (традиционно в алгоритмах обработки «музыкальных» данных, например, нотных партитур, используется формат – двоичные векторы);
- 2) сохраняется уникальный (авторский) стиль, определяемый в рамках заданного фрагмента композиции и основанный на музыкальных «паттернах» и последовательностей из них;
- 3) строится продолжение музыкальной композиции на основе прогноза только определенных составляющих сигнала.

1.3. Постановка задачи продолжения музыкального ряда. Рассмотрим композицию как нестационарный временной ряд поступательного изменения амплитуды сигнала, моделируемого в виде (1).

Задача прогнозирования временного ряда заключается в определении будущих значений $\hat{Y}(t)$ на заданном интервале, называемом горизонтом прогноза (h) с заданным уровнем погрешности (доверительной вероятности,...).

В качестве критерия качества прогноза выберем меру близости к исходной мелодии, заданной как train-выборка (дополнительно к субъективной оценке с позиции инициатора генерации фрагмента мелодии).

Решение задачи распадается на два этапа: подготовка данных на основе выявления закономерностей и собственно конструирование решающего прогностического правила.

2. Решение задачи. Сложность анализа временных рядов, порождаемых музыкальным инструментом, заключается не только в его многомерности (частота, качество звука, громкость, сопоставленные высоте звука, тембру и амплитуде, соответственно), но и в различии этих характеристик для разных инструментов.

Поскольку сущность метода эмпирической модовой декомпозиции сигнала (Empirical Mode Decomposition, EMD [12]) составляет принцип: каждый реальный процесс (линейный/нелинейный, стационарный/нестационарный) есть колебание, в определенной степени «симметричное» относительно локального среднего значения, то это обстоятельство удобно положить в основу решения поставленной задачи, поскольку исходные данные являются суперпозицией волновых процессов.

Замечание 1. Указанный принцип согласуется с утверждениями физиков (см., например, труды А. Эйнштейна), образующих логическую цепочку: все материальные объекты состоят из энергии $\Rightarrow$ колебания энергетического поля индуцируют звук-вибрацию $\Rightarrow$ вибрации сопоставлен сигнал (модель звука), математическая модель которого – временной ряд (функция времени, в частности), а сигнал есть носитель информации.

Суть метода EMD заключается в разложении произвольного временного ряда на семейство функций внутренних мод (intrinsic mode function, IMF), каждая из которых есть модель определенного колебательного режима реального процесса, а их сумма есть исходный анализируемый ряд.

Выполним алгоритм EMD для следующего фрагмента музыкальной композиции, длительностью 0.1 с, частота дискретизации 44,1 кГц, размер выборки составляет 4410 значений.

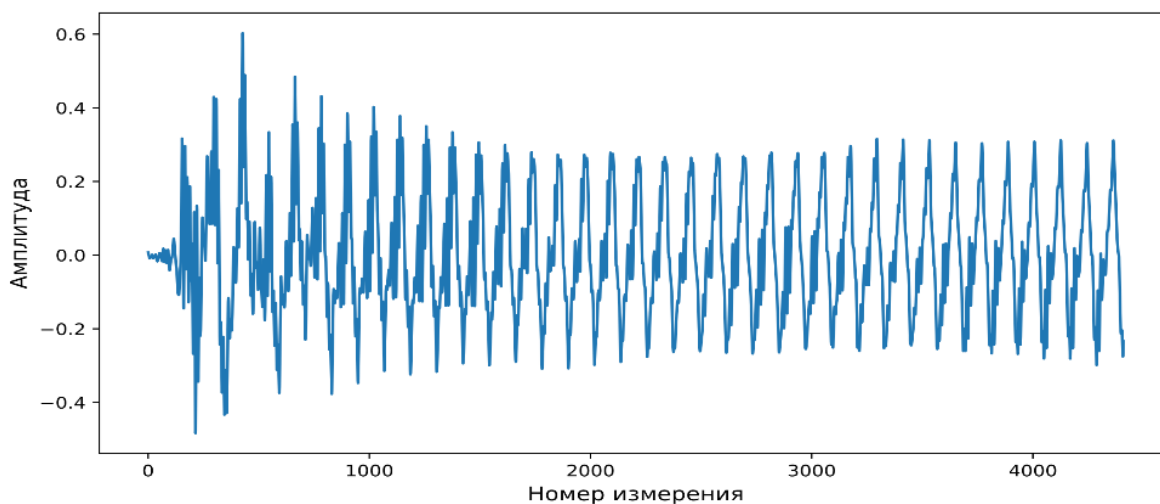


Рис. 2. Осциллограмма фрагмента аудиофайла как исходный временной ряд (0,5 – 0,6 с); на горизонтальной оси – номер измерения, на вертикальной оси – амплитуда звука

2.1. Алгоритм разложения сигнала на набор функций внутренних мод (IMF) реализуется следующими действиями [12].

Инициализация алгоритма: исходный временной ряд (дискретизованный сигнал $y(t)$); $t = 0, 1, \dots, N$; $k = 1$ (переменная внешних итераций); $r_k(t) := y(t)$.

Шаг 1. Для исходного сигнала $y(t)$ определяются все точки локальных экстремумов $t_{i.ext}$ и значения $y(t_{i.ext})$ в этих точках. Затем группируются массивы координат и соответствующих им значений отдельно для максимумов $(t_{i.max}, y(t_{i.max}))$ и для минимумов $(t_{i.min}, y(t_{i.min}))$. Полагаем $j := 1$, $h_{k,j-1}(t) := r_k(t)$ (k – «счетчик» мод (IMF), j – переменная внутренних итераций – «счетчик» приближений к k -й IMF).

Шаг 2. Производится вычисление верхней и нижней огибающих процесса по максимумам и минимумам соответственно на основе кубических сплайнов. Находится функция средних значений между огибающими локальных экстремумов сигнала $h_{k,j-1}(t)$:

$$m_{kj}(t) = (u_{\max,kj}(t) + u_{\min,kj}(t)) / 2,$$

где $u_{\max,kj}, u_{\min,kj}$ – значения верхней и нижней огибающих, соответственно.

Шаг 3. Находится j -е приближение к IMF $h_{kj}(t) = h_{k,j-1}(t) - m_{kj}(t)$ и осуществляется проверка критерия останова. В качестве критерия останова внутреннего цикла может быть использован показатель: предел нормализованной квадратичной разности между двумя последовательными операциями приближения

$$\delta_{kj} = \frac{\sum_t |h_{kj}(t) - h_{k,j-1}(t)|^2}{\sum_t h_{k,j-1}^2(t)},$$

поскольку по построению с увеличением числа итераций функция $m_{kj}(t)$ стремится к нулевому значению, а функция $h_{kj}(t)$ к неизменяемой форме.

Если при заданном предельном значении ε имеет место $\delta_{kj} < \varepsilon$, то k -я функция IMF определяется как $c_k(t) = h_{kj}(t)$ с остатком от ее выделения $r_k(t) := h_{kj}(t) - c_k(t)$.

В противном случае в качестве текущего рабочего временного ряда $r_k(t)$ принимается $h_{kj}(t)$ и выполняется переход к шагу 1, $j := j + 1$.

Шаг 4. Проверка одного из критериев останова декомпозиции сигнала (внешних итераций), при невыполнении которого осуществляется переход на шаг 1 и полагается $k := k + 1$:

- 1) остаток $r_k(t)$ не содержит экстремумов;
- 2) достигнуто пороговое значение числа функций внутренних мод;
- 3) достигается требуемая точность декомпозиции по показателю относительной погрешности среднеквадратической реконструкции (без учёта остатка $r_k(t)$).

Выход алгоритма: совокупность эмпирических модовых функций, локально симметричных относительно нулевого среднего уровня, имеющих мгновенные физически значимые частоты, более низкие по сравнению с предыдущими IMF.

2.2. Основные положения алгоритма обработки фрагмента временного ряда для формирования прогноза. Этапы анализа исходного фрагмента сигнала на основе разложения на сумму составляющих функций внутренних мод имеют следующее содержание.

2.2.1. Декомпозиция временного ряда на основе метода EMD [12] согласно одноименному алгоритму (раздел 2.1).

2.2.2. Вычисление степени вклада внутренних мод IMF в исходный сигнал (рис. 3). С этой целью приведем далее используемые показатели качества операций, применяемых к временному ряду (табл. 1) [13-18].

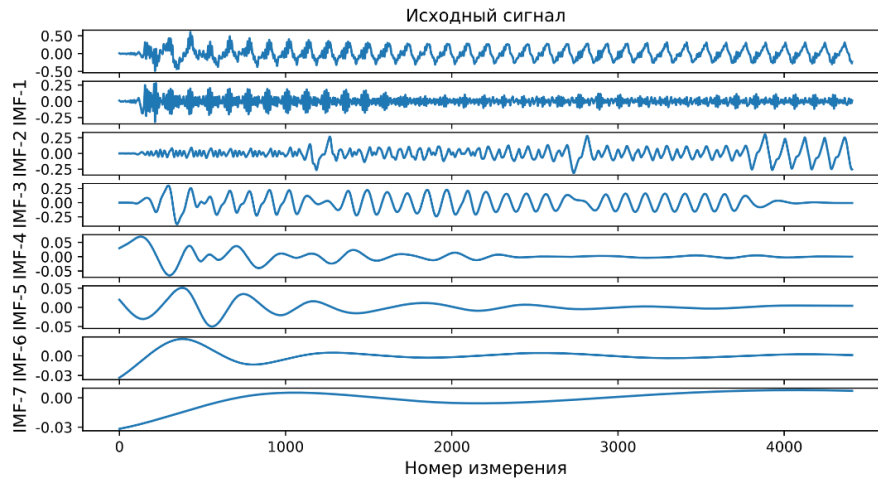


Рис. 3. Результат применения алгоритма EMD для фрагмента сигнала из рис. 2

Таблица 1. Некоторые показатели качества результатов декомпозиции, анализа и прогнозирования временного ряда

Номер строки	Показатель качества (отбора IMF, прогноза)	Комментарий к показателю
1	$SNR = \frac{P_{\text{сигнала}}}{P_{\text{шума}}} = \left(\frac{A_{\text{сигнала}}}{A_{\text{шума}}} \right)^2,$ $SNR' = 10 \log_{10}(SNR),$ $A = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T a_i^2}.$	Отношение мощности полезного сигнала к мощности шума (ОСШ) или Signal-to-Noise Ratio (SNR); SNR' – альтернативная форма показателя; P – средняя оценка мощности сигнала и шума; A – среднеквадратическая оценка амплитуды.
2	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (\hat{y}_i - y_i)^2}.$	$y_i, \hat{y}_i$ – исходное и восстановленные значения сигнала в i -й промежуток времени, соответственно.
3	$K = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{T-1} (K_{n+1} - K_n) =$ $= -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i_0 \dots i_T} P_{i_0 \dots i_T} \ln P_{i_0 \dots i_T}.$	Энтропия Колмогорова-Синяя (КС-энтропия) характеризует среднюю скорость потери информации по времени; $K_{n+1} - K_n$ – потери информации о системе на промежутке $\{n, n+1\}$, $\{P_{i_0 \dots i_T}\}$ – конечномерное распределение вероятности состояния системы [14, 15].
4	$\hat{K} = \frac{1}{t} \ln \frac{C_m(\varepsilon)}{C_{m+1}(\varepsilon)}.$	$\hat{K}$ – оценка K , применяемая на практике, C_m – корреляционный интеграл, t – шаг (временная задержка), m – размерность вложения (минимальное число динамических переменных, однозначно описываемых наблюдаемый процесс); ε – относительная погрешность данных о состоянии системы, породившей временной ряд.
5	$T_m \sim \frac{1}{K} \ln \frac{1}{\varepsilon}, \quad T'_m \sim K^{-1}$	Оценка горизонта прогноза на основе энтропии; K – энтропия, показывающая насколько система хаотична, которую можно определить как информационную энтропию или КС-энтропию; T'_m – упрощенный вид в силу малости влияния ε .

Замечание 2. Прозрачная интерпретация значения SNR (чем больше значение показателя, тем меньше шум влияет на характеристики системы) позволяет применить данный показатель для решения вопроса о номере и числе внутренних мод, составляющих сигнал, линейная комбинация которых будет основой построения требуемого прогноза.

Введем два правила, на основе которых будет формироваться состав временного ряда для построения прогноза.

Правило 1. Степень вклада внутренней моды IMF в исходный сигнал обратно пропорционально отношению SNR.

Из рис. 3 следует, что IMF 7 является линией тренда («роста») амплитуды сигнала; функции IMF 1÷3 – высокочастотные составляющие; внутренние моды IMF 4÷6 – низкочастотные составляющие; IMF 2 отражает цикличность ряда.

Полученные для IMF 1÷7 оценки SNR представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценки показателя SNR для функций внутренних мод

Номер IMF	Значение SNR	Номер IMF	Значение SNR
1	9,1384	5	21,0243
2	5,3178	6	27,8234
3	2,8825	7	26,9553
4	19,2458		

Правило 2. В качестве наиболее информативной составляющей полагается комбинация внутренних мод с минимальным отклонением среднеквадратической ошибки RMSE (Root Mean Squared Error), или $\arg \min_k \text{RMSE}(k)$.

Отметим, что в рассматриваемом фрагменте сигнала (рис. 2, 3) минимальное значение $\text{RMSE}=0,0066$ достигается (за исключением полной суммы всех составляющих) при суммировании комбинации IMF 1÷5, 7.

2.2.3. Отбор мод из полученного множества как основу построения прогноза согласно показателю SNR (табл. 1) на основе алгоритма кластеризации (здесь использовано расстояние Евклида). Согласно показателю SNR рассмотрены 2 группы: IMF 1÷3 (максимальный вклад в сигнал) и IMF 4÷7 (минимальный вклад в сигнал).

Наиболее предпочтительной согласно $\text{RMSE}=0,0192$ оказалась группа IMF 1÷3 (рис. 4).

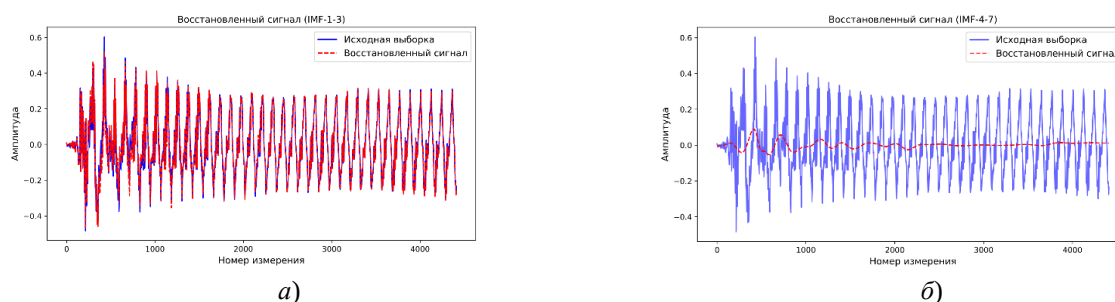


Рис. 4. Результат суммирования мод а) – IMF 1÷3 (красное начертание) и б) – IMF 4÷7, соответственно, в сравнении с исходным (синее начертание)

2.2.4. Выделение «музыкальных паттернов» может быть выполнено на основе:

1) получения сезонной составляющей временного ряда (SARIMA [1, 17, 18]): так, сезонность присутствует в комбинации IMF 1÷3 (рис. 4);

2) разделения на фрагменты-паттерны исходя из соотношения «золотого сечения» как показателя «гармоничности» композиции: исходный ряд принимается за 1, последующие части разделяются в соответствии с соотношением $\varphi = (\sqrt{5}-1)/2$ [16] (рис. 5);

3) фрагментации временного ряда на основе значения показателя «ритмичности» композиции - BPM (Beats Per Minute – число тактовых долей (четвертных нот) в минуту)): так BPM=120 соответствует 2-м четвертям в секунду исполнения (рис. 6).

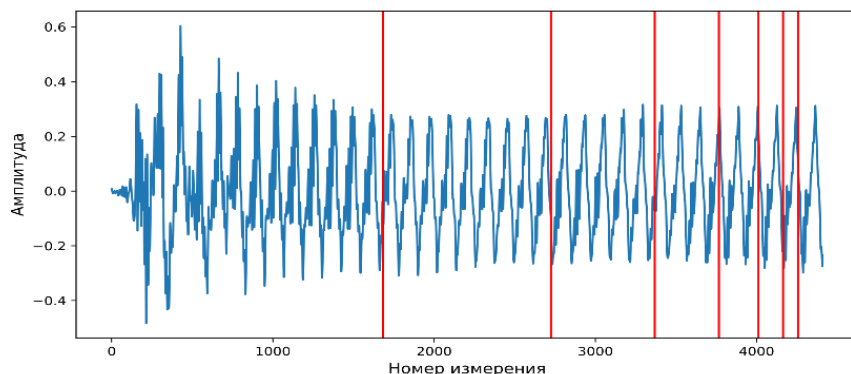


Рис. 5. Иллюстрация получения паттернов на основе «золотого сечения»

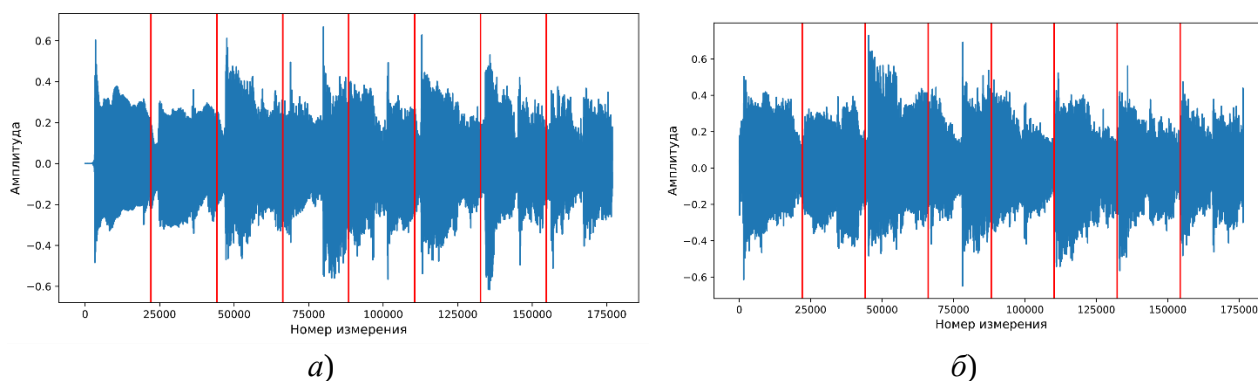


Рис. 6. Иллюстрация «ритмичности» композиции: а) - 4 с, фрагмент начала композиции (0,43 – 4,43 с); б) – 4 с, фрагмент середины композиции (4,43 – 8,43 с)

Замечание 3. Известно, что задача выбора оптимальных размеров «окна» предыстории и горизонта прогноза, в общем виде является открытой в силу нестационарности и нелинейности моделируемого процесса и решается в каждом отдельном случае индивидуально с использованием подходов машинного обучения. Так, в работе [19] приведен алгоритм на основе метода максимального правдоподобия подбора двух этих требуемых показателей в рамках имеющейся выборки. Однако решение данного вопроса – это отдельная тема для исследования.

В выше приведенных случаях 1) и 2) длительность фрагмента может быть подобрана с использованием кросс-валидации имеющейся выборки относительно алгоритма прогноза. При использовании подхода 3) длительность композиции должна быть кратна целому числу тактовых долей.

2.2.5. Оценивание горизонта прогноза (см., например, [14-19]) (табл. 1, строки 4-5).

На практике для оценки энтропии рассчитывается аппроксимирующая ее величина $\hat{K}$ (табл. 1, строка 4). В нашем демонстрационном примере декомпозиция исходного фрагмента была выполнена на 7 внутренних мод, соответствующее число динамических переменных m полагаем равным 7.

Получаем, что оценка $\hat{K}(7) \approx 0,4512$ и $\hat{K}^{-1}(7) \approx 2,2161$, откуда следует, что при построении прогноза всех 7 составляющих исходного фрагмента, итоговый прогноз может быть получен на 2 шага вперед (горизонт прогноза $h=2$).

Рассмотрим теперь оценки энтропии $\hat{K}$ для двух групп сумм отобранных IMF (рис. 7):

а) IMF 1÷3: $\hat{K}(3) \approx 0,3183$, $\hat{K}^{-1}(3) \approx 3,1412$;

б) IMF 4÷7: $\hat{K}(4) \approx 0,1275$, $\hat{K}^{-1}(4) \approx 7,8404$.

Тогда горизонт прогноза $h=3$ для IMF 1÷3, а горизонт прогноза низкочастотных колебаний $h=7$.

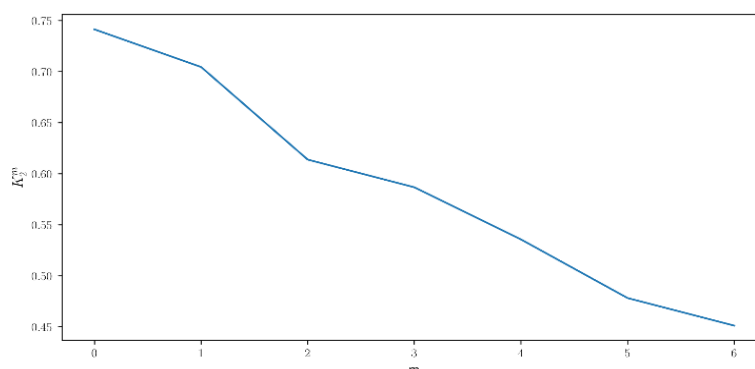


Рис. 7. График зависимости $\hat{K} = \hat{K}(m)$ для рассматриваемого фрагмента

Заключение. Рассмотрена задача подготовки данных к решению задачи продолжения музыкальной композиции как задачи прогнозирования числового временного ряда, полученного из амплитуд музыкального сигнала. Сформулированы основные положения алгоритма предобработки фрагмента музыкального временного ряда для дальнейшего формирования прогноза.

Использован популярный метод декомпозиции временного ряда для его «очистки» от составляющих, препятствующих выявлению зависимостей и закономерностей. На его основе сформулированы два оригинальных для данной предметной области правила, на базе которых выделено множество составляющих временного ряда, по которым рекомендовано строить прогноз.

Работа вносит вклад в копилку алгоритмов и технологий автоматизации творческих процессов и может быть полезна в системах творческой автоматизации для целевой аудитории определенной направленности (композиторы, стилисты, занимающиеся обработкой первоначальной музыкальной идеи, создатели игр и реклам и т.д.). Основным результатом данного исследования представляет собой инструмент для создания определенного шаблона-заготовки для дальнейшей работы при создании музыкальной композиции.

Список источников

1. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. 5th Edition, Published by John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2015, 712 p.
2. Hyndman R.J. Forecasting: principles and practice. Athanasopoulos, Australia. Monash University, 2018, 504 p.
3. Андерсон Т.У. Статистический анализ временных рядов / Т.У. Андерсон. – М.: Мир, 1976. – 605 с.
4. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю.П. Лукашин – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
5. Лоскутов А.Ю. Анализ временных рядов. Курс лекций. Физический факультет МГУ. - URL: https://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (дата обращения: 23.05.2023).
6. Колесникова С.И. Математические модели в исследовании систем / С.И. Колесникова. – СПб.: ГУАП, 2020. – 150 с.
7. Sharpio I., Huber M. Markov chains for computer music generation. Journal of humanistic mathematics, 2021, vol. 11(2), pp. 167-195, DOI:10.5642/jhummath.202102.08.
8. Towsey M., Brown A., Wright S., Diederich J. Towards melodic extension using genetic algorithms, 2001, vol. 4(2), available at: <https://www.researchgate.net/publication/27462953> (accessed: 05/23/2023).
9. Music-inspired harmony search algorithm. Theory and applications. Studies in computational intelligence. Available at: <https://doc.lagout.org/5D.pdf> (accessed: 05/23/2023).

10. Geem Z.W., Choi J.Y. Music composition using harmony search algorithm. In: Giaco-bini, M. (eds) Applications of evolutionary computing. Lecture notes in computer science. Springer, Berlin, 2007, DOI: 10.1007/978-3-540-71805-5_65.
11. Xing B. Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms, Switzerland, Springer International Publishing, 2014, 469 p.
12. Huang N.E. An adaptive data analysis method for nonlinear and nonstationary time series: the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis. In: Qian, T., Vai, M.I., Xu, Y. (eds) Wavelet analysis and applications, applied and numerical harmonic analysis, publisher Springer, 2007. Birkhäuser Base, 2006, DOI:10.1007/978-3-7643-7778-6_25.
13. Welvaert M., Yves R. On the definition of signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio for fMRI data. 2013, available at: <https://journals.plos.org/10.1371> (accessed: 05/23/2023).
14. Лоскутов А.Ю. Энтропия и прогноз временных рядов в теории динамических систем / А.Ю. Лоскутов, А.А. Козлов, Ю.М. Хаханов // Изв. вузов «Прикладная нелинейная динамика», 2009. – Т. 17. – № 4. – С. 98-113.
15. Grassberger P., Procaccia I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. The American Physical Society, 1983, v. 28(4), pp. 28-30, available at: <https://courses.physics.ucsd.edu/Procaccia-Signal.pdf> (accessed: 05/23/2023).
16. Mongoven C. A style of music characterized by Fibonacci and the golden ratio. 2010, available at: <https://www.researchgate.net/publication/265261482> (accessed: 05/23/2023).
17. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М.: Бином, 2006. – 656 с.
18. Нильсон Э. Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение / Э. Нильсон. – СПб.: ООО «Диалектика», 2021. – 544 с.
19. Колесникова С.И. Метод распознавания и оценивания состояний слабоформализованного динамического объекта на основе разметки временного ряда / С.И. Колесникова // Известия РАН. Теория и системы управления, 2011. – № 3. – С. 3-14.

Фомин Дмитрий Андреевич. Магистрант кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Института вычислительных систем и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. demetrey@ro.ru, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Колесникова Светлана Ивановна. Д.т.н., профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Института вычислительных систем и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Научные интересы включают нелинейное управление с неопределенностью в описании, интеллектуальный анализ данных. AuthorID: 150312, SPIN: 1928-8626, ORCID: 0000-0001-7158-2747, skolesnikova@yandex.ru, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

UDC 519.248; 519.254

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.015

Algorithm for pre-processing a music series for its subsequent generation on the basis of the apparatus for analysis of non-stationary time series

Dmitry A. Fomin, Svetlana I. Kolesnikova

St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Russia, St.Petersburg, demetrey@ro.ru

Abstract. The approach and an algorithm that implements it are presented for application to the problem of generating a musical composition. The initial data are interpreted as a non-stationary time series, to which the mode decomposition method is applied, followed by the original processing of the internal mode functions to construct the prediction rule.

Keywords: time series, musical composition, composition continuation generation, mode de-composition algorithm, forecast horizon

References

1. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th Edition, Published by John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2015, 712 p.
2. Hyndman R.J. Forecasting: principles and practice. Athanasopoulos, Australia, Monash University, 2018, pp. 504.
3. Anderson T. Statistical analysis of time series [Statistical analysis of time series]. M., Mir, 1976, 605 p.
4. Lukashin Yu.P. Adaptivnyye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov [Adaptive methods of short-term forecasting of time series]. M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 2003, 416 p.
5. Loskutov A.Yu. Analiz vremennykh ryadov. Kurs lektsiy. Fizicheskiy fakul'tet MGU [Time series analysis. Lecture course. Faculty of Physics. MSU]. Available at: https://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (accessed: 05/23/2023).
6. Kolesnikova S.I. Matematicheskiye modeli v issledovanii system [Mathematical models in the study of systems]. St. Petersburg, GUAP, 2020, 150 p.
7. Sharpio I., Huber M. Markov chains for computer music generation. Journal of humanistic mathematics, 2021, vol. 11(2), pp. 167-195, DOI:10.5642/jhummath.202102.08.
8. Towsey M., Brown A., Wright S., Diederich J. Towards melodic extension using genetic algorithms, 2001, vol. 4(2), available at: <https://www.researchgate.net/publication/27462953> (accessed: 05/23/2023).
9. Music-Inspired harmony search algorithm. Theory and applications. studies in computational intelligence. Available at: <https://doc.lagout.org/5D.pdf>.
10. Geem Z.W., Choi J.Y. Music composition using harmony search algorithm. In: Giaco-bini, M. (eds) Applications of evolutionary computing. Lecture notes in computer science. Springer, Berlin, 2007, DOI: 10.1007/978-3-540-71805-5_65.
11. Xing B. Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms. Switzerlan, Springer International Publishing, 2014, 469 p.
12. Huang N.E. An adaptive data analysis method for nonlinear and nonstationary time series: the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis. In: Qian, T., Vai, M.I., Xu, Y. (eds) Wavelet analysis and applications, applied and numerical harmonic analysis, Birkhäuser Base, 2006, DOI: 10.1007/978-3-7643-7778-6_25 (accessed: 05/23/2023).
13. Welvaert M., Yves R. On the definition of signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio for fMRI data, 2013, available at: <https://journals.plos.org/10.1371> (accessed: 05/23/2023).
14. Loskutov A.Yu., Kozlov A.A., Khakhanov Yu.M. Entropiya i prognoz vremennykh ryadov v teorii dinamicheskikh sistem [Entropy and forecast of time series in the theory of dynamical systems]. Izvestiya VUZ. Prikladnaya nelineynaya dinamika [Izv. universities "Applied Nonlinear Dynamics"], 2009, vol. 17, no. 4, pp. 98-113.
15. Grassberger P., Procaccia I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. The American Physical Society, 1983, vol. 28(4), pp. 28 30, available at: <https://courses.physics.ucsd.edu/Procaccia-Signal.pdf> (accessed: 05/23/2023).
16. Mongoven C.A style of music characterized by Fibonacci and the golden ratio. 2010, available at: <https://www.researchgate.net/publication/265261482> (accessed: 05/23/2023).
17. Lyons R. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. M., Binom, 2006, 656 p.
18. Nilson E. Prakticheskiy analiz vremennykh ryadov: prognozirovaniye so statistikoy i mashinnoye obucheniye [Practical time series analysis: forecasting with statistics and machine learning]. St. Petersburg: OOO Dialektika [Dialectics], 2021, 544 p.
19. Kolesnikova S.I. Metod raspoznavaniya i otsenivaniya sostoyaniy slaboformalizovannogo dinamicheskogo ob"yekt na os-nove razmetki vremennogo ryada [A method for recognizing and estimating the states of a weakly formalized dynamic object based on the marking of a time series]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 722-733.

Fomin Dmitry Andreevich. Master student of the Department of Computer Technologies and Software Engineering, Institute of Computing Systems and Programming, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. demetrey@ro.ru, 190000, St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya, 67, lit. A.

Kolesnikova Svetlana Ivanovna. Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Technologies and Software Engineering, Institute of Computing Systems and Programming, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Scientific interests include non-linear control with uncertainty in the description, data mining. AuthorID: 150312, SPIN: 1928-8626, ORCID: 0000-0001-7158-2747, skolesnikova@yandex.ru, 190000, St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya, 67, lit. A.

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 17.06.2023; принята к публикации 16.08.2023.

The article was submitted 05/23/2023; approved after reviewing 06/17/2023; accepted for publication 08/16/2023.