

ISSN 2413 - 0133

Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(21)/ 2021

6+

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 1 (21)



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.
 Voropai N.I.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Eliseev S.V.
 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.
 Mokhor V.V.
 Ovcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.
 Yusupova N.I.

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
 Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумπος Π., Греция, University of Patras
 Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., 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, СКТБ «Наука» СО РАН
 Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС 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.т.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
 Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
 Executive Editor
 Bakhvalova Z.A.
 Editor Kopaigorodsky A.N.
 Editor Massel A.G.
 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	Копайгородский А.Н.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Адрес учредителя, издателя и редакции

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

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

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

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Бахвалова З.А. e-mail: zinand@isem.irk.ru

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016. Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

СС ВУ

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.

Дата выхода 27.04.2021 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная. (6+)

Математическое моделирование

- Елисеев С.В., Каргапольцев С.К., Елисеев А. В.** Рычажные связи: особенности структурных интерпретаций. 5
- Черкашин А. К., Лесных С.И., Красноштанова Н.Е.** Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19. 17
- Куликов В. В., Куцый Н.Н.** Применение метода расширенных частотных характеристик для параметрического синтеза пропорционально-интегрального разностного регулятора. 36
- Жарков М. Л., Супруновский А.В.** Моделирование работы вокзального комплекса Иркутск-пассажирский на основе сетей массового обслуживания. 43

Математические технологии в энергетике

- Донской И. Г.** Численная оценка критических условий в задаче о тепловом взрыве в среде с флуктуациями реакционной способности. 54
- Зорина Т. Г.** Интеграция возобновляемых источников энергии в структуру энергопроизводства республики Беларусь: сценарное моделирование. 66
- Берберова М. А., Балута В.И.** Анализ неопределенности, значимости и чувствительности результатов вероятностного анализа безопасности АЭС. 80

Информационные системы и технологии

- Городняя Л. В.** От трудно решаемых проблем к парадигмам программирования. 94
- Ерженин Р. В.** Разработка экспертно-ориентированной системы поддержки проектирования крупномасштабной информационной системы. 110
- Дородных Н.О., Юрин А. Ю., Коршунов С.А., Сопп Д.Ю., Шпаченко Д.С.** Средства визуального моделирования и генерации кода нечетких продуктов. 121
- Костромин Р. О.** Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников. 132

Math modeling

Eliseev S. V., Kargapoltsev S. K., Eliseev A. V. Lever ties: features of structural interpretations.	5
Cherkashin A. K., Lesnykh S. I., Krasnoshtanova N. E. Geoinformation monitoring and mathematical modeling of the COVID-19 pandemic development.	17
Kulikov V. V., Kutsy N. N. Application of the extended frequency response method for parametric synthesis of a proportional-integral difference controller.	36
Zharkov M. L. , Suprunovsky A. V. Simulation of the operation of the Irkutsk-passenger railway station complex based on queuing networks.	43

Mathematical technologies in energy

Donskoy I. G. Numerical estimation of critical conditions in thermal explosion problem for a medium with fluctuations of reactivity.	54
Zoryna T. G. Integration of renewable energy sources into the energy production structure of the republic of Belarus: scenario simulation.	66
Berberova M. A., Baluta V. I. Analysis of uncertainty, significance and sensitivity of the results of probability analysis of NPP safety.	80

Information systems and technologies

Gorodnyaya L.V. From difficult problems to programming paradigms.	94
Erzhenin R. V. Development of an expert-oriented system of support for designing large-scale information system.	110
Dorodnykh N.O., Yurin A. Yu., Korshunov S. A., Sopp D. Yu., Shpachenko D. S. Means of visual modeling and code generation for fuzzy rules.	121
Kostromin R. Comparative analysis of the resource configuration management systems for the computing environment of digital twins functioning.	132

УДК 62-752, 621:534, 629.04.15, 519.71

РЫЧАЖНЫЕ СВЯЗИ: ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ

Елисеев Сергей Викторович

д.т.н., профессор, советник при ректорате по научной работе,

e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Каргапольцев Сергей Константинович

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»,

e-mail: kck@irgups.ru

Елисеев Андрей Владимирович

к.т.н., доцент кафедры «Математика», e-mail: eavsh@ya.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения,

664074, г.Иркутск, ул. Чернышевского 15

Аннотация. Рассматриваются вопросы формирования методологического базиса системного анализа механических колебательных структур, отображающих свойства транспортных и технологических объектов в условиях вибрационных динамических нагружений. Цель исследования заключается в разработке метода анализа и динамического синтеза в задачах динамики механических колебательных систем, ориентированных на детализацию представлений о формировании обобщенных связей между параметрами системы и оценки особенностей возникающих рычажных соотношений. Используются методы общей теории систем, в частности, аналитический аппарат теории автоматического управления. Показано, что введение передаточных функций межпарциальных связей позволяет построить новые подходы в оценке и использовании специфических свойств механических колебательных систем. Предлагается методика, в рамках которой механическая колебательная система с линейными свойствами и сосредоточенными параметрами может интерпретироваться как эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления. Передаточная функция системы строится на основе дифференциальных уравнений движения, получаемых в рамках формализма Лагранжа с последующим преобразованием Лапласа, что создает удобную платформу для оценки динамических свойств системы. Показано, что передаточная функция без специальных связей при обнулении частоты внешнего возмущения отображает свойства виртуального рычага в условиях статического нагружения. Введен и рассмотрен ряд новых понятий о проявлениях рычажных свойств механических колебательных систем при фиксированных частотах внешних гармонических синфазных возмущений. Предлагаемый метод иллюстрируется на ряде примеров.

Ключевые слова: механическая колебательная система, структурная схема, передаточная функция, рычажные связи, передаточные отношения, виртуальные рычаги.

Цитирование: Елисеев С.В., Каргапольцев С.К., Елисеев А. В. Рычажные связи: особенности структурных интерпретаций. //Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 05-16. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.001

Введение. Вопросы динамики технических объектов относятся к числу актуальных в решении задач, связанных с обеспечением надежности и безопасности эксплуатации технических средств, повышения динамического качества и конкурентоспособности технологических и транспортных машин [1].

Многие технические объекты транспортного и технологического назначения работают в условиях интенсивного вибрационного динамического нагружения, что инициирует поиски и разработки способов и средств оценки, контроля, коррекции, формирования и управления динамическими состояниями рабочих органов [2, 3].

Развитие научно-методологического базиса в решении задач динамики машин тесно связано с теорией колебаний механических систем, теорией управления и аналитическим аппаратом общей теории систем [4, 5], что инициирует внимание к вопросам формирования в системах динамических связей и способам их реализации, специфическим особенностям

динамических режимов различной природы. К числу таких режимов могут быть отнесены проявления особенностей реализации обратных связей в колебательных структурах, режимы динамического гашения, эффекты совместного одновременного действия нескольких воздействий, формы совместного движения элементов систем по нескольким координатам и др. [6].

Специфика решения задач динамики технических объектов во многом предопределяется особенностями механических колебательных систем, используемых в качестве расчетных схем, учетом многообразия составляющих элементов и их конструктивно-техническими формами реализаций.

В структурах механических колебательных систем широко применяются различного рода механизмы и устройства для преобразования движения и различные структурные образования элементов, обладающие приведенными массами, упругими свойствами и возможностями диссипации энергии [7, 8].

Введение в структуру механических колебательных систем различного рода механизмов, устройств для преобразования движения и структурных образований приводит к формированию в механических системах дополнительных динамических связей, которые оказывают, во многих случаях, существенное влияние на спектр динамических свойств рассматриваемых технических объектов.

Учёт динамических особенностей исходных объектов, обладающих определенным набором динамических связей, требует разработки специфических методов и средств построения математических моделей, детализации представлений о влиянии дополнительных связей и проявлениях их специфических динамических режимов.

В этом плане интерес для развития представлений об обобщенных связях, учете их особенностей имеют часто встречающиеся в конструктивно-технических решениях рычажные связи, проявление которых в различных формах характерно для транспортных и технологических машин.

В предлагаемой статье развиваются методологические позиции в оценке возможностей рычажных связей, проявления которых характерны для механических колебательных систем различной структуры.

I. Некоторые общие положения. 1. Рычаги, рычажные связи, рычажные механизмы известны с давних времен, что нашло соответствующее отражение в многочисленных научных работах по физике, механике, теории механизмов и машин и др. Простейший рычаг или рычажный механизм представляет собой твердое тело (часто в виде жёсткого стержня), имеющего неподвижную точку опоры. В рычаге первого рода точка опоры расположена между конечными точками рычага (рис. 1а); в рычагах второго рода опорная точка совпадает с одной из конечных точек (рис. 1б).

Для рычажного механизма, приведённого на рис. 1а, б характерны соотношения между усилиями и длинами плеч l_1, l_2 : $Q_1 l_1 = Q_2 l_2$, $Q_1 / Q_2 = l_2 / l_1$.

В рычажных механизмах существуют также соотношения между перемещением по вертикали тт. (А),(В) относительно центра вращения (или неподвижной опоры т.(О)):

$$\frac{y_B}{y_A} = -\frac{l_2}{l_1} = i_1, \quad (1)$$

что следует из рис. 1а. В свою очередь,

$$\frac{y_B}{y_A} = \frac{l_1 + l_2}{l_1} = i_2. \quad (2)$$

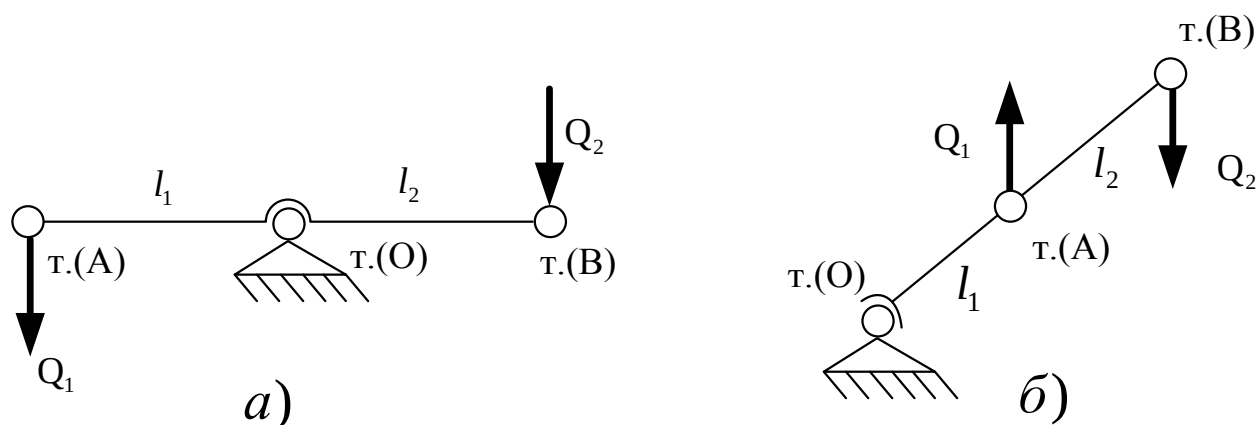


Рис. 1. Принципиальные схемы простейшего рычажного механизма: а) первого рода б) рычаг второго рода; l_1, l_2 - длины плеч рычажного механизма.

Параметры рычажных механизмов i_1 и i_2 называются передаточными отношениями; эти понятия дают представления об опорных точках. Отметим, что такие опорные точки находятся на стержне (твердом теле) самого рычага; точка опоры может менять свое положение, что приводит к соответствующему изменению передаточных отношений i_1, i_2 .

2. Рычажные механизмы, как уже упоминалось, широко используются в конкретных инженерно-технических разработках и реализуются различными механизмами, например, зубчатыми, винтовыми, кривошипно-ползунными и др. [9].

3. Передаточные отношения, связывающие перемещения отдельных точек, усилия в выбранных точках, отношения реакций связей взаимодействующих элементов механических структур часто используются в оценке динамических свойств транспортных и технологических объектов, что нашло отражение в работах [10, 11] и может рассматриваться, как основа формирования и развития детализированных представлений о формировании динамических связей на основе методов структурного математического моделирования [5].

II. Математические модели динамических взаимодействий элементов в механических колебательных системах. 1. Принципиальная схема механической системы, имеющей цепную структуру и состоящую из двух массо-инерционных звеньев с массами m_1 и m_2 , соединенных между собой упругими элементами с коэффициентами жесткости k_1, k_2, k_3 , приводится на рис.2. Предполагается, что система обладает линейными свойствами и может совершать малые колебания относительно положения статического равновесия под действием моногармонической силы $Q(t)$, приложенной в т.(A₂) (рис.2).

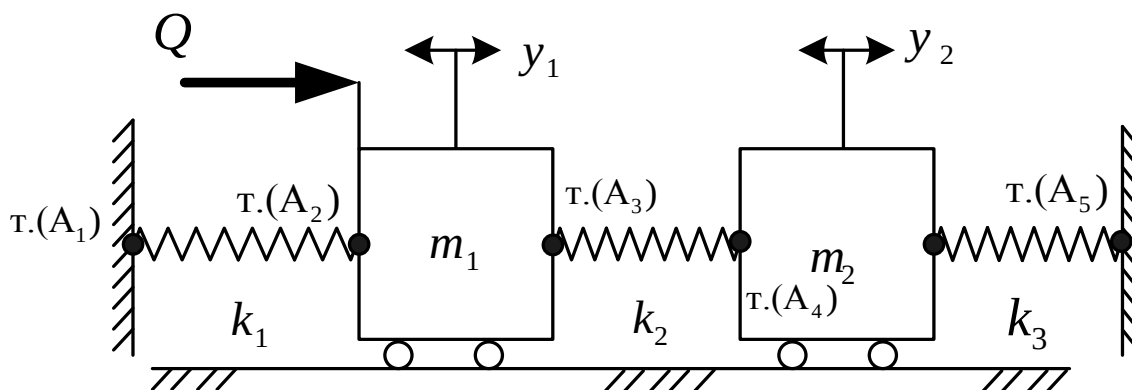


Рис. 2. Принципиальная схема механической колебательной системы цепного типа с двумя степенями свободы.

Движение системы описывается в системе координат y_1, y_2 , связанных с неподвижным базисом. Используя известные подходы [5, 12] и опуская промежуточные выкладки, запишем систему уравнений движения в операторной форме

$$\bar{y}_1 m_1 p^2 + (k_1 + k_2) \bar{y}_1 - \bar{y}_2 k_2 = \bar{Q} \quad (3)$$

$$\bar{y}_1 m_1 p^2 + (k_1 + k_2) \bar{y}_1 - \bar{y}_2 k_2 = \bar{Q}, \quad (4)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); значок $\bar{}$ над переменной означает её изображение по Лапласу; интегральное преобразование Лапласа проведено при нулевых начальных условиях [13].

Математическая модель системы (3), (4) может быть интерпретирована как структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Соответствующая структурная схема приведена на рис. 3.

Передаточные функции исходной системы (рис.3) могут быть представлены [5] в виде:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3}{A(p)} \quad (5)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{k_2}{A(p)}, \quad (6)$$

$$\text{где} \quad A(p) = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2 \quad (7)$$

является частотным характеристическим уравнением системы.

Из выражений (5)–(7) следует, в частности, что при действии гармонического возмущения Q система может находиться в двух резонансных режимах. Частоты собственных колебаний определяются из решения биквадратного уравнения (7).

В свою очередь, система обладает также режимом динамического гашения колебаний на частоте, определяемой выражением:

$$\omega_{dyn}^2 = \frac{k_2 + k_3}{m_2} \quad (8)$$

2. Связность движений по координатам y_1, y_2 может быть оценена на основе использования передаточной функции межпарциальных связей:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{k_2}{k_2 + k_3} \quad (9)$$

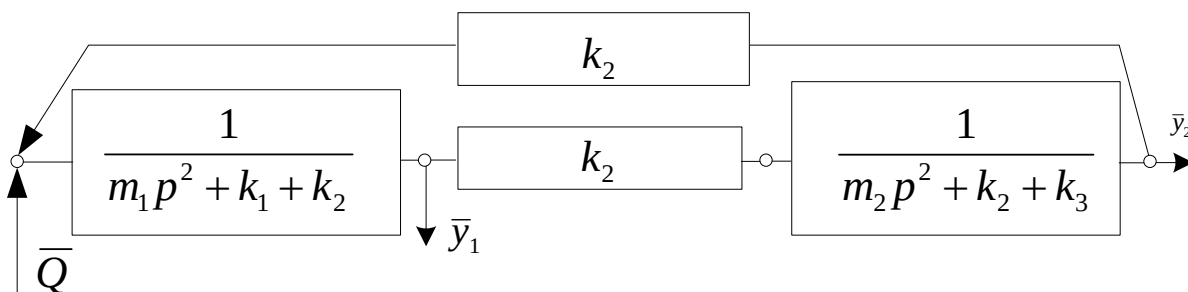


Рис. 3. Структурная схема (структурная математическая модель) системы на рис. 1.

Выражение (8) отображает особенности взаимных смещений точек по координатам y_1, y_2 при действии гармонической силы, что характеризует особенности динамических процессов при периодическом возмущении.

При статическом воздействии по координате y_1 , когда $p=0$, полагается, что возмущение становится статическим, найдём, что

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{k_2}{k_2 + k_3} = i_1, \quad (10)$$

где i_1 можно рассматривать как передаточное отношение, характеризующее рычажные свойства системы при формировании связанности перемещений системы по координатам y_1 , y_2 .

С учётом вышеприведенного можно полагать, что механическая колебательная система, приведенная на рис.1 (или «механизм» с упруго-инерционными звеньями) может рассматриваться как некоторая форма рычажного механизма. Полагаем, что такой «механизм» мог бы получить название «виртуального» рычага. Частные аспекты предлагаемых подходов представлены в работе [14].

3. В рассматриваемом случае $i_1 > 0$, что позволяет «отнести» виртуальный рычаг к рычагам второго рода. Это предопределяет соответствующее расположение точки опоры виртуального рычага.

Если полагать, что расстояние между элементами m_1 и m_2 в статическом состоянии известно, например, l_0 , то положение точки опоры можно найти из соотношения

$$\frac{k_2}{k_2 + k_3} = \frac{l_1}{l_1 + l_0}, \quad (10')$$

где l_1 расстояние от элемента m_1 до точки опоры виртуального рычага. Таким образом, точка опоры в рассматриваемом случае нагружения определяется выражением

$$l_1 = l_0 \frac{k_2}{k_3}. \quad (11)$$

Соотношение параметров, определяющих положение точки опоры, соответствует схеме на рис. 4, где т.(О) является точкой опоры виртуального рычага.

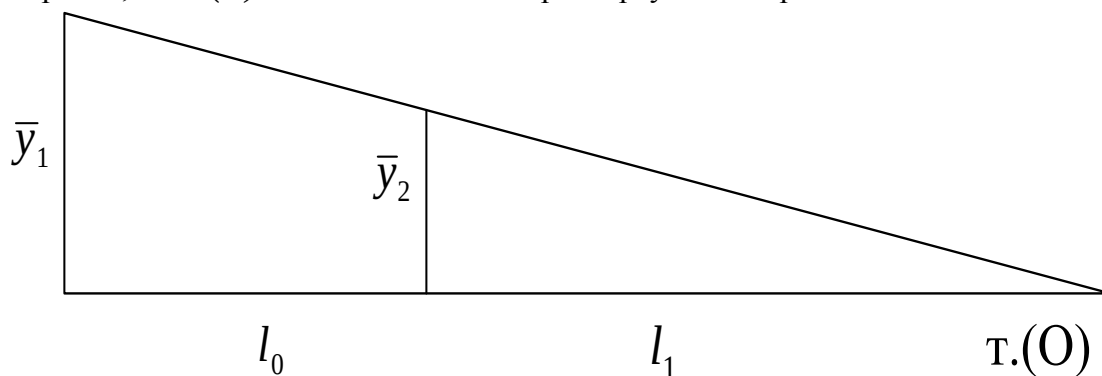


Рис. 4. Принципиальная схема для определения точки опоры виртуального рычага

Таким образом, распределение смещений по координатам y_1 и y_2 в статическом режиме в механической системе с массоинерционными и упругими элементами соответствует распределениям смещений $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$ в виртуальном рычаге первого рода. Отметим, что точки опоры рычага при динамических нагружениях трансформируются в «узлы вращений» или «узлы колебаний», что рассматривалось в работе [15].

Таким образом, механическая колебательная система с двумя степенями свободы в определенных ситуациях может находиться в ситуации, соответствующей представлению о движении некоторого твердого тела.

III. Особенности математических моделей механических колебательных систем с твердым телом. 1. Для транспортных объектов и технологических вибрационных машин часто используются расчетные схемы, в которых объект, динамические состояния которого оцениваются, имеет вид твердого тела, совершающего плоское колебательное движение.

Расчетная схема такого объекта представлена на рис. 5. Твёрдое тело с массой M и моментом инерции J опирается на упругие элементы с коэффициентами жесткости k_1, k_2, k_3 . Внешнее возмущение приложено в т.(O) (рис. 5) твердого тела на расстоянии l_0 от центра масс т.(O_1) (рис. 5).

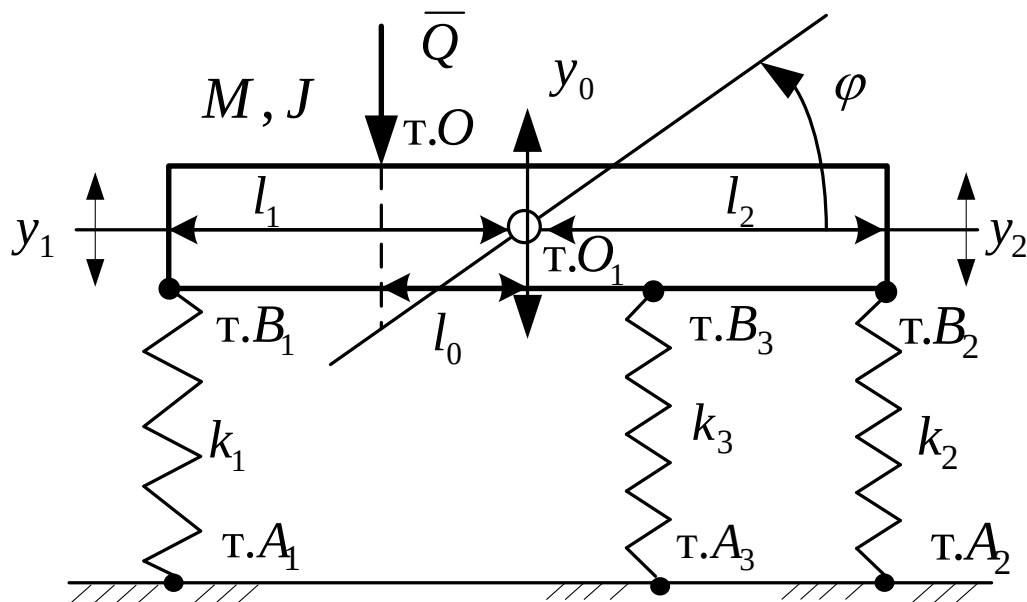


Рис. 5. Расчетная схема технического средства с объектом в виде твердого тела, совершающего плоское движение.

Для составления уравнений движений, вызванных действием гармонической силы $Q(t)$, приложенной в т.(O), запишем выражение для кинетической и потенциальной энергии, используя системы координат y_1, y_2 , а также y_0 и φ . При расчетах используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} y_0 &= ay_1 + by_2, \varphi = c(y_2 - y_1), y_1 = y_0 + l_1\varphi, y_2 = y_0 - l_3\varphi, \\ a &= \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где l_1, l_2 – расстояние до центра масс т.(O_1), l_0 – плечо приложения внешнего возмущения Q , l_3 – положение т.(B_2), где закрепляется упругий элемент k_2 , y_3 – не является независимой переменной и определяется через y_1, y_2 .

Выражение для кинетической энергии системы имеет вид

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} M (a\dot{y}_1 + b\dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2} J c^2 (y_2 - y_1)^2 \quad (13)$$

Выражение для потенциальной энергии системы при силовых возмущениях Q , в свою очередь, определяется выражением:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 y_2^2 + \frac{1}{2} k_3 y_3^2 \quad (14)$$

При расчетах используются следующие соотношения:

$$y_3 = ay_1 + by_2 - l_3 c(y_2 - y_1) = a_1 y_1 + b_1 y_2, \text{ где } a_1 = a + l_3 c, b_1 = b - l_3 c. \quad (14')$$

В этом случае система уравнений движения в операторной форме в координатах $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$ по аналогии с вышеприведенными выкладками для цепной системы по рис. 1, примет вид:

$$\bar{y}_1[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + (k_1 + k_3a_1^2)] - \bar{y}_2[(Jc^2 - Mab)p^2 + k_3a_1b_1] = \bar{Q}(a + l_0c) \quad (15)$$

$$\bar{y}_2[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + (k_2 + k_3b_1^2)] - \bar{y}_1[(Jc^2 - Mab)p^2 + k_3a_1b_1] = \bar{Q}(b - l_0c) \quad (16)$$

2. Система уравнений в операторной форме может быть представлена математической моделью в виде структурной схемы эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Как и в ранее (рис. 6) рассмотренном случае цепной системы полагается, что система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения статического равновесия.

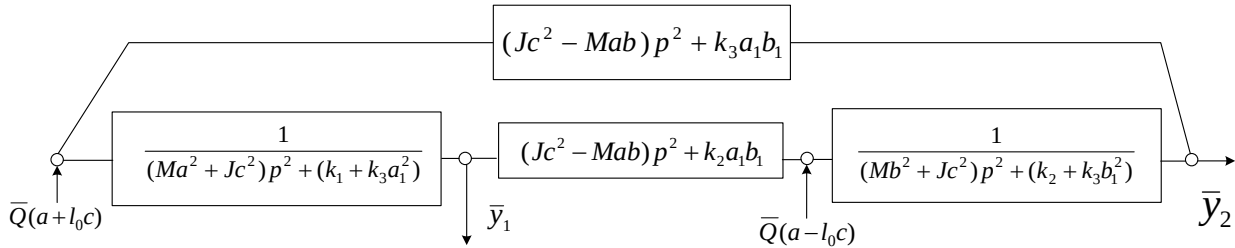


Рис. 6. Структурная математическая модель (структурная схема) механической колебательной системы с двумя степенями свободы на рис. 5

Структурная математическая модель состоит из двух парциальных блоков; имеет внешнее возмущение на входе каждой из парциальных систем. Динамические свойства такой системы отличаются **большим** разнообразием, чем обычная система цепного типа (рис. 1)

3. На частоте, определяемой выражением

$$\omega_{dyn}^2 = \frac{k_3a_1b_1}{Jc^2 - Mab} \quad (17)$$

система может разделиться на две автономные части, не влияющие друг на друга, что предопределяет возможность проявления специфического режима вибрационного взаимодействия элементов системы.

Передаточные функции системы могут быть построены на основе структурной схемы (рис.6) с учетом совместного действия силового возмущения:

$$W'_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{(a + l_0c)[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_3b_1^2] + (b - l_0c)[(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3a_1b_1]}{A_1(p)} \quad (18)$$

$$W'_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{(b - l_0c)[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_3a_1^2] + (a + l_0c)[(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3a_1b_1]}{A_1(p)}, \quad (19)$$

где

$$A_1(p) = [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_3b_1^2][(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_3a_1^2] - [(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3a_1b_1]^2 \quad (20)$$

является частотным характеристическим уравнением системы.

Рассматриваемая система обладает, кроме выше рассмотренного специфического динамического режима, ещё и двумя частотами режимов динамического гашения колебаний, которые получаются из решения частотных уравнений, формируемых при «обнулении» числителей передаточных функция $W'_1(p)$ и $W'_2(p)$. Отметим также, что система имеет две частоты собственных колебаний и обладает возможностями работать в около резонансных режимах.

Связь между движениями системы по координатам y_1, y_2 определяется параметрами передаточных функций межпарциальных связей $W'_1(p) = \bar{y}_2 / \bar{y}_1$ с учетом совместного действия двух силовых факторов.

4. Если полагать, что силовые воздействия имеют частную форму, когда реализуется режим статических взаимодействий, то соотношение амплитуд колебаний по координатам $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ при $p=0$ определяется выражением:

$$i'_1 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(b-l_0c)(k_1+k_3a_1^2)+(a+l_0c)(-k_3a_1b_1)}{(a+l_0c)(k_2+k_3b_1^2)+(b-l_0c)(-k_3a_1b_1)}, \quad (21)$$

Передаточное отношение (19) отображает особенности рычажных взаимодействий виртуального рычага, определяющиеся не только величиной передаточного отношения виртуального рычага, но и знаком.

5. При $i'_1 = 1$ твёрдое тело (M, J) совершает только поступательное движение по вертикали – рычажные свойства не реализуются, точка опоры виртуального рычага не идентифицируется.

При $i'_1 = -1$ виртуальный рычаг обладает свойствами рычага второго рода, при этом точка опоры виртуального рычага располагается в центре твердого тела. Отметим также, что такая точка опоры виртуального рычага может рассматриваться как центр колебаний или центр вращения в координатах $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ и $\bar{y}_0, \bar{\varphi}$.

При условиях, что i'_1 является отрицательной величиной, но не совпадает с -1, центр колебаний (или точка опоры виртуального рычага) будет находиться между центральной точкой твердого тела и одной из крайних точек твердого тела (т.т. B_1 и B_2). При этом, как центр колебаний (или вращений) твердого тела при динамическом нагружении гармоническим внешним воздействием $Q(t) \neq 0$, такая «точка» реализуется на частотах режимов динамического гашения по координатам y_1, y_2 соответственно.

Если i'_1 имеет отрицательное значение, но находится за пределами участка (-1,0), то система трансформируется в рычаг 2-ого рода, точка опоры которого будет располагаться между точками (B_1 и B_2), точка, соответствующая $i'_1 = -1$ находится в геометрическом центре протяженного твёрдого тела.

Если координаты $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ имеют одинаковые знаки, то виртуальный рычаг «вырождается» в структурное образование, совершающее поступательное движение по вертикали.

При отношении координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ больше единицы ($i'_1 > 1$) точки опоры виртуального рычага смещается за пределы твердого тела.

Запишем выражение для определения передаточного отношения виртуального рычага в общем виде:

$$i_1 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(b-l_0c)(k_2+k_3b_1^2)+(a+l_0c)(-k_3a_1b_1)}{(a+l_0c)(k_1+k_3a_1^2)+(b-l_0c)(-k_3a_1b_1)}, \quad (22)$$

Используя соотношение между параметрами виртуального рычага:

$$i'_1 = \frac{(l_1-l_0)[k_2+k_3(l_2-l_0)^2]+(l_2+l_0)[-k_2(l_1+l_0)(l_2-l_0)]}{(l_2+l_0)[k_1+k_3(l_2-l_0)^2]+(l_1+l_0)[-k_2(l_1+l_0)(l_2-l_0)]}, \quad (22')$$

Таким образом, состояние виртуального рычага формируется статическим приложением силы, которое формирует передаточное отношение в рычажной связи координат; при этом точка опоры рычага определяется с учетом знака передаточного отношения i'_1 по методике, приведенной выше в разделе II. Точка приложения может находиться в различных местах твердого тела, что определяется параметрами и значениями приведённых значений жесткостей упругих элементов k_1, k_2, k_3 .

Заключение. 1. Действие постоянной силы, рассматривается, как фактор формирования определенного статического состояния, относительно которого механическая колебательная система с двумя степенями свободы реализует особенности свойств, характерные для рычажного механизма. В зависимости от исходных условий, связанных с выбором параметров механической колебательной системы, возможно рассмотрение ситуаций, связанных с появлением структурного образования в виде виртуального рычага первого или второго рода с учетом особенностей локализации расположения опорных точек рычага; выявление мест расположения точек опоры совпадает с подходами в оценке свойств механических колебательных систем при определении расположения «центров вращения» (узлов колебаний) упругоинерциальных структур.

2. Вместе с тем необходимо отметить, что определенные состояния механических колебательных структур могут быть реализованы и на основе изменения физических параметров элементов системы; такими параметрами могут быть значения коэффициентов жесткости упругих элементов, координат расположения или крепления точек стыковки различных элементов системы и др. Неподвижная точка опоры виртуального рычага (рис. 5) находится в т.(В), положение которой может быть найдено на основе выражения:

$$i_{10} = \frac{(l_1 - l_0)[l_2 - l_0]^2 + (l_2 - l_0)(l_2 + l_0)(l_1 + l_0)}{(l_2 - l_0)[l_2 - l_0]^2 + (l_2 + l_0)(l_2 + l_0)(l_2 - l_0)}, \quad (23)$$

3. Механические колебательные системы с сосредоточенными параметрами широко используются как расчетные схемы в задачах динамики технических объектов транспортного и технологического назначения, работающих в условиях интенсивных и динамических и вибрационных нагрузок.

4. Действия внешних возмущений при статическом нагружении формируют определенное состояние распределения смещений отдельных точек системы, что можно рассматривать, как проявление рычажных связей, возникающих между характерными точками виртуального рычажного механизма.

5. Предлагается и развивается методологическая основа системных подходов в формировании рычажных связей, использующих методы структурного математического моделирования.

6. Рассмотрены особенности формирования виртуального рычага (или рычажных связей) на примерах механических колебательных систем цепного типа; показаны возможности использования аналитического аппарата теории автоматического управления. Механическая колебательная система, рассматриваемая, как виртуальный рычаг, позволяет оценить распределение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов В.Е. Махутов Н.А. Машиностроение России: Состояние и развитие. М.:ОЭММПУ РАН. 2010. 72 с.
2. De Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice // Boca Raton. London. New York. Washington. D.C.: CRC Press. 2000. P.957.
3. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection, Springer International Publishing. Switzerland. 2016. P. 708.
4. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control. Vol.252.Springer International Publishing. Cham. 2020. P.521.
5. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность

движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи): монография. Иркутск: ИрГУПС. 2018. 692 с.

6. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. М.: Наука. Физматлит. 1997. 352 с.
7. Димов А.В. Решение обобщенных задач виброзащиты и виброизоляции на основе структурных методов математического моделирования: автореферат дис. кандидата технических наук. Иркут. гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. 2005. 23 с.
8. Каимов Е.В. Рычажные связи и механизмы во взаимодействиях элементов машин и оборудования при вибрационных внешних возмущениях: автореферат дис. кандидата технических наук. Братск. 2016. 19 с.
9. Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике. Справочное пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей. Том 1. Элементы механизмов. Простейшие рычажные и шарнирно-рычажные механизмы. Классика инженерной мысли: машиностроение URSS 2019г. 500с.
10. Упырь Р.Ю. Динамика механических колебательных систем с учетом пространственных форм соединения элементарных звеньев: автореферат дис. кандидата технических наук.- Иркутск. 2009. 19 с.
11. Драч М.А. Динамический синтез и моделирование в задачах оценки и изменения вибрационного состояния крутильных колебательных систем: автореферат дис. кандидата технических наук. Иркут. гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. 2006. 24 с.
12. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Каимов Е.В. Виртуальный рычажный механизм: динамическое гашение колебаний как форма проявления рычажных связей // Известия Транссиба. 2014. № 4 (20). С. 61-71.
13. Лурье А.И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М.: Наука. 1959. 368 с.
14. Выонг К.Ч. Новые возможности изменения динамических состояний вибрационных технологических машин // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 25-31.
15. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Выонг К.Ч. Рычажные связи в задачах коррекции динамического состояния вибростенда // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 28-41.

LEVER TIES: FEATURES OF STRUCTURAL INTERPRETATIONS

Sergey V. Eliseev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the Rector's Office for Scientific Work,
e-mail: eliseev_s@inbox.ru,

Sergey K. Kargapoltshev

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department «Automation of production processes», e-mail: kck@irgups.ru,

Andrey V. Eliseev

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics,
e-mail: eavsh@ya.ru,

Irkutsk State Transport University,
664074, Irkutsk, Chernyshevsky str. 15.

Abstract. The article deals with the formation of a methodological basis for the system analysis of mechanical oscillatory structures that reflect the properties of transport and technological objects under conditions of vibrational dynamic loads. The aim of the study is to develop a method of analysis and dynamic synthesis in the problems of dynamics of mechanical oscillatory systems, focused on detailing ideas about the formation of generalized relationships between the parameters of the system and evaluating the features of the resulting lever relations. Methods of the general theory of systems, in particular, the analytical apparatus of the theory of automatic control are used. It is shown that the introduction of transfer functions of interpartial connections makes it possible to construct a scheme for evaluating and using specific properties of mechanical oscillatory systems. A method is proposed in which a mechanical oscillatory system with linear properties and concentrated parameters can be interpreted as a dynamically equivalent automatic control system. The transfer function of the system is constructed on the basis of differential equations of motion obtained within the framework of the Lagrange formalism with subsequent Laplace transformation, which creates a convenient platform for evaluating the dynamic properties of the system. It is shown that the transfer function without special connections, when the frequency of the external disturbance is zeroed, displays the properties of the virtual lever under static loading conditions. A number of new concepts about the manifestations of the lever properties of a mechanical oscillatory system at fixed frequencies of external harmonic in-phase disturbances are introduced and considered. The proposed method is illustrated by a number of examples.

Keywords: mechanical oscillatory system, block diagram, transfer function, lever connections, transfer relations.

REFERENCES

1. Fortov V.E., Mahutov N.A; Mashinostroenie Rossii: Sostojanie i razvitie[Mechanical Engineering of Russia: State and development] //Rossijskaja akademija nauk. Otdelenie jenergetiki, mashinostroenija, mehaniki i processov upravlenija. M.: OJeMMPU RAN = Department of Power Engineering, Mechanical Engineering, Mechanics and Control Processes of the Russian Academy of Sciences. 2010. P.72.
2. De Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice // Boca Raton. London. New York. Washington. D.C.: CRC Press. 2000. P. 957.
3. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection, Springer International Publishing. Switzerland. 2016. P. 708.
4. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control, Vol.252, Springer International Publishing. Cham. 2020. P.521.
5. Eliseev S.V. Prikladnoj sistemnyj analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnyh i tehnologicheskikh mashin: svjaznost' dvizhenij, vibracionnye vzaimodejstviya, rychazhnye svjazi) [Applied system analysis and structural mathematical

- modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of movements, vibration interactions, lever connections)]: monografija //Irkutsk: IrGUPS = Irkutsk State Transport University. 2018. P.692.
6. Emel'janov S.V., Korovin S.K. Novye tipy obratnoj svyazi: Upravlenie pri neopredelennosti [New types of feedback: Management under uncertainty]. M.: Nauka. Fizmatlit = Science. Fizmatlit. 1997. P.352.
 7. Dimov A.V. Reshenie obobshhennykh zadach vibrozashhity i vibroizoljatsii na osnove strukturnykh metodov matematicheskogo modelirovaniya [Solution of generalized problems of vibration protection and vibration isolation on the basis of structural methods of mathematical modeling]: avtoreferat dis. kandidata tehniceskikh nauk. //Irkut. gos. un-t putej soobshhenija = Irkutsk State Transport University. Irkutsk. 2005. P.23.
 8. Kaimov E.V. Rychazhnye svyazi i mehanizmy vo vzaimodejstvijah jelementov mashin i oborudovaniya pri vibracionnykh vneshnih vozmushhenijah [Lever connections and mechanisms in the interactions of elements of machines and equipment under vibrational external disturbances]: avtoreferat dis. kandidata tehniceskikh nauk. Bratsk. 2016. P. 19.
 9. Artobolevskij I.I. Mehanizmy v sovremennoj tehnike. Spravochnoe posobie dlja inzhenerov, konstruktorov i izobretatelej. V 1. Jelementy mehanizmov. Prostejschie rychazhnye i sharnirno-rychazhnye mehanizmy [The simplest lever and hinge-lever mechanisms]. Moskva: Mashinostroenie URSS = URSS Publishing Group. 2019g. P.500.
 10. Upr' R.Ju. Dinamika mehanicheskikh kolebatel'nyh sistem s uchetom prostranstvennyh form soedinenija jelementarnykh zven'ev [Dynamics of mechanical oscillatory systems taking into account spatial forms of connection of elementary links] : avtoreferat dis. kandidata tehniceskikh nauk: Irkutsk. 2009. P.19.
 11. Drach M.A. Dinamicheskij sintez i modelirovanie v zadachah ocenki i izmenenija vibracionnogo sostojanija krutil'nykh kolebatel'nykh system [Dynamic synthesis and modeling in problems of evaluation and change of the vibrational state of torsional oscillatory systems]: avtoreferat dis. kandidata tehniceskikh nauk //Irkut. gos. un-t putej soobshhenija = Irkutsk State Transport University. Irkutsk. 2006. P.24.
 12. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Kaimov E.V. Virtual'nyj rychazhnyj mehanizm: dinamicheskoe gashenie kolebanij kak forma projavlenija rychazhnykh svyazej [Virtual lever mechanism: dynamic damping of vibrations as a form of manifestation of lever connections] // Izvestija Transsiba= Proceedings Of The TRANS-Siberian Railway. 2014. № 4 (20). Pp. 61-71.
 13. Lur'e A.I. Operacionnoe ischislenie i primenenie v tehniceskikh prilozhenijah [Operational calculus and application in engineering applications]. M.: Nauka=Science. 1959. P. 368.
 14. Vyong K.Ch. Novye vozmozhnosti izmenenija dinamicheskikh sostojanij vibracionnykh tehnologicheskikh mashin [New opportunities for changing the dynamic states of vibrational technological machines] //Sistemy. Metody. Tehnologii = Systems. Methods. Technologies. 2018. № 2 (38). Pp. 25-31.
 15. Eliseev S.V., Kuznecov N.K., K.Ch. Vyong Rychazhnye svyazi v zadachah korrektsii dinamicheskogo sostojanija vibrostenda [Lever connections in problems of correction of the dynamic state of the vibrostand] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta = Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2018. T. 22. № 9 (140). Pp. 28-41.

УДК 910.1:51-7

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА COVID-19

Черкашин Александр Константинович

д.г.н., профессор,

зав. лабораторией теоретической географии, e-mail: cherk@mail.icc.ru

Лесных Светлана Ивановна

к.г.н., с.н.с., e-mail: llsvetll@mail.ru

Красноштанова Наталья Евгеньевна

к.г.н., н.с., e-mail: kne1988@rambler.ru

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

Аннотация. Информационно-математическая технология сбора и первичной обработки пространственных данных организуется в форме геоинформационного мониторинга (ГИМ) по метатеоретическим принципам строения пространственно-распределенных коммутационных полей – расчлененных функционально связанных пространств конструктивной деятельности. Это соответствует правилам информационного и математического обеспечения САПР создания пространственно-графических форм и тематических карт разного содержания. Вокруг распределенных БД разных ГИС образуется слой информационных взаимодействий различных проектов и пользователей. Отдельные БД соответствуют порталам – узлам связи пользовательской ГИС с глобальным информационным многообразием. ГИМ-технология реализуется на примере оперативного формирования специальной БД ГИС и построения статистических графиков развития пандемии нового коронавируса COVID-19 на национальном уровне. Процессы и графики моделируются в терминах теории надежности с описанием кривых функциями плотности вероятности распределения экстремальных событий, из которых оптимальной является функция Фреше распределения моментов времени выявления заболеваний у населения. Использование относительных показателей надежности минимизирует влияние ошибок данных, а их межстрановой анализ указывает на наличие постоянных коэффициентов уравнений, что позволяет применять эпидемиологическую модель в дальнейших исследованиях статистических рядов.

Ключевые слова: геоинформационный мониторинг, COVID-19, пандемия нового коронавируса, математическое моделирование, национальные особенности.

Цитирование: Черкашин А. К., Лесных С.И., Красноштанова Н.Е. Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 17-35. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.002

Введение. Формирование и развитие пандемии нового коронавируса COVID-19 (SARS-CoV-2), помимо биомедицинских и организационных проблем поставили новые масштабные задачи создания, совершенствования и использования математических и информационных технологий в плане сбора, преобразования, представления и использования пространственных данных для статистического анализа, прогнозирования и управления критическими ситуациями. Осуществляется оперативный мониторинг изменения во времени количества установленных случаев заражения, числа выздоровевших и умерших с построением многочисленных эпидемических кривых и ГИС-картографированием накопленной информации на глобальном, государственном, региональном и местном уровнях с учетом демографической структуры большого населения, факторов и условий развития эпидемии коронавируса по различным странам.

Научная дисциплина, названная академиком Н.Н. Яненко математической технологией (МТ), представлена тремя системами: автоматизированного проектирования инженерных конструкций, решением больших задач математического моделирования и работой специализированных ЭВМ параллельного действия [1]. Наличие такой технологической последова-

тельности позволило по-новому решать проблему моделирования. Объектом МТ является вычислительная часть этой последовательности: математическая модель → численный алгоритм → программа → расчеты на ЭВМ [2]. Особое внимание уделяется конечным стадиям цепочки, связанным с параллельными вычислениями. Вместе с тем, существенными (невыводимыми) проблемами моделирования являются аналитические задачи первых этапов технологии: разработка идей и методов математического моделирования, решение которых вносит ясность в процесс создания моделей разного вида. Это инновационный, метатеоретический уровень реализации МТ [3, 4], что позволяет решать сложные задачи проектирования и конструирования математических моделей. Метатеоретический подход реализуется на границе знаний математики и содержательных теорий и соответствует особому стилю конкретного мышления [5].

Для аппроксимации эмпирических кривых и поверхностей функциями различной сложности применяются методы, используемые в системах автоматизированного проектирования изделий – САПР [6, 7]. Она реализуется средствами параметрического моделирования с использованием параметров объектов и соотношений между ними, что дает возможность варьировать параметры и их связи, быстро создавать новые конфигурации. Параметр – это независимая исходная величина, используемая для выделения геометрического объекта из множества других по внутренним свойствам, внешним факторам и пространственно-временному положению, а также характеристика связи параметров – коэффициентов моделей. Вариационная параметризация основана на построении модели пространственного объекта в виде системы уравнений связи параметров [6].

Обычно проектирование эпидемических кривых идет по простой иерархической схеме путем введения в модель SIR [8, 9] новых переменных и дифференциальных уравнений. В статье предлагается подход к моделированию эпидемий с позиций теории надежности. Он основан на естественной взаимосвязи понятий надежности и используется для аппроксимации временных рядов данных и картографического отображения внутренних параметров эпидемического процесса распространения коронавируса среди населения разных стран и регионов с проверкой адекватности различных моделей по материалам оперативного геоинформационного мониторинга, поступающих из различных источников.

1. Геоинформационный мониторинг. Основная функция геоинформационного мониторинга (ГИМ) – формирование геоинформационного объекта (ГИО), наполнение баз данных геоинформационных систем (БД ГИС) по модели данных «территориальный объект-свойство». В этом качестве мониторинг выступает как посредник между реальностью и информационными структурами, куда включены не только средства массовой информации, но и результаты научного анализа и визуализации сведений, в частности, ГИС-картографирования ситуации. Виды мониторинга различаются по целевой установке – направлению предоставления и использования информации о ситуации. ГИМ в структуре территориального управления – это деятельность, ориентированная на наполнение и актуализацию инвариантных баз данных и знаний ГИС, привлекаемых для решения самых разных задач математическими средствами моделирования [10]. Мысленное и фактическое разделение функций ГИМ и ГИС дает возможность лучше формулировать и решать свойственные им проблемы. ГИС в широком смысле выступает в качестве части информационного блока организационной системы территориального управления, а ГИМ решает задачи связи наблюдаемой реальности с блоком ГИС, причем прослеживаются инструментальные и технологические различия двух систем.

Смысл и содержание ГИМ хорошо передается термином «статистическое исследование», которое состоит из этапов: 1) проведение мероприятий по подготовке исследования; 2)

сбор первичных данных (статистическое наблюдение – СН); 3) сводка, т. е. систематизация и группировка статистических данных; 4) первичный анализ, обобщение полученных данных, обнаружение простых закономерностей и их отображение в форме аналитических отчетов, таблиц, графиков, карт, инфограмм, научных статей. Выделяют три формы СН: 1) отчетность, когда сведения постоянно поступают в статистические органы от отдельных предприятий и учреждений в виде информации об их деятельности по установленным формам; 2) специально организованное СН, которое проводится с конкретной целью и на определенную дату для получения дополнительной информации; 3) регистровые наблюдения (регистры) – форма непрерывного СН за долговременными процессами, имеющими начало, стадию развития и конец с использованием регистрационных карточек и формуляров на соответствующих носителях [11].

В процедуре формирования БД ГИС первым важнейшим этапом является инвентаризация первичной информации из различных мест, что можно рассматривать в качестве своеобразного постоянно действующего ГИМ за старыми и новыми источниками пространственных данных. В соответствии с требованием полноты сконцентрированной в ГИС информации ГИМ должен предоставлять данные, позволяющие удовлетворять различные запросы. При появлении задач, требующих качественно новой информации, эта информация собирается и добавляется в БД и используется наравне со старыми сведениями. Следующие этапы ГИС – первичная обработка, картографическое и инфографическое представление накопленной информации и геоинформационное математическое моделирование. Здесь используются известные методы ГИС-анализа: SQL-запросы, наложение контуров или алгебра карт. Результаты их применения зависят от достоверности, собранной ГИМ информации, а также совершенства моделей и методов ее преобразования.

ГИМ является многоуровневым процессом, в котором учитывается естественная территориальная иерархия. Формируются постоянные и переменные составляющие БД ГИС фонового, текущего и оперативного мониторинга. Постоянной, инвариантной основой являются сетки контуров, представленные административными, ландшафтными, лесоустроительными, кадастровыми и растровыми границами членения территории. Каждая ячейка сетки (район, ареал, выдел, пиксел) связаны со значениями атрибутов базы данных ГИС, которые сохраняются, пополняются, обновляются, преобразуются и отображаются на картах. Эта информация становится основой для интерпретации результатов ГИМ.

Новая пандемическая ситуация, связанная с распространением коронавируса COVID-19 в мире, потребовала организации и проведения оперативного ГИМ и использования ГИС-технологии с представлением пространственной информации средствами инфографики – социально значимой формы графического и коммуникационного дизайна. Например, географическая инфографика показывает число случаев заболевания, летальных исходов и выздоровлений для более чем 3000 округов США [12]. В каждой стране и на уровне ее регионов созданы информационные порталы, где в онлайн режиме отражается изменение ситуации с распространением инфекции [13, 14, 15], в частности, картографически показано количество выявленных заражений по муниципальным районам [16]. В Южной Корее мониторинговая технология геопозиционирования прослеживает и информирует население о перемещении инфицированных людей и возможных контактах с инфекцией [17], что также реализовано в России [18].

Средствами ГИМ формируется ГИО в виде БД ГИС, для чего осуществляется сбор информации из различных источников и ее подготовка к системному анализу и картографированию. При необходимости проводятся дополнительные наблюдения, опросы и измерения для пополнения БД сведениями о факторах и условиях, ограничениях и обременениях дея-

тельности. Первичные, аналитические карты содержат исходную информацию описания ситуации. На основе БД строятся статистические графики – условные изображения числовых величин и их соотношений в виде различных геометрических образов — символов, точек, линий, плоских фигур: чертежей, рисунков, картосхем и картограмм. Такие образы придают наглядность исходным данным, визуально представляют закономерности средствами систем статистического анализа (SPSS, Statgraph, Statistica, SAS и т.д.) и в системах обработки электронных таблиц вида MS Excel.

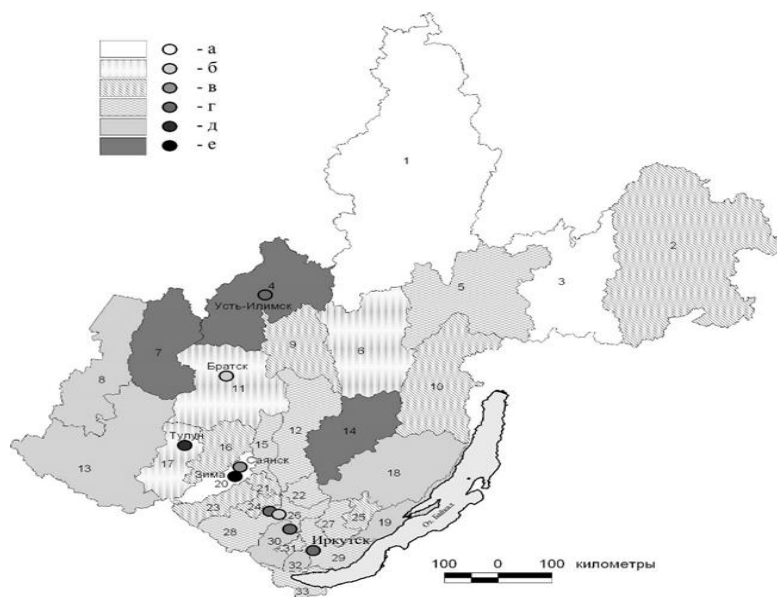


Рис. 1. Картограмма пространственной изменчивости интенсивности среднесуточного прироста (%) числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID-19 по муниципальным районам и городам Иркутской области на пике эпидемии (начало июля, 2020 г.). Градации прироста: а – 0%; б – 0 - 20%; в - 20 - 50%; г - 50 - 100%; д - 100 - 200%; е - 200 - 380%. Муниципальные районы: 1 – Катанский; 2 – Бодайбинский; 3 – Мамско-Чуйский, 4 – Усть-Илимский, 5 – Киренский, 6 – Усть-Кутский, 7 – Чунский, 8 – Тайшетский, 9 – Нижнеилимский, 10 – Казачинско-Ленский, 11 – Братский, 12 – Усть-Удинский, 13 – Нижнеудинский, 14 – Жигаловский, 15 – Балаганский, 16 – Куйтунский, 17 – Тулунский, 18 – Качугский, 19 – Ольхонский, 20 – Зиминский, 21 – Нукутский, 22 – Осинский, 23 – Заларинский, 24 – Аларский, 25 – Баяндаевский, 26 – Боханский, 27 – Эхирит-Булагатский, 28 – Черемховский, 29 – Иркутский, 30 – Усольский, 31 – Ангарский, 32 – Шелеховский, 33 – Слюдянский.

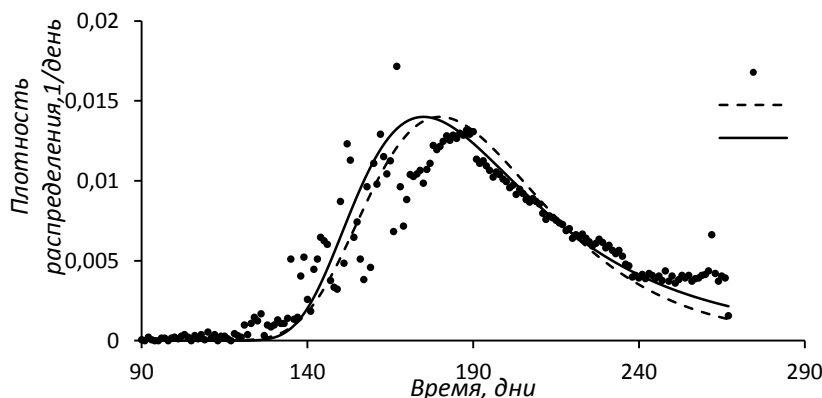


Рис. 2. Статистический график временной изменчивости суточного прироста числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID-19 в Иркутской области (1) и графический образ соответствующей закономерности – функции плотности распределения предельных значений по формуле Гумбея (2) и Фреше (3).

Аппроксимация графических образов по схеме САПР методами параметризации подразумевает преобразование информации БД ГИС, что рассматривается в качестве косвенных измерений и подразумевает использование средств квалитметрии, расчет соответствующих метрик пространства признаков и применение математических моделей и методов. Вычисляются вторичные данные, связь которых отражает более глубокие закономерности пространственной (рис. 1) и временной (рис. 2) изменчивости параметров состояния территорий.

2. Методология САПР. ГИМ выполняет функции геоинформационного обеспечения подготовки проектных решений и создания математических, графических и картографических моделей. САПР – это процесс основанного на системном подходе и математическом моделировании описания и создания в заданных условиях новых объектов или алгоритмов их функционирования на базе первичного изучения этих объектов и алгоритмов с применением компьютеров. Это достигается объединением современных технических средств и математического обеспечения, параметры которых выбираются с учетом особенностей задач проектно-конструкторской деятельности специалистов – пользователей системы. Подсистемы САПР определенного этапа проектирования делятся на объектные (объектно-ориентированные) и инвариантные (объектно-независимые), выполняющие соответственно специальные и унифицированные проектные процедуры и операции. При проектировании и составлении карт объектно-ориентированный подход связан с задачами методического, информационного и математического обеспечения, а инвариантный – с техническим, программным, системным и прикладным обеспечением процессов изготовления географических карт средствами ГИС. ГИС интегрируют свойства САПР, автоматизированных систем управления и картографирования, совместимых с промышленными системами типа ArcInfo, MapInfo, AutoCAD и др. [19].

Множество исходных данных и запоминаемых результатов работы по методологии САПР образуют БД ГИС, взаимосвязанную с проектными модулями через специально организуемый интерфейс, который защищает их от влияния специфики программной реализации ГИС, что обеспечивает независимость проектных операций от вида представления информации в базе данных (рис.3). Вокруг БД ГИС формируется единый слой информационных взаимодействий разных проектов и пользователей. В САПР послойная дифференциация (декомпозиция) конструкции изделий, решения задач и массива информации является основой методологии.

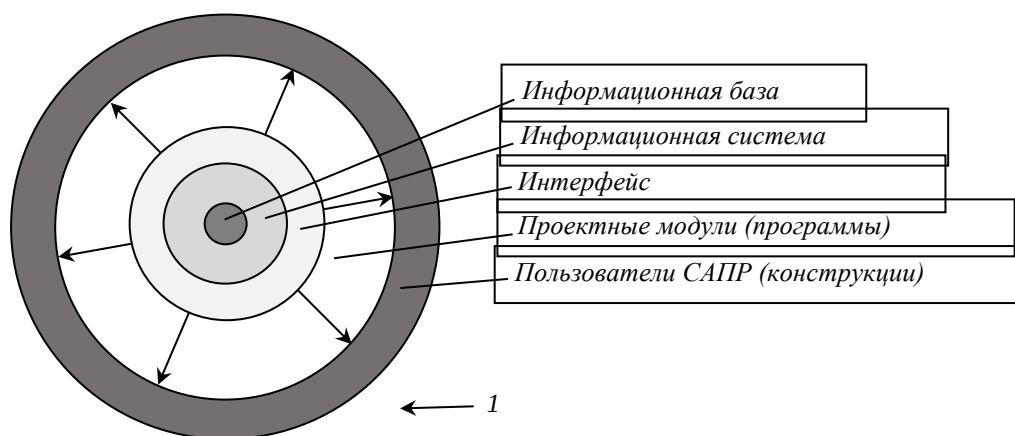


Рис. 3. Послойная схема информационного обеспечения САПР [21, с изменениями]:

1 – направления (векторы) проектирования (модели, программы).

Примеры типовых маршрутов (технологии) проектирования: разрезание принципиальной схемы устройства на части, размещение микросхем на плате, расслоение их межсо-

единений, расчленение сложной задачи синтеза документации на простые задачи промежуточных проектных решений (блочный-иерархический подход к организации проектирования) [20]. В этом смысле математической моделью процесса проектирования могут стать мета-теоретические процедуры расслоения дискретных множеств и непрерывных пространств [3].

3. Процедуры расслоения. Расслоением $s = (X, \pi, B)$ называется отображение π множества X на множество B : $\pi: X \rightarrow B$, где X – множество (пространство, объект) расслоения, $B = \{b_j\}$ – база расслоения, состоящая из набора элементов b_j этой базы. Обратное отображение (сечение) $\sigma = \pi^{-1}$ ($\sigma: B \rightarrow X$) превращает X в расслоенное множество $Y = \{Y_j\}$. Для любого элемента $b_j \in B$ прообраз $Y_j = \sigma(b_j)$ называется слоем расслоения π над элементом $b_j \in B$. В частном случае расслоение – это сортировка (разбиение) множества элементов X на непересекающиеся подмножества $Y = \{Y_j\}$ элементов, что происходит, например, при классификации элементов по типам $b_j \in B$. В БД ГИС и соответствующих геоизображениях выделяется несколько картографических слоев, различающихся по тематике $b_j \in B$. Карта территории дифференцируется по контурам административных районов или ландшафтных выделов, где тип каждого контура представлен в картографической легенде B отдельным знаком b_j . Послойная организация пространственно привязанных данных является одной из характерных особенностей ГИС. Такой подход используется при проектировании и создании цифровых карт, обработке результатов дистанционного зондирования земли, при выполнении кадастровых работ.

Аналитической формой анализа данных становится касательное расслоение многомерного пространства $X = \mathbb{R}^n$ координат $x = \{x_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) над многообразием $M \subset X$: $\pi: X \rightarrow M$, $\pi^{-1}: M \rightarrow MT = \{MT_{x_0}\}$. Каждый базовый элемент (точка касания) $b \in M$ слоя MT_{x_0} координируется набором значений $x_0 = \{x_{0i}\}$. Многообразие – это поверхность в пространстве расслоения X , заданная непрерывной функцией $F(x)$, или $F(x_0)$. В этом смысле многообразие – это огибающая множества независимых слоев $MT_{x_0} \subset X$, увязывающая эти слои по форме $F(x)$. При проектировании исходят из содержательной гипотезы, что все существующие многообразия локально линейны, т.е. их свойства $F(x)$ в окрестности каждой точки x_0 однозначно соответствуют свойствам $f(y)$ касательного слоя MT_{x_0} в точке $x_0 \in F(x) \subset X$. Функция $f(y) = F(x) - F_0$, $F_0 = F(x_0)$ задается в смещенных локальных координатах $y = x - x_0$ билинейным уравнением дифференциальной геометрии [22]

$$f(y) = Lf = \sum_{i=1}^n a_i y_i, a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i}, L = \sum_i \frac{\partial}{\partial y_i} y_i, \quad (1)$$

С каждым элементом b связана локальная система координат $y = \{y_i\}$ с началом $x_0 = \{x_{0i}\}$ в координатном пространстве $x = \{x_i\}$ (радиус-вектор), набор функций $F(x)$ и $f(y)$, ко векторы их чувствительности $a = \{a_j\}$ к изменению $y = \{y_i\}$ или $x = \{x_j\}$ и векторный оператор L для этих функций. На практике x_0 рассматривается как номинальное (инвариантное) значение состояния системы, от которого отсчитываются отклонения y с допуском $y_0 \geq y$. В конкретных приложениях эти понятия интерпретируются специальным образом.

Операторные уравнения $f(y) = Lf$ (1) связи переменных $y = \{y_i\}$ не различаются по слоям и в этом смысле свойства слоев эквивалентны для разных функций $F(x) = f(y) + F(x_0)$, различающихся только видом функций F и значениями этих функций $F(x_0)$ в точке касания x_0 . Координаты $x_0 = \{x_{0i}\}$ характеризуют условия среды реализации соответствующих универсальных связей $f(y)$ типового слоя $MT \leftrightarrow MT_x$, сравнимого с любым слоем MT_{x_0} . В геоинформационных системах они соответствуют порталам – узлам связи пользовательской ГИС с глобальным информационным многообразием.

4. Логика применения. При конструировании [20] с помощью математических моделей $F(x)$ сначала определяются геометрические и топологические свойства объектов. В

функциональном проектировании моделируются последовательные изменения состояния объектов функциями взаимосвязи $F(x)$ фазовых переменных $x=\{x_j\}$, что характеризуют состояние объекта, и внешних показателей $x_0=\{x_{0i}\}$, параметризующих состояния их среды, а также независимых переменных времени t и пространственных координат ξ . Решением системы уравнений являются зависимости $F[x(t, \xi)]$, представленные в табличной форме и в виде графиков пространственно-временных и факторных взаимосвязей и карт. Верификация на основе моделирования заключается в установлении соответствия проектного решения $F[x(t, \xi)]$ исходному, эталонному описанию ТЗ или модели $F(x)$ типового слоя MT_0 . Причем $F[x(t, \xi)]$ и $F(x)$ могут иметь разный состав фазовых переменных, но в локальных координатах $y=x-x_0$ приводиться к одинаковым, в пределах заданной точности, типовым зависимостям $f(y)$. Соответствие моделей с разными параметрами среды x_0 различных касательных слоев MT_{x_0} называется функциональной эквивалентностью, позволяющей действовать по прецеденту – переносить наработки одного проекта в другой.

При структурной (качественной) и параметрической (количественной) верификации необходимо отсеивать нерациональные варианты решений, выбирать лучшие модели $F(x)$ и по данным статистически определять их коэффициенты согласно ситуации. Модели находятся в классе отношений $F(x) = f(y)+F(x_0)$, где $f(y)$ определяет специальную метрику локального пространства слоя MT_{x_0} (расстояния точки x от x_0), или в виде конкретной функции $G[f(y)]$ от $f(y)$ [23]. Анализ чувствительности модели состояния и изменения объекта в слое $f(y)$ (1) осуществляется по коэффициентам чувствительности a_i . Вектор коэффициентов $a=\{a_i\}$ определяет значение и направление изменений, по всему многообразию M послойно формирует каноническое эйлерово поле $Lf(y)=f(y)$, моделирующее объект $F(x)$ в каждой точке x_0 в виде функциональных схем $F(x_0)$ – сети однородных узлов $x_0 \in MT_{x_0}$ и ячеек MT_{x_0} (см. рис.3) функционально связанного расслоенного пространства $MT=\{MT_{x_0}\}$. Информационные комплексы (устройства) математического обеспечения слоев $MT_{x_0} \leftrightarrow MT_0$ формируются по универсальной схеме обеспечения типового слоя MT_0 , что позволяет применять типовые модели при проектировании широкой номенклатуры объектов. Этот принцип стандартизации (комплексности) является теоретическим фундаментом автоматизации проектирования [20]. Функциональная эквивалентность слоев позволяет сделать в технологии ГИМ любой разработанный слой типовым (централизованным). Преобразование (морфизм, отображение, передача информации, сигнала) $\phi_{x_0}: MT_0 \rightarrow MT_{x_0}$ рассматривается как трансформация, когда базовые структуры и функции слоя MT_0 преобразуются в новые формы, например, при трансляции программ или загрузке информации в БД ГИС. Формально при этом меняется содержание узлов связи x_0 , т.е. положение слоя MT_{x_0} на многообразии M , относительно которого по-новому интерпретируется информация. Преобразование в несколько этапов $MT_{x_i} \rightarrow MT_{x_{i+1}}$ называется трассировкой – пошаговым выполнением трансформации с остановками на каждом этапе (слое).

В итоге, всякая проектируемая система может быть представлена моделью расслоения многообразия – локально линейного образования, по частям (слоям) представимая в форме расслоенного векторного пространства и формирующего функционально связанный комплекс (гомологию и гомотопию) со свойствами трассировки по пути (треке, тракте), заданном на многообразии. Наглядной иллюстрацией расслоенного многообразия могут быть различные коммутационные поля (КП), что решают задачи соединения двух или нескольких узлов источников нагрузки между собой в коммутационные сети. Формы КП могут различаться, обеспечивая материальные, энергетические, информационные, механические, электрические, транспортные и иные соединения частей целого. Например, шестеренчатая коробка передач, соединяющая двигатель с другими механизмами машины, или квартира из нескольких

смежных соединенных дверьми (коммутационными элементами – КЭ) комнат и вспомогательных помещений с различающимися хозяйственно-бытовыми функциями (режимами работы) с отдельным наружным входом-выходом. При смене местоположения (слоя) изменяется режим функционирования находящихся в их среде объектов. КЭ обеспечивает контакт слоев путем их замыкания-размыкания, изменения проводимости КП по соответствующему регламенту (типу трансформации режима, протоколу обмена). Каналы передачи информации (стыки, сигналы обмена, интерфейсы) устанавливаются между двумя элементами (точками) КП, в частности, абонентами (пользователями, клиентами), терминалами, портами, компьютерами, сервисами, программами, БД. Связи (коммутации) определяются в соответствии с проектной конструкцией системы или по заявке (вызову, запросу) в динамическом режиме под управлением терминального модуля (многообразия связи).

Примеры многообразий КП информационного обмена: интегральные микросхемы, многопроцессорные системы, телефонные абонентские сети, однородные вычислительные системы, распределенные базы данных. В них есть общая информационная среда интеграции (многообразие сети) и связанные с ней универсальные узлы и ячейки (слои) обеспечения коммутации, сбора, хранения и распределенной обработки информации. Первичное появление нескольких однородных узлов подразумевает в перспективе конструирование огибающего многообразия их разветвленной сети. Информация выходит из многообразия связи в конкретный слой, где реализуются соответствующие операции, результаты которых передаются в другие слои, работающие автономно (независимо). Иллюстрацией является развитие распределенных и параллельных СУБД системы, где данные распределены между компьютерами сети или узлами многопроцессорной структуры, и расширение БД обеспечивается добавлением в сеть дополнительных машин. Так, CALS-технологии служат средством интеграции промышленных автоматизированных систем в единую многофункциональную, комплексную систему с созданием общего информационного пространства для всех участников проектирования и производства [24].

Распределённая БД – это единая БД, связанные части которой размещаются в различных узлах компьютерной сети КП, например, опубликованы в Интернете. Доступ к ней обеспечивается высокоуровневым интерфейсом. БД имеет разный уровень реплицированности – от полного отсутствия дублирования, до полного дублирования всей информации во всех распределённых копиях. Многообразие геоинформационной среды формируется средствами ГИМ из различных источников местного, регионального и глобального уровней. Узлы КП представлены персональными БД в Интернете на различных носителях и в разных формах для решения специальных задач (см. рис. 3). Персональные терминалы пользователей объединены многообразием КП через территориальные серверы. Специальной операцией ГИМ является извлечение информации из геоинформационной сети, ее централизация под ГИС-проект. Распределение, включая послойную фрагментацию и репликацию, независимых данных по множеству узлов сети незаметно для пользователей (прозрачно). Прозрачность доступа означает, что пользователи имеют дело с единым (изоморфным) логическим образом базы данных и осуществляют доступ к распределенным данным в режиме ГИМ так, как если бы они хранились централизованно на одном устройстве (геопортале).

5. ГИМ пандемического процесса. В глобальном масштабе местами ГИМ централизованного сбора и хранения информации о COVID-19 являются интернет-сайты, наиболее известные из которых – веб-сайты ВОЗ [25], Университета Джонса Хопкинса [12] и Worldmeters.info [26], где в режиме реального времени непрерывно идет процесс формирования баз данных по странам. Источником первичной информации являются тысячи официальных ресурсов о текущей ситуации по коронавирусу: правительств, министерств здравоохранения, региональных организаций, которые сопоставляются и верифицируются. Таким

образом, качество и количество информации статистических наблюдений за случаями заражения, выздоровления, летальности и т.д. зависит от множества условий и факторов, характеризующих ситуацию в каждой стране, в частности, от принятых здесь стандартов отчетности. Например, в одних странах количество заразившихся представлено числом только лабораторно выявленных случаев, а в других, – с учетом клинической картины заболеваний. Отмечается, что разрыв между фактической заболеваемостью и зарегистрированными случаями зависит от количества выполненных тестов на коронавирус и прозрачности отчетности страны [26]. Существуют экспертные оценки [26], показывающие, что количество невыявленных случаев кратно количеству выявленных, поэтому для статистического сравнения лучше пользоваться относительными показателями.

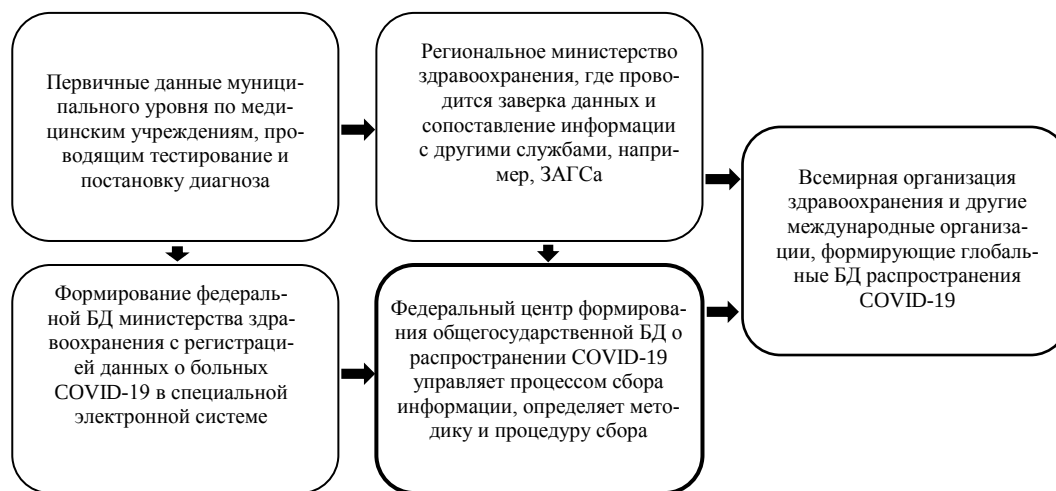


Рис. 4. Схема ГИМ формирования базы данных по распространению новой коронавирусной инфекции.

В России сбор информации о распространении новой коронавирусной инфекции осуществляется через Министерство здравоохранения. Официальная статистическая информация по стране и отдельным регионам о количестве регистрируемых случаев заболевания, выздоровевших и умерших людей ежедневно публикуется на сайте Коммуникационного центра Правительства Российской Федерации [27]. Региональные министерства здравоохранения формируют ежедневную статистику по муниципалитетам и региону в целом, а затем данные передают в федеральную БД. В федеральной и региональных БД есть некоторые различия в данных. Во-первых, ряд регионов опаздывают с подачей сведений, когда информация входит в федеральную БД только на следующий день. Во-вторых, нередко расходятся числа регистрируемых случаев: чаще расхождения отмечаются по выздоровевшим и умершим пациентам. При выборочном анализе имеющейся статистики по 13-ти регионам такие расхождения фиксировались в 39 % случаев. Тема сбоя и несоответствий в сборе статистических данных по коронавирусу неоднократно поднималась в российских СМИ.

На региональном уровне статистическая информация поступает ежедневно от органов управления муниципалитетами, куда данные передаются из медицинских учреждений (рис.4). Поскольку ВОЗ даёт только рекомендации по мониторингу распространения коронавируса, на государственном уровне системы сбора и обработки данных могут варьироваться, поэтому прямое без предварительной обработки межстрановое сопоставление исходных данных затруднительно. Для формирования международных БД могут также использоваться региональные данные, если создание национальной БД идет с опозданием или дает ограниченную информацию. При проведении ГИМ для исследования закономерностей распространения новой коронавирусной инфекции в границах разных стран желательно привлекать БД

государств, применяющих при формировании статистики сходные методики учета заболевших, выздоровевших и умерших в результате заражения COVID-19.

6. Математическое обеспечение моделирования. Руководствуясь положениями метатеоретического анализа, ставится задача найти адекватную модель развития эпидемии коронавируса COVID-19 по разным странам, т.е. провести структурную и параметрическую верификацию разных моделей и выбрать лучшую из них. Обычно здесь для моделирования используются классическая и обобщенная эпидемиологические модели SIR У. Кермака и А.МакКендрика 1927 г. [8, 9]. Она описывает перераспределение числа восприимчивых (S), инфицированных (I), умерших (D) и по-разному удаленных (R) из эпидемического процесса частей населения, например, количество выздоровевших пациентов. Рост числа вновь заболевших (инфицированных) описывается дифференциальным уравнением логистической модели

$$\frac{dS}{dt} = -AIS, \quad \frac{dI}{dt} = AIS = AI(S_0 - I), \quad (2)$$

где S_0 и $S(t)$ – исходное, базовое в группах риска и текущее количество не переболевшего населения, восприимчивого к инфекции (тыс. чел.); $I(t)=S_0-S(t)$ – число обнаруженных, подтвержденных случаев заболевания людей-источников инфекции с начала процесса $t=t_0$; A – положительная константа (частота контактов в расчете на тыс. чел. в день). Эти коэффициенты – управляемые величины, зависящие от поведения людей и эффективности национального здравоохранения. К сожалению, логистическая кривая функции решения уравнения (2) плохо соответствует статистическим графикам развития пандемии нового коронавируса по странам, и необходимо искать новые проектные решения.

Одним из перспективных направлений моделирования является оценка опасности и риска [28; 29], что формализуется в терминах теории вероятности и надежности [30, 31]. Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, обеспечивающих выполнение определенных функции в данных условиях [32, 33]. Надёжность связывается с отсутствием отказов (утрат, потерь, жертв, аварий) в работе (деятельности) – свойством объекта сохранять его работоспособность (жизнедеятельность) во времени или в процессе наработки по принятому параметру (возрасту, расстоянию, числу применений). Отказ в эпидемическом процессе связан со случаями инфицирования, потерей здоровья или смертью человека. Надежность характеризует ситуацию в относительных показателях без учета числа объектов в системе, в их ожидаемом осредненном поведении.

Развитие эпидемии отражается в показателях надежности, например, убывающей функцией надежности $P^*(t)$ – вероятности безотказной работы организма, сохранения здоровья к моменту t (для COVID-19 в днях с начала пандемии, 31 декабря 2019 г.). Функция кумулятивной вероятности накопления отказов (ненадежности) равна $F^*(t)=1-P^*(t)$, так что в эпидемиологической модели (2): $S(t)=S_0P^*(t)$, $I(t)=S_0F^*(t)$. На основе функции надежности $P^*(t)$ рассчитываются другие показатели:

$$\begin{aligned} P(t) &= -\frac{dP^*(t)}{dt}, \\ E(t) &= -\ln P^*(t), \quad E^*(t) = -\ln F^*(t), \\ p(t) &= \frac{dE}{dt} = \frac{P(t)}{P^*(t)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P(t)$ – функция плотности вероятности (распределения) отказов, в частности, доля количества подтвержденных случаев инфицирования за единицу времени (сутки); $E(t)$ – интегри-

рованная опасность, вероятность того, что процесс будет продолжаться до момента t ; $p(t)$ – интенсивность отказов, дифференцированная опасность, или риск, равный доле заболевших за единицу времени в численности чувствительного населения $S(t)$ (заболеваемость).

Для описания эпидемического процесса $F^*(t)$ используется дважды экспоненциальная функция распределения Гомпертца – Гумбеля [30, 31], которая является частным случаем распределения Фишера–Типпета–Гнеденко экстремальных событий [34]. Выделяются три типа распределений экстремальных – наибольших или наименьших – значений в большой выборке: функции вероятности Гумбеля, Фреше и Вейбула. Эти и другие функции составляют основу математического обеспечения аппроксимации статистической зависимости доли инфицированного $F^*(t)$ и неинфицированного $P^*(t)$ чувствительного населения территории от времени t наступления событий (момента обнаружения заболеваний). Из числа этих функций обоснованно по заданным критериям выбирается оптимальный закон распределения для отображения статистических графиков. Проектирование ориентировано на поиск естественного закона истинного распределения, согласующегося по статистическим критериям с имеющимися данными для отдельной страны не только для кумулятивной кривой инфицирования $F^*(t)$, но, что важнее, с показателями плотности распределения $P(t)$, интенсивности $p(t)$ и интегрированной опасности $E(t)$ заражения (отказа).

Для наибольших и наименьших значений функция распределения закона Гумбеля соответственно имеет вид:

$$F^*(z) = \exp[-\exp(-z)], \quad (4)$$

$$F^*(z) = 1 - \exp[-\exp(z)], \quad P^*(z) = \exp[-\exp(z)], \quad (5)$$

где $z = \alpha x + \beta = \alpha(x - x_0) \sim \alpha(t - t_m)$, x_0 , t_m – коэффициенты локальности (локализации) и $\lambda = 1/\alpha$ – масштаба (размерности). В данном случае переход от (4) к (5) связан с заменой независимой переменной $z \rightarrow -z$, или $x \leftrightarrow x_0$. Функции плотности распределения для вариантов (4) и (5) имеют вид (рис. 5):

$$P(z) = \exp(-z) \exp[-\exp(-z)], \quad P(z) = \exp(z) \exp[-\exp(z)]. \quad (6)$$

В обоих случаях максимум P_m функции $P(z)$ наблюдается при $z=0$ и равен $P_m = 1/e$. При $z = \alpha(x - x_0)$ максимум $P_m(x, x_0) = \alpha \exp(-1)$ имеет место при $x = x_0$, что позволяет наглядно по положению экстремума (x_0 , P_m) статистического графика $P(x, x_0)$ приближенно определять коэффициент $\alpha = e P_m$. Аналогично для $z = \alpha(t - t_m)$ находится $\alpha = e P_m = e P(t_m)$.

Распределения Фреше $F^*(z) = \exp(-z^{-\alpha})$, $z > 0$, $\alpha > 0$ и Вейбула $F^*(z) = \exp(-(-z)^{-\alpha})$, $z \leq 0$ или $z > 0$, $\alpha > 0$ при замене переменных $z^{-\alpha} = \pm \exp[-\alpha(\tau - t_m)]$ приводятся к уравнениям вида (4)–(5) в новых переменных собственного времени $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$ ($1/\theta$ – константа растяжения графиков):

$$F^*(z) = \exp(-z^{-\alpha}) = \exp\{-\exp[-\alpha(\tau - t_m)]\}. \quad (7)$$

Значение коэффициента α находится аналогично по положению $\tau = t_m = \theta \ln(t_m/t_m) + t_m = t_m$, $z = \pm 1$ максимума P_m функции плотности распределения $\alpha = e P_m$, $\tau(t_m) = t_m$.

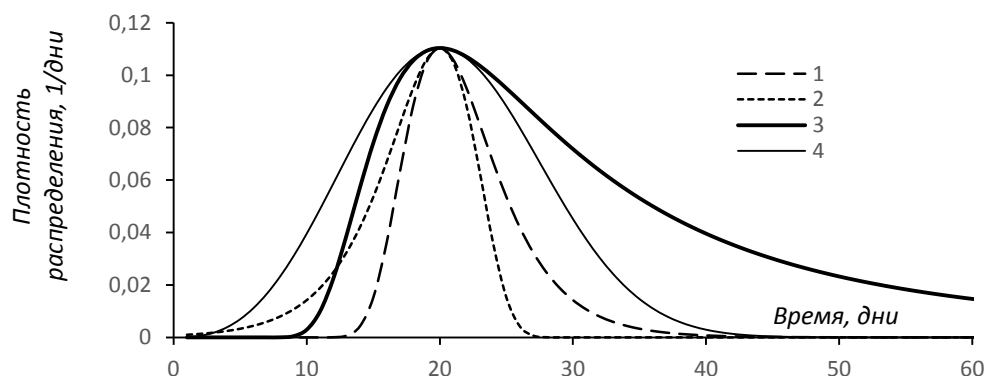


Рис. 5. Разные виды кривых плотности распределения соответственно максимальных и минимальных значений по: 1-2 – функциям Гумбеля, 3-4 – функциям Фреше с одинаковыми параметрами $\alpha=0,3/\text{день}$, $\tau_m=20$ дней, $\theta=9$ дней.

Уравнения вероятности $F^*(z)$ появления экстремальных значений z разных типов имеют общий вид (7) для максимальных и минимальных величин $\tau=t$ и $\tau=\theta \ln(t/t_m)+t_m$, что обеспечивается заменой $-z \leftrightarrow z$ в функциях распределения. Это удвоение дает для работы дополнительное семейство распределений $P^*(z)$ с $\alpha < 0$ (см. формулы (4) и (5)). Для (7) интегрированная опасность $E^*(\tau) = -\ln F^*(z) = \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$ и риск (интенсивность отказа) $p(\tau) = -E^*(\tau)/d\tau = \alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$, где $p(\tau_m) = p_m = \alpha$ – приемлемый риск. Величина $K(\tau) = \ln[-E^*(\tau)] = -\alpha(\tau - \tau_m)$ линейно зависит от τ , что раньше использовалось для построения статистического графика зависимости $F^*(z)$ от τ на специальной вероятностной бумаге для определения типа частотного распределения данных. Зависимость $K(\tau) = -\alpha(\tau - \tau_m)$ является функциональным аналогом универсального уравнения (1) при $f(y) = K(\tau)$, $y = \tau - \tau_m$, т.е. значение $\tau = \tau_m$ соответствует точке касания линией $K(\tau)$ огибающего многообразия $F(\tau)$. Касательная $K(\tau, \tau_m)$ к $F(\tau)$ в новой точке $\tau = \tau_m$ – это слой, в котором формируется распределение $F^*(z) = \exp\{-\exp[K(\tau, \tau_m)]\}$ с индивидуальными параметрами (τ_m, α) . При изменении τ_m конструируется путь (трассировка) на $F(\tau)$, вдоль которого меняются $K(\tau, \tau_m)$ и происходит переход от одной функции $F^*(z)$ к другой.

Величина $p_m = dK(\tau, \tau_m)/d\tau = \alpha$ – приемлемый риск $p(\tau_m)$, поэтому $K(\tau, \tau_m)$ имеет смысл интегрированной опасности по постоянному значению $p(\tau_m)$. Константа α – чувствительность изменения $K(\tau, \tau_m)$ при изменении τ , что определяет значение и направление вектора α индивидуально в каждом слое $K(\tau, \tau_m)$ (см. рис.3). Содержательно $p_m = \alpha = eP_m = eV_m/S_0$ определяется величиной экстремума (пики) функции плотности распределения, увеличивается с ростом максимума текущего прироста заболеваемости V_m и снижается с увеличением потенциала заражения S_0 , меняющегося по странам и континентам. Величины (τ_m, α) варьируют от места к месту, сохраняя общий (истинный) вид функциональной зависимости $P(\tau, \tau_m)$ с параметрами (τ_m, α) .

Появление уравнений вида (7) связано с описанием механизма саморегулирования распространения инфекции в показателях интегрированной опасности:

$$dE^*(\tau)/d\tau = -\alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)] = -\alpha E^*(\tau), \quad p(\tau) = \alpha E^*(\tau), \quad (8)$$

т.е. величины дифференциальной $p(\tau)$ и интегрированной $E^*(\tau)$ опасности пропорциональны с коэффициентом приемлемого риска $p_m = \alpha$. Устойчивое уменьшение $E^*(\tau)$ с ходом времени τ регулируется текущей опасностью инфицирования $E^*(\tau)$. Уравнение (8) связано с логистическим уравнением (2)

$$dE^*(\tau)/d\tau = -\alpha E^*(\tau), \quad d\ln F^*(\tau)/d\tau = -\alpha \ln F^*(\tau), \quad dF^*(\tau)/d\tau = \alpha F^*(\tau) P^*(\tau) \quad (9)$$

при $E^*(\tau) = -\ln F^*(\tau) \approx 1 - F^*(\tau) = P^*(\tau)$ и $F^*(\tau) = I(\tau)/S_0$, $P^*(\tau) = S(\tau)/S_0$; $A = \alpha/S_0 = eV_m/S_0^2$ – частота контактов. Кроме того, выражение (8) является вариантом универсального уравнения (1), представленного в виде

$$f(y) \leftrightarrow p(\tau) - p_m = \alpha[E^*(\tau) - E^*(\tau_m)]. \quad (10)$$

Статистические графики суточного прироста числа установленных случаев инфицирования коронавирусом COVID-19 вначале быстро растут, выходят на плато и затем медленно снижаются (см. рис. 2). Из кривых рассмотренных функций (рис. 4) этим особенностям качественно удовлетворяют функции распределений Гумбеля и Фреше (7) максимальных величин. Последняя удобна тем, что путем варьирования θ при расчете переменных собственного времени $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$ удастся увеличивать размеры плато кривой процесса развития эпидемии. При сравнении статистических и теоретических кривых (см. рис. 2 и 3) предпочтение отдается функции Фреше как более общей и адекватной по критериям сходства, а также по причине того, что в окрестности пика эпидемии $t = t_m$ величина $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m \approx \theta[t/t_m - 1] + t_m = \theta(t - t_m)/t_m + t_m = (\theta/t_m)(t - t_m) + t_m$ линейно зависит от времени и при $\theta = t_m$ полностью совпадает с ходом времени $\tau = t$, а функция Фреше с распределением Гумбеля. Отношение $\eta = \theta/t_m$ указывает на степень соответствия рассматриваемой ситуации этому идеальному случаю.

В электронных таблицах MS Excel по алгоритму описания статистического графика суточного прироста числа инфицированного COVID-19 населения в России 2020 г. выделяется момент начала $t_0 = 67$ день 2020 г., когда $S(t_0) \geq 10$ установленных случаев заражения, и конца $t_k = 240$ день первой (весенней) волны эпидемии (локальный минимум на графике $S(t)$). Величина $S(t_k) = S_0 = 975576$ чел. считается потенциалом заражения. Рассчитывается показатель ненадежности – вероятность потери здоровья чувствительным населением S_0 : $F^*(t) = S(t)/S_0$. Вычисляется плотность распределения моментов заражения – доля суточного прироста заболевших $P(t) = F^*(t+1) - F^*(t)$ и другие показатели надежности (2): интегрированная опасность $E^*(t) = -\ln F^*(t)$, риск $p(t) = E^*(t+1) - E^*(t)$. По графику $P(t)$ приблизительно определяется мода распределения – момент пика эпидемии $t_m = 149$ дней и максимальное значение $P_m = P(t_m) = 0,0097/\text{день}$ и приемлемый риск $\alpha = eP_m = 0,0264/\text{день}$. Рассчитывается ход собственного времени $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$ при $\theta = t_m$. По формуле (7) вычисляются аппроксимирующие кривые распределений $P(t)$ и $P(\tau)$ по времени t и τ с варьированием параметров t_m , P_m и θ для обеспечения сходства по коэффициенту корреляции R . Функция Фреше распределения предельных значений при $\eta = \theta/t_m = 130/149 = 0,87$ дает лучшее приближение ($R = 0,95$) данных, чем функция Гумбеля ($R = 0,89$).

При проектировании, геоинформационном обеспечении методами ГИМ и создании карт перечисленных базовых параметров формируется таблица коэффициентов уравнения Фреше распределения установленных случаев заболевания (табл. 1). Для ее заполнения данные по росту числа заболевших и приблизительные параметры плотности распределения по странам подставляются в таблицу MS Excel и автоматически рассчитываются коэффициенты модели и кривые аппроксимации. Значения $\alpha = eP_m$ одинаковы по разным странам Европы. Это означает, что пандемия по странам относится к одному типу явлений, и существует линия $P(t_m) = P_m = 0,0947/\text{день}$, огибающая сверху территориальные функции $P(t)$. Кривые функций $P(t)$ различаются сроками t_m наступления пика $P(t) = P(t_m) = P_m$ эпидемии. Заболеваемость по странам (слоям, прецедентам) формирует своеобразное КП распространения инфекции со сдвижкой по времени. Увеличение значения θ относительных темпов хода собственного времени τ приводит к сокращению длительности эпидемического периода $\Delta t_0 = t_0 - t_k$ в стране, что также индивидуализирует процесс, а с другой стороны, приводит зависимости $P(t)$ к одной типовой модели с постоянными коэффициентами.

Таблица 1. Сравнение параметров функции плотности распределения Фреше для статистических графиков числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID- 9 1 за сутки по европейским странам (первая волна пандемии 2020 г.)

Страна	Значения параметров функции								
	S_0	t_0	t_m	t_k	P_m	α	θ	R	η
Россия	975,576	67	149	240	0,0097	0,026	130	0,96	0,87
Великобритания	285,279	39	101	183	0,0095	0,026	198	0,97	1,96
Италия	243,230	52	84	195	0,0095	0,026	226	0,98	2,69
Германия	187,226	55	89	164	0,0095	0,026	431	0,94	4,84
Беларусь	69,516	64	130	229	0,0095	0,026	200	0,97	1,54
Бельгия	62,058	63	97	188	0,0095	0,026	270	0,91	2,78
Нидерланды	50,834	62	100	187	0,0095	0,026	220	0,86	2,20
Польша	35,950	68	127	187	0,0095	0,026	61	0,79	0,48
Швеция	33,188	59	114	144	0,0095	0,026	106	0,84	0,93
Швейцария	30,871	59	85	153	0,0095	0,026	348	0,94	4,09
Украина	20,986	77	119	144	0,0095	0,026	205	0,94	1,72
Румыния	19,398	67	103	153	0,0095	0,026	200	0,86	1,94
Молдова	19,382	74	173	194	0,0095	0,026	261	0,75	1,51
Австрия	16,731	61	85	152	0,0095	0,026	530	0,95	6,24
Дания	13,032	63	94	185	0,0095	0,026	350	0,86	3,72
Сербия	11,412	71	105	152	0,0095	0,026	370	0,90	3,52
Чехия	9,196	65	88	150	0,0095	0,026	386	0,86	4,39
Норвегия	8,977	60	84	193	0,0095	0,026	270	0,88	3,21
Финляндия	7,294	65	99	194	0,0095	0,026	159	0,80	1,61
Венгрия	4,086	71	105	172	0,0095	0,026	275	0,77	2,62
Люксембург	4,019	72	83	153	0,0095	0,026	470	0,88	5,66
Хорватия	2,252	64	88	166	0,0095	0,026	329	0,92	3,74
Эстония	2,034	66	89	208	0,0095	0,026	270	0,73	3,03
Литва	1,803	75	90	175	0,0095	0,026	360	0,67	4,00
Словакия	1,528	71	97	159	0,0095	0,026	107	0,58	1,10
Словения	1,486	68	86	161	0,0095	0,026	210	0,83	2,44
Латвия	1,122	71	87	185	0,0095	0,026	310	0,77	3,56

Закключение. Проведенное исследование позволяет на частных примерах продемонстрировать информационно-математическую технологию сбора и обработки геоинформации и метатеоретические свойства строения пространственно-распределенных коммутационных полей. Математическая модель всякой распределенной системы является многообразием, т.е. локально линейной и по частям представимой формой расслоенного пространства, где каждый слой касается многообразия в одной точке – портале, через который происходит обмен информацией и организации геоинформационного мониторинга (ГИМ) для централизации данных под конкретную задачу исследования и проектирования. Возможны разные формы представления расслоения в дискретном (структурном) и непрерывном (аналитическом) виде, что создает основу математического обеспечения САРП и реализации информационно-математических технологий проектирования и создания пространственно-графических форм и тематических карт разного содержания, отражающих базовые параметрические свойства систем. Технология ГИМ должна допускать возможность постоянного наращивания объема хранящейся и обрабатываемой информации и ее дублирования по прецедентам использования под разнообразные задачи моделирования, проектирования и прогнозирования.

На основе ГИМ-порталов создается множество геоинформационных объектов (ГИО) – инвариантной основы ГИС-картографирования. По этапам расслоения и преобразования информации ГИО (геоинформационный образ) – это сам пространственный объект изучения

и проектирования, его геоинформационный образ в коммутационном поле, распределенная и сосредоточенная базы данных ГИС, результаты преобразования и отображения информации БД, итоговый графический и картографический продукт интегрального содержания, формы его прикладного использования по направлениям. Здесь основная задача – добиться соответствия разных ГИО на всех этапах трансформации данных и обеспечить многовекторное использование накопленной БД под решение конкретных задач с применением различных системно-теоретических интерпретаций (моделей).

Информационная технология выявления закономерностей развития пандемии нового коронавируса состоит из ГИМ сбора (централизации, сосредоточения) пространственной информации и системного анализа статистических графиков изменения эпидемических показателей с целью выбора адекватной модели процесса по критериям сходства с исходными данными и метатеоретическими процедурами расслоения. Процессы и графики интерпретируются в терминах теории надежности с описанием кривых функциями вероятности распределения экстремальных событий, из которых по качественным и количественным показателям сходства оптимальной является функция Фреше распределения максимальных значений. Подготовлена таблица коэффициентов этой модели первой (весенней) волны развития пандемического процесса 2020 г. по странам с выявлением национальной специфики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. Математическое моделирование и информационные технологии в Сибирском отделении РАН. Традиции и современность // Вычислительные технологии. 2007. № 3(12). С. 8-23.
2. Яненко Н.Н. Проблемы вычислительной механики // Очерки, статьи, воспоминания. Новосибирск: Наука. 1988. С.72-102.
3. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019а. № 2(14). С. 69-87.
4. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019б. № 1(13). С. 61-84.
5. Черкашин А.К. Геокартографическое мышление в современной науке // Геодезия и картография. 2020б. №7. С. 27-36.
6. Малюх В.Н. Введение в современные САПР. М.: ДМК Пресс. 2010. 192 с.
7. Полозов В.С., Будеков О.А., Ротков С.И., Широкова Л.В. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М.: Машиностроение. 1983. 280 с.
8. Бейли Н. Математика в биологии и медицине. М.: Мир, 1970. 326 с.
9. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – part III. Further studies of the problem of endemism // Bulletin of Mathematical Biology. 1927. №3 (1-2). Pp. 89-118.
10. Черкашин А.К., Лесных С.И., Складанова И.П. Координационное управление природоохранной деятельностью региона: концептуальная модель // Теоретическая и прикладная экономика. 2019. № 3. С.81–97.
11. Полякова В.В., Шаброва Н.В. Основы теории статистики. 2-е изд. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2015. 148 с.
12. COVID-19 Dashboard by Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University. Режим доступа: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (дата обращения 15.11.2020)

13. Карта распространения коронавируса в России и мире. Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/covid19> (дата обращения 29.05.2020).
14. Онлайн карта распространения коронавируса. Режим доступа: <https://coronavirus-monitor.ru/> (дата обращения 29.05.2020).
15. Ситуация с заболеваемостью коронавирусом в РБ: официальный геоportal Республики Бурятия. Режим доступа: <http://geo.govrb.ru/covid.html> (дата обращения 29.05.2020).
16. Эпидемиологическая обстановка в Иркутской области: официальный портал. Режим доступа: <https://irkobl.ru/coronavirus/> (дата обращения 29.05.2020).
17. Как выздоровела Южная Корея // Газета Коммерсант. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4314331> (дата обращения 29.05.2020).
18. Минкомсвязь оповестила регионы о создании системы отслеживания больных коронавирусом и их контактов по геолокации. Режим доступа: <https://d-russia.ru/minkomsvjaz-opovestila-regiony-o-sozdanii-sistemy-otslezhivaniya-bolnyh-koronavirusom-i-ih-kontaktov-pogeolokacii.html> (дата обращения 29.05.2020).
19. Ананьев Ю.С. Геоинформационные системы. Томск: Изд-во ТПУ. 2003. 70 с.
20. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР. М.: Высшая школа. 1990. 335 с.
21. Информационное обеспечение систем автоматического проектирования. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4296928/page:4/> (дата обращения 28.08.2020).
22. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. 1971. 240 с.
23. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Методика создания оценочных карт опасности кризисных ситуаций на основе картографической информации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 75-88.
24. Шалумов А.С., Никишкин С.И., Носков В.Н. Введение в CALS-технологии. Ковров: КГТА. 2002. 137 с.
25. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Режим доступа: <https://covid19.who.int/> (дата обращения 15.11.2020).
26. Worldmeter. International statistic website. Режим доступа: <https://worldmeters.info> (дата обращения 15.11.2020).
27. Официальная информация о коронавирусе в России. Режим доступа: <http://стопкоронавирус.рф> (дата обращения 15.11.2020).
28. Черкашин А. К. Оценка качества жизни на основе решения обратной задачи моделирования динамики численности населения // Народонаселение. № 1. 2014. С. 54–67.
29. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Моделирование оценки риска хозяйственной деятельности в районах нового нефтегазового освоения // Проблемы анализа риска. 2015. № 6. С. 21-29.
30. Черкашин А.К. Иерархическое моделирование эпидемической опасности распространения нового коронавируса COVID-19 // Проблемы анализа риска. 2020а. №4(17). С. 10-21.
31. Черкашин А. К. Национальные особенности изменения опасности развития пандемии коронавируса COVID-19: математическое моделирование и статистический анализ // Народонаселение. 2020в. № 3(23). С. 83-95.
32. Северцев Н.А., Дедков В.К. Методологические вопросы надежности и безопасности // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2007. № 3(6). С. 123-128.
33. Nøylund A., Rausand M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.. 2004. 518 p.
34. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир. 1965. 451 с.

UDK 910.1:51-7

GEOINFORMATION MONITORING AND MATHEMATICAL MODELING OF THE COVID-19 PANDEMIC DEVELOPMENT

Aleksander K. Cherkashin

Dr., Professor,

Head of the Laboratory "Theoretical geography", e-mail: cherk@mail.icc.ru

Svetlana I. Lesnykh

Dr., senior scientific researcher, e-mail: llsvetll@mail.ru

Natalia E. Krasnoshtanova

Dr., scientific researcher, e-mail: kne1988@rambler.ru

V.B. Sochava Institute of Geography

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

664033, Irkutsk, Russia, Ulan-Batorskaya st. 1.

Abstract. Information and mathematical technology for collecting and primary processing of spatial data is organized in the form of geoinformation monitoring (GIM) according to metatheoretical principles of the structure of spatially distributed commutation fields – stratified (bundle) functionally connected spaces of constructive activity. This corresponds to the rules of information and mathematical support of CAD for creating spatial-graphic forms and thematic maps with different content. A layer of information interactions between different projects and users is formed around database of different distributed GIS. Individual database correspond to portals as nodes of communication of the user's GIS with the global information diversity. The GIM technology is implemented on the example of the operational formation of a special GIS database and the construction of statistical graphs of the development of the novel coronavirus (COVID-19) pandemic at the national level. Processes and graphs are modeled in terms of reliability theory with the description of curves by probability density functions of the distribution of extreme events, of which the Frechet function of the time moments distribution for coronavirus disease detected cases in the population is optimal. The use of relative reliability indicators minimizes the impact of data errors, and their cross-country analysis indicates the presence of constant coefficients of the equations, which makes it possible to apply the epidemiological model in further studies of statistical data.

Key words: geoinformation monitoring, novel coronavirus pandemic, COVID-19, mathematical modeling, national characteristics

REFERENCES

1. Shokin YU.I., Chubarov L.B. Matematicheskoe modelirovanie i informacionnye tekhnologii v Sibirskom otdelenii RAN. Tradicii i sovremennost' [Mathematical modeling and information technology in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Tradition and modernity] // Vychislitel'nye tekhnologii = Computing technology. 2007. № 3(12). Pp. 8-23. (in Russian).
2. Yanenko N.N. Problemy vychislitel'noj mekhaniki [Problems of computational mechanics] // Ocherki, stat'i, vospominaniya = Essays, articles, memoirs. Novosibirsk. Nauka = Science. 1988. Pp.72-102. (in Russian).
3. Cherkashin A.K. Innovacionnaya matematika: poisk osnovanij i ogranichenij modelirovaniya real'nosti [Innovative Mathematics: A Search of the Bases and Limits of Modeling Reality] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019a. № 2(14). Pp. 69-87. (in Russian).
4. Cherkashin A.K. Metateoreticheskoe sistemnoe modelirovanie prirodnyh i social'nyh processov i yavlenij v neodnorodnoj srede [Metatheoretical System Modelling of Natural and Social Processes and Phenomena in Heterogenous Environment] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019b. № 1(13). Pp. 61-84. (in Russian).

5. Cherkashin A.K., Geokartograficheskoe myshlenie v sovremennoj nauke [Geocartographic thinking in modern science] // Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography. 20206. №7. Pp. 27-36. (in Russian).
6. Malyuh V.N. Vvedenie v sovremennye SAPR [Introduction to modern CAD systems]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2010.192 p. (in Russian).
7. Polozov V.S., Budekov O.A., Rotkov S.I., SHirokova L.V. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Geometricheskie i graficheskie zadachi [Computer-aided design. Geometric and graphic tasks]. Moscow. Mashinostroenie = Mechanical engineering. 1983. 280 p. (in Russian).
8. Bejli N. Matematika v biologii i medicine [Mathematics in biology and medicine]. Moscow. Mir = World. 1970. 326 p. (in Russian).
9. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – part III. Further studies of the problem of endemicity // Bulletin of Mathematical Biology. 1991. vol. 5. № 3(1-2). Pp. 89-118.
10. Cherkashin A.K., Lesnykh S.I., Sklyanova I.P. Koordinacionnoe upravlenie prirodoohrannoj dejatel'nost'ju regiona: konceptual'naja model' [Coordination management of the region's environmental activities: a conceptual model] // Teoreticheskaja i prikladnaja jekonomika = Theoretical and Applied Economics. 2019. № 3. Pp.81–97. (in Russian).
11. Polyakova V.V., SHabrova N.V. Osnovy teorii statistiki. 2-e izd. [Foundations of the theory of statistics. 2nd ed.]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta = Ural un-ty Publishing House. 2015. 148 p. (in Russian).
12. COVID-19 Dashboard by Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University. Available at: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (accessed 15.11.2020).
13. Karta rasprostraneniya koronavirusa v Rossii i mire [Map of the spread of coronavirus in Russia and the world]. Available at: <https://yandex.ru/maps/covid19> (accessed 29.05.2020). (in Russian).
14. Onlajn karta rasprostraneniya koronavirusa [Online map of the spread of coronavirus]. Available at: <https://coronavirus-monitor.ru/> (accessed 29.05.2020). (in Russian).
15. Situaciya s zaboлеваemost'yu koronavirusom v RB: oficial'nyj geoportal Respubliki Buryatiya [The situation with the incidence of coronavirus in the RB: the official geoportal of the Republic of Buryatia]. Available at: <http://geo.govrb.ru/covid.html> (accessed 29.05.2020).
16. Epidemiologicheskaya obstanovka v Irkutskoj oblasti: oficial'nyj portal [Epidemiological situation in the Irkutsk region: official portal]. Available at: <https://irkobl.ru/coronavirus/> (accessed 15.11.2020). (in Russian).
17. Kak vyzdorovela Yuzhnaya Koreya. Gazeta Kommersant [How South Korea recovered. Kommersant newspaper]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4314331> (accessed 29.05.2020) (in Russian).
18. Minkomsvyaz' opovedila regiony o sozdanii sistemy otslezhivaniya bol'nyh koronavirusom i ih kontaktov po geolokacii [The Ministry of communications notified the regions about the creation of a system for tracking coronavirus patients and their contacts by geolocation] // <https://d-russia.ru/minkomsvjaz-opovedila-regiony-o-sozdanii-sistemy-otslezhivaniya-bolnyh-koronavirusom-i-ih-kontaktov-po-geolokacii.html> (in Russian).
19. Anan'ev Yu.S. Geoinformacionnye sistemy [Geoinformation systems]. Tomsk. Izd-vo TPU= TPU Publishing House. 2003. 70 p. (in Russian).
20. Norenkov I.P., Manichev V.B. Osnovy teorii i proektirovaniya SAPR [Fundamentals of the theory and design of CAD]. Moscow. Vysshaya shkola = Higher school. 1990. 335 p. (in Russian).

21. Informacionnoe obespechenie sistem avtomaticheskogo proektirovaniya [Information support for automated design systems]. Available at: <https://studfile.net/preview/4296928/page:4> / (accessed 28.08.2020). (in Russian).
22. Arnol'd V.I. Obyknovennye differencial'nye uravneniya [Ordinary differential equations]. Moscow. Nauka = Science. 1971. 240 p. (in Russian).
23. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Metodika sozdaniya ochenochnyh kart opasnosti krizisnyh situacij na osnove kartograficheskoy informacii [Methodology for Creating Assessment Maps of the Crisis Situations Hazard on the Basis of Cartographic Information] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 4 (16). Pp. 75-88. (in Russian).
24. Shalumov A.S., Nikishkin S.I., Noskov V.N. Vvedenie v CALS-tekhnologii [Introduction to CALS technologies]. Kovrov. KGTA =KGTA. 2002. 137 p. (in Russian).
25. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Available at: <https://covid19.who.int/> (accessed 15.11.2020).
26. Worldmeter. International statistic website. Available at: <https://worldmeters.info> (accessed 15.11.2020).
27. Oficial'naya informaciya o koronavirusе v Rossii [Official information about the coronavirus in Russia]. Available at: <http://стопкоронавирус.рф> (accessed 15.11.2020). (in Russian).
28. Cherkashin A.K. Ocenka kachestva zhizni na osnove resheniya obratnoj zadachi modelirovaniya dinamiki chislennosti naseleniya [The quality of life assessment based on solving the inverse problem of modeling population dynamics] // Narodonaselenie = Population. 2014. № 1. Pp. 54–67. (in Russian).
29. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Modelirovanie ocenki riska hozyajstvennoj deyatel'nosti v rajonah novogo neftegazovogo osvoeniya [Risk assessment modeling of economic activities in areas of new oil and gas development] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2015. № 6. Pp. 21-29. (in Russian).
30. Cherkashin A.K. Ierarhicheskoe modelirovanie epidemicheskoy opasnosti rasprostraneniya novogo koronavirusa COVID-19 [Hierarchical modeling of the epidemic hazard of the spread of the new coronavirus COVID-19] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2020a. № 4 (17). Pp. 10-21. (in Russian).
31. Cherkashin A.K. Nacional'nye osobennosti izmeneniya opasnosti razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19: matematicheskoe modelirovanie i statisticheskij analiz [National characteristics of changes in the hazard of development of the COVID-19 coronavirus pandemic: mathematical modeling and statistical analysis] // Narodonaselenie = Population. 2020b. № 3(23). Pp. 83-95.
32. Severcev N.A., Dedkov V.K. Metodologicheskie voprosy nadezhnosti i bezopasnosti [Methodological issues of reliability and safety] // Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika = Bulletin of TvSU. Series: Applied Mathematics. 2007. № 3(6). Pp. 123-128. (in Russian).
33. Høyland A., Rausand M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley& Sons Inc., 2004. 518 p.
34. Gumbel' E. Statistika ekstremal'nyh znachenij [Statistics of extreme values]. Moscow. Mir = Universe. 1965. 451 p. (in Russian).

УДК 519.711.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО РАЗНОСТНОГО РЕГУЛЯТОРА

Куликов Владимир Валерьевич

аспирант, e-mail: godefired@mail.ru,

Куцый Николай Николаевич

д.т.н., профессор, институт информационных технологий и анализа данных,
e-mail: kucyinn@mail.ru,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83

Аннотация. Для повышения качества переходных процессов в автоматических системах с запаздыванием применяют ПИ-регулятор со звеном запаздывания, компенсирующим интегральный компонент стандартного ПИ-регулятора, который обозначается в технической литературе как пропорционально-интегральный разностный регулятор (ПИР-регулятор). Важной задачей, стоящей перед промышленной реализацией данного регулятора, является определение оптимальных настраиваемых параметров, доставляющих экстремальное значение принятому критерию оптимальности. Наличие запаздывания в регуляторе и объекте затрудняет применение аналитических подходов для параметрического синтеза закона регулирования, обеспечивающего переходные процессы с приемлемым качеством. Это приводит к использованию алгоритмических методов. В статье показано применение метода расширенных частотных характеристик (РЧХ) для параметрического синтеза ПИР-регулятора в одноконтурной автоматической системе регулирования (АСР) объектом с запаздыванием, критичным для применения типовых регуляторов. Метод РЧХ позволяет получить значения настраиваемых параметров ПИР-регулятора, которые в некоторых сложных случаях могут быть использованы как стартовые точки градиентной процедуры. Для оценки качества переходных процессов, полученных методом РЧХ, задействованы широко распространенные в практике автоматического регулирования коэффициент перерегулирования и интегральный квадратичный критерий.

Ключевые слова: автоматическая система, транспортное запаздывание, устойчивость, ПИ-регулятор, ПИР-регулятор, метод расширенных частотных характеристик, пропорционально-интегральный разностный регулятор, параметрический синтез

Цитирование: Куликов В. В., Куцый Н.Н. Применение метода расширенных частотных характеристик для параметрического синтеза пропорционально-интегрального разностного регулятора // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 36-42. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.003

Введение. При синтезе автоматических систем регулирования (АСР) с большим запаздыванием обращаются к так называемым модифицированным регуляторам, исходя из того, что серийный ПИ-регулятор не обеспечивает требуемого качества работы в обозначенных условиях [1-3]:

$$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} > 1, \quad (1)$$

где $T_{об} = \max[T_{об1}, \dots, T_{обn}]$ – постоянные времени объекта; $\tau_{об}$ – время запаздывания объекта.

Примером модифицированного ПИ-регулятора, работающего в автоматических системах при условии (1) является пропорционально-интегральный разностный регулятор (ПИР-регулятор) [4]. Данный регулятор является одним из вариантов регулятора с динамическим корректором [2,5-10]. Широкому внедрению различных вариантов реализации этого регулятора в практику автоматического регулирования препятствует недостаточная распро-

страненность методов настройки. Одним из подходов к решению задачи оптимизации таких регуляторов служит применение градиентного алгоритма на базе теории чувствительности [11]. Как известно, для применения градиентного алгоритма требуется выбрать стартовую точку – начальные значения настраиваемых параметров оптимизируемого регулятора. В настоящей работе предлагается для расчёта стартовой точки применять метод расширенных-частотных характеристик (РЧХ) [12]. Существенным преимуществом метода РЧХ для определения приближенных параметров автоматических регуляторов является его применимость к разнообразным непрерывным регуляторам [12-14].

1. Постановка задачи. Приведём передаточную функцию ПИР-регулятора [4]:

$$G_c(p) = q_1 + \frac{q_2}{p} \cdot (1 - q_3 \cdot e^{-q_4 \cdot p}), \quad (2)$$

где q_1, q_2, q_3, q_4 – настраиваемые параметры ПИР-регулятора; $p = j\omega - m\omega$ – комплексная переменная для расширенных частотных характеристик. Параметры q_1, q_2 рассчитываются в данной работе методом РЧХ, а q_3, q_4 принимает в процессе расчёта фиксированное значение.

В качестве критериев оценки переходного процесса АСР выбран широко распространённый в практике автоматического регулирования интегральный квадратичный критерий I и перерегулирование:

$$I = \int_0^L \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка системы; L – интервал интегрирования.

По методу РЧХ в пространстве настраиваемых параметров регулятора строится поверхность равной степени колебательности, на которой из условия минимума значения критериев определяется точка, соответствующая оптимальной настройке регулятора, при выполнении условия [11]:

$$-G_c(m, \omega) \cdot G_p(m, \omega) = 1, \quad (4)$$

где $G_c(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-фазовая характеристика регулятора; $G_p(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-фазовая характеристика объекта; ω – частота; m – степень колебательности.

Как известно из курса математического анализа, соотношение (4) двух комплексных чисел возможно в том случае, если произведение модулей векторов равно единице, а аргументы (фазы) отличаются на $2\pi n$ (примем $n=0$ без потери общности для результатов исследования) [11]:

$$\begin{cases} |G_c(m, \omega)| \cdot |G_p(m, \omega)| = 1 \\ Arg(G_c(m, \omega)) + Arg(G_p(m, \omega)) = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Здесь $|G_c(m, \omega)|$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика регулятора; $|G_p(m, \omega)|$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика объекта; $Arg(G_c(m, \omega))$ – расширенная фазо-частотная характеристика регулятора; $Arg(G_p(m, \omega))$ – расширенная фазо-частотная характеристика объекта.

Результатом решения системы уравнений (5) является кривая настройки параметров q_1, q_2 регулятора $G_c(m, \omega)$ [11] на плоскости. При движении по данной кривой, путём соответствующего изменения настройки регулятора, переходный процесс качественно изменяется.

2. Применение метода РЧХ. Решим систему уравнений (5) с учётом (2), относительно $q_1(\omega)$ и $q_2(\omega)$.

Представим выражение для расчёта $q_1(\omega)$:

$$q_1(\omega) = \sqrt{\frac{|A_2(\omega)|}{|A_1(\omega)|}}, \quad (6)$$

где $A_1(\omega) = C_1^2(\omega) - C_2^2(\omega) + 4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)$, $A_2(\omega) = \frac{4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)}{|G_p(m, \omega)|^2}$; $|A_1(\omega)|, |A_2(\omega)|$ - абсолютное значение.

Параметр $q_2(\omega)$ определяется следующим образом:

$$q_2(\omega) = \sqrt{\frac{|B_2(\omega)|}{|B_1(\omega)|}}, \quad (7)$$

$$\text{где } B_1(\omega) = (2 \cdot C_3(\omega) + \frac{1}{D_1(\omega)} \cdot C_2(\omega))^2 - (\frac{1}{D_1(\omega)} \cdot C_2(\omega))^2 + \frac{8 \cdot C_3(\omega)}{D_1^2(\omega)} \cdot C_4^2(\omega),$$

$$B_2(\omega) = \frac{-4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)}{|G_p(m, \omega)|^2},$$

$$C_1(\omega) = 2 \cdot D_1(\omega) \cdot C_3(\omega) + C_2(\omega), \quad C_2(\omega) = -2 \cdot C_4(\omega) \cdot C_5(\omega),$$

$$C_3(\omega) = C_5^2(\omega) + C_6^2(\omega) \quad C_4(\omega) = \omega \cdot (1 + m^2),$$

$$C_5(\omega) = m + q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) + m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4),$$

$$C_6(\omega) = 1 - q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4) + m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4),$$

$$C_7(\omega) = m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4) - q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4)$$

$$D_1(\omega) = \frac{\arctg(\arg(G_p(m, \omega))) \cdot C_4(\omega)}{\arctg(\arg(G_p(m, \omega))) \cdot (q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) - m + C_7(\omega) + C_8(\omega))},$$

$$C_8(\omega) = m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) + 1, \quad |B_1(\omega)|, |B_2(\omega)| - \text{абсолютное значение.}$$

Полученные в данной работе выражения (6), (7) наглядно демонстрируют, что применение метода РЧХ усложняется, когда в регуляторе используется звено запаздывания, по сравнению с хорошо известным в литературе расчётом методом РЧХ настраиваемых параметров типовых ПИ-, ПИД-регуляторов [11]. Стоит отметить, что различные регуляторы, ориентированные на работу в автоматических системах с запаздыванием, содержат такое звено [1,2,4,5].

3. Численный пример. Далее приводится параметрический синтез ПИР-регулятора при математической модели объекта, которая может описывать процессы в автоматической системе регулирования температурой двигателя локомотива [15]:

$$G_p(p) = \frac{k_{об}}{(T_{об1}p + 1)(T_{об2}p + 1)} e^{-\tau_{об}}. \quad (8)$$

Здесь $k_{об}$ – статический коэффициент усиления; $T_{об1}$, $T_{об2}$ – постоянные времени объекта регулирования; $\tau_{об}$ – время запаздывания.

В данной работе приняты следующие параметры объекта (21):

$$T_{o61}=10.0; T_{o62}=40.0; \tau_{o6}=50.0; k_{o6}=1.0. \quad (9)$$

Для объекта (8) рассчитывается ниже графическим способом диапазон значений ω , используемый при построении линии заданной степени колебательности $m=0.221$:

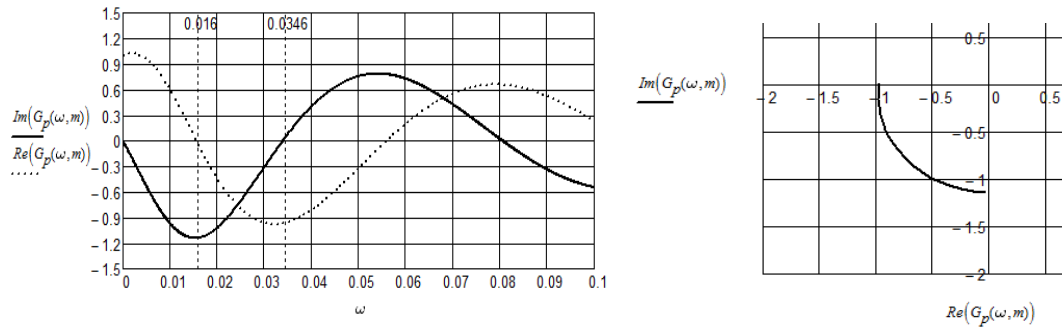


Рис. 1. Поиск диапазона значений ω

Рассмотрим выбор начального значения параметров q_3, q_4 .

В работе [4] рекомендуется выбирать q_3 в диапазоне (0..1), а $q_4 \approx T_{o61} + T_{o62} + \tau_{o6}$.

Учитывая результаты предварительных исследований, значение q_3 в данной работе предлагается брать как 0.1, а для объекта (8) при параметрах (9) $q_4=100$.

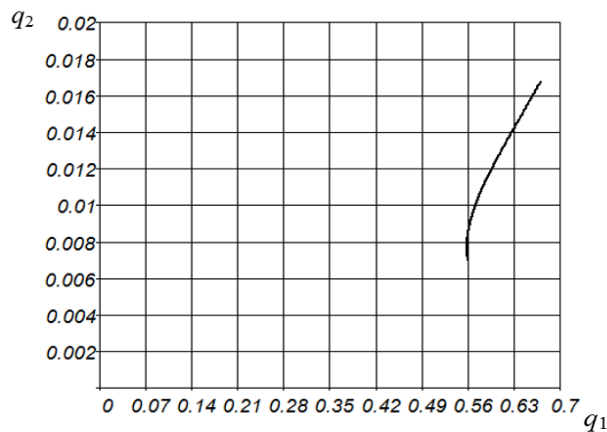


Рис. 2. Линия заданной степени колебательности m для ПИР-регулятора

Проиллюстрируем графики переходных процессов в автоматической системе, полученные в программе MathCad, на основе выше приведенной кривой настройки:

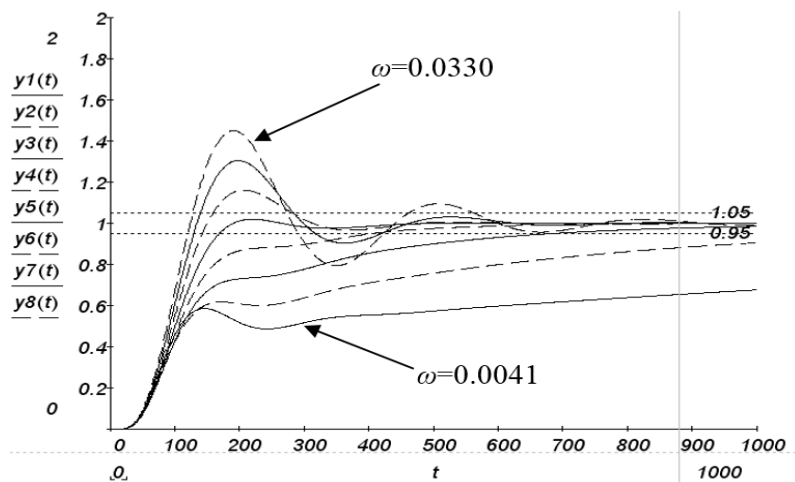


Рис. 3. Переходные процессы с ПИР-регулятором

На рис. 3 видно, что ПИР-регулятор в заданной автоматической системе обеспечивает минимальное время сходимости переходного процесса за время близкое к $4\tau_{об}$, что является допустимым в системах с запаздыванием [1].

Приведём таблицу, содержащую значения настраиваемых параметров и оценки качества переходных процессов, представленных на рис. 3.

Таблица 1. Результаты параметрического синтеза ПИР-регулятора

№	ω	q_1	q_2	q_3	q_4	I	$\sigma, \%$
1	0.0041	0.8000	0.0011	0.1	100	230.1	0
2	0.0083	0.6730	0.0031	0.1	100	141.2	0
3	0.0124	0.6120	0.0054	0.1	100	103.6	0
4	0.0165	0.5880	0.0079	0.1	100	87.8	0
5	0.0206	0.5840	0.011	0.1	100	80.8	3
6	0.0248	0.5930	0.0140	0.1	100	79.0	20
7	0.0289	0.6080	0.0170	0.1	100	82.0	30
8	0.0330	0.6270	0.0210	0.1	100	91.0	45

Заключение. Метод РЧХ позволяет производить параметрический синтез ПИР-регулятора в системе автоматического регулирования объектом с большим запаздыванием. Синтезированные настраиваемые параметры, в некоторых трудных случаях, могут быть использованы как стартовые значения алгоритма автоматической параметрической оптимизации на основе градиентной процедуры. Объем расчётов по методу РЧХ для параметрического синтеза линейных регуляторов, содержащих в своей структуре звено запаздывания, существенно возрастает в сравнении с типовыми ПИ-, ПИД-регуляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение. 1974. 328 с.
2. Кулаков Г.Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. Минск: Вышэйшая школа. 2017 – 238 с.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком. 2009. 608 с.
4. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках. Учебник для вузов. М.: Наука. 1985. 272 с.
5. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido, "Proportional integral retarded control of second order linear systems", 2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2239-2244.
6. A. Ramírez, R. Garrido, S. Mondié Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors //in IFAC TDS Workshop. Grenoble, France. 2013.Pp. 558-563.
7. R. Villafuerte, S. Mondié, R. Garrido, Tuning of Proportional Retarded Controllers: Theory and experiments, IEEE Transactions on Control Systems Technology. May. 2013.
8. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Integral retarded velocity control of dc servomotors" //11th IFAC Workshop on Time-Delay Systems 46 (3). 558-563.
9. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Velocity control of servo systems using an integral retarded algorithm //ISA transactions 58. Pp.357-366.
10. Городецкий В.И. Методы теории чувствительности в автоматическом. Л.: Энергия. Ленинградское отделение. 1971. 344 с.
11. Стефани, Е. П. Основы расчёта настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М.: «Энергия». 1972. 376 с.

12. Марголис Б.И. Программа расчёта настроек регуляторов методом расширенных частотных характеристик // Программные продукты и системы. Тверь: ЗАО «Научно-исследовательский институт «Центрпрограммсистем». 2018. С. 636-639.
 13. Марголис Б.И, Мешков И.С. Синтез настроек регуляторов в системах автоматического управления методом расширенных частотных характеристик // Вестник Костромского государственного университета. Кострома: издательство ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет». 2014. № 2. С. 31–33.
 14. Марголис Б.И, Мешков И.С. Синтез настроек пид-регуляторов в системах автоматического управления альтернативным методом расширенных частотных характеристик // Вестник Костромского государственного университета. Кострома: издательство ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет». 2014. № 7. С. 104–106.
 15. Луков, Н.М. Автоматические системы управления локомотивов: учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта. Москва: Учеб.-методический центр по образованию на ж.-д трансп. 2007. 427с.
-

UDK 519.711.2

**APPLICATION OF THE EXTENDED FREQUENCY RESPONSE METHOD FOR
PARAMETRIC SYNTHESIS OF
A PROPORTIONAL-INTEGRAL DIFFERENCE CONTROLLER**

Vladimir V. Kulikov

Postgraduate student, e-mail: godefired@mail.ru

Nikolay N. Kutsy

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Institute of Information Technology and Data Analysis,
e-mail: kucyinn@mail.ru,

Irkutsk National Research Technical University,
str. Lermontov, 83, 664074, Irkutsk

Abstract. To improve the quality of transients in automatic systems with lag, a PI controller is used with a delay link that compensates for the integral component of the standard PI controller, which is designated in the technical literature as a proportional-integral difference controller (PIR controller). An important task facing the industrial implementation of this controller is to determine the optimal configurable parameters that deliver an extreme value to the accepted optimality criterion. The presence of a delay in the controller and the object makes it difficult to apply analytical approaches for the parametric synthesis of the control law, which provides transients with acceptable quality. This leads to the use of algorithmic methods. The article shows the application of the extended frequency response (RFC) method for the parametric synthesis of a PIR controller in a single-circuit automatic control system (ASR) by an object with a delay critical for the use of standard regulators. The RFC method allows you to obtain the values of the configurable parameters of the PIR controller, which in some complex cases can be used as the starting points of the gradient procedure. To assess the quality of the transient processes obtained by the RFC method, the overshoot coefficient and the integral quadratic criterion, which are widely used in the practice of automatic control, are used.

Keywords: automatic system, transport delay, stability, PI-controller, PIR-controller, extended frequency characteristics method, proportional-integral difference controller, parametric synthesis

REFERENCES

1. Guretskiy Kh. Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniyem [Analysis and synthesis of delayed control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye = Mechanical engineering. 1974. 328 p. (in Russian).
2. Kulakov G.T., Kulakov A.T., Kravchenko V.V., Kukhorenko A.N. et al. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi protsessami [The theory of automatic con-

- trol of power energy processes]. Minsk: Vysheishaia shkola = High School. 2017. 238 p. (in Russian).
3. Denisenko. V.V. Kompyuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom. eksperiment. oborudovaniyem [Computer control of technological process, experiment, and equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom = Hot line - Telecom. 2009. 608 p. (in Russian).
 4. Tihonov O.N. Avtomatizaciya proizvodstvennyh processov na obogatitel'nyh fabrikah. Uchebnik dlya vuzov [Automation of production processes at processing plants. Textbook for universities]. Moscow: Nauka = Science. 1985. 272 p. (in Russian).
 5. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Proportional integral retarded control of second order linear systems // 2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC). Pp. 2239-2244.
 6. A. Ramírez, R. Garrido, S. Mondié Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors //in IFAC TDS Workshop. Grenoble, France. 2013.Pp. 558-563.
 7. R. Villafuerte, S. Mondié, R. Garrido, Tuning of Proportional Retarded Controllers: Theory and experiments, IEEE Trans-actions on Control Systems Technology. May. 2013.
 8. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Integral retarded velocity control of dc servomotors" //11th IFAC Workshop on Time-Delay Systems 46 (3). 558-563.
 9. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Velocity control of servo systems using an integral retarded algorithm //ISA transactions 58. Pp.357-366.
 10. Gorodeckij V.I., Zaharin F.M., Rozenvasser E.N., Yusupov R.M. Metody teorii chuvstvitel'nosti v avtomaticheskoy upravlenii [Methods of the theory of sensitivity in automatic control]. L.: Energy = Leningrad: Energy. Leningrad branch. 1971. 343 p. (in Russian).
 11. Stefani E. P. Osnovy raschyota nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh processov [Fundamentals of calculating the settings of heat and power process regulators]. Moscow: Energiya = Energy. 1972. 376 p. (in Russian).
 12. Margolis B.I. Programma rascheta nastroyek regulyatorov metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Program for calculating the settings of the regulators by the method of extended frequency characteristics]. Tver: Programmnyye produkty i sistemy = Software & Systems. 2018. Pp 636-639 (in Russian).
 13. Margolis B.I., Meshkov I.S. Sintez nastroyek regulyatorov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Synthesis of controller settings in automatic control systems by the method of extended frequency characteristics]. Kostroma: Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kostroma State University. 2014. № 2. Pp 31–33 (in Russian).
 14. Margolis B.I., Meshkov I.S. Sintez nastroyek pid-regulyatorov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya alternativnym metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Synthesis of PID controller settings in automatic control systems by an alternative method of extended frequency characteristics]. Kostroma: Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kostroma State University. 2014. № 7. Pp. 104–106 (in Russian).
 15. Lukov N.M. Avtomaticheskiye sistemy upravleniya lokomotivov: uchebnik dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Automatic locomotive control systems: a textbook for students of railway transport universities]. Moskva: Ucheb.-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zh.-d transp = Educational-methodical center for education on the railway transport. 2007. 343 p. (in Russian).

УДК 519.872.5:656.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОКЗАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИРКУТСК-ПАССАЖИРСКИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Жарков Максим Леонидович

к.т.н., научный сотрудник, e-mail: zharkm@mail.ru,

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

Супруновский Антон Викторович

старший преподаватель, e-mail: as.irgups@gmail.com,

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

Аннотация. В работе предлагается математическая модель работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, построенная на основе теории массового обслуживания. Эта модель может быть использована для научного обоснования планируемых мер и мероприятий при реконструкции данного объекта и создании на его основе регионального транспортно-пересадочного узла. В модели для описания сложного входящего пассажиропотока применяются ВМАР-потоки, что позволяет учитывать наличие нескольких подпотоков с различными параметрами. Для описания процесса обслуживания пассажиров используется сеть массового обслуживания, благодаря чему возможно детально описать структуру и перемещение пассажиропотоков внутри системы.

Ключевые слова: математическое моделирование, сети массового обслуживания, ВМАР-поток, железнодорожный вокзальный комплекс.

Цитирование: Жарков М. Л., Супруновский А.В. Моделирование работы вокзального комплекса Иркутск-пассажирский на основе сетей массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 43-53. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.004

Введение. Железнодорожный вокзальный комплекс Иркутск-Пассажирский (ВК И-П) является пассажирской станцией 1 класса и одним из крупнейших транспортных узлов в Восточно-Сибирском регионе. Последние его значительные изменения были осуществлены в 1998 г. (проведена полная реконструкция вокзала) и в 2004 г. (был реконструирован пригородный павильон). К настоящему времени появился ряд проблем в работе ВК И-П. Первая – при текущем уровне посещаемости здание вокзала имеет недостаточную вместимость. Вторая – устаревшая планировка, в частности, наличие пересечений пассажиропотоков различных направлений. Так, поток пассажиров с электричек мешает движению пассажиров, направляющихся к пригородным кассам или поездам дальнего следования. Третья – отсутствие интеграции пригородного сообщения с городской транспортной средой города [1]. Для решения этих и других менее значимых проблем планируется реконструкция ВК И-П и создание на его основе регионального транспортно-пересадочного узла (ТПУ), который соединит межрегиональный, региональный и городской транспорт в единую систему [2]. Затем на этой основе ожидается организация мультимодальных перевозок [3, 4], которые являются одним из наиболее перспективных способов снижения высокой плотности транспортных потоков в черте города. Чтобы проанализировать предлагаемые мероприятия, не прибегая к проведению натурного эксперимента, целесообразно построить математическую модель действующего вокзального комплекса, а затем на ее основе оценить планируемые изменения.

Под вокзальным комплексом мы понимаем здание вокзала вместе с привокзальной площадью, пассажирскими платформами и переходами [5]. Реконструкция такого объекта, как правило, связана с большими финансовыми затратами, поэтому необходимо научное обоснование планируемых мер и мероприятий. С позиции теории систем ВК является сложной системой: в нем стыкуются несколько транспортных потоков с различными характери-

стиками (вид транспорта, его вместимость и интенсивность поступления); для каждого потока в системе присутствует станция или остановка, принимающая и отправляющая транспортные средства; также имеется терминал (здание), который соединяет эти станции и позволяет пассажирам пересаживаться с одного вида транспорта на другой [3, 5].

Для описания и исследования работы ВК и других ТПУ применяются различные модели и методы, которые можно разделить на две условные группы. Первая – детерминированные математические модели, в частности, клеточные автоматы [6, 7], модели на основе физических сил [7], а также аналитические формулы, используемые для определения пропускной способности различных элементов системы [5]. Основным их недостатком является сложность учета возмущений и искажений, связанных с наличием случайных второстепенных факторов, а преимуществом – они наиболее просты для аналитического исследования. Вторая – вероятностные модели, построенные с использованием аппарата теории вероятностей, теории случайных процессов, теории массового обслуживания (ТМО) [7, 8]. Они позволяют учитывать наличие фактора случайности, однако такие математические модели могут оказаться слишком сложными для аналитического изучения.

Для математического моделирования ВК И-П мы выбрали аппарат ТМО [9] по следующим причинам. Во-первых, он является эффективным и удобным средством для описания объектов, в которых регулярно повторяются однотипные действия (принятие транспорта, его обслуживания и т.д.) и процесс их работы подвержен влиянию большого числа случайных второстепенных факторов, т.е. таких систем, как ВК и ТПУ [7, 8]. Во-вторых, имеется возможность не учитывать расписание движения транспорта при прогнозировании работы системы, которое, как правило, неизвестно до входа системы в штатный режим работы после модернизации. В-третьих, авторы имеют положительный опыт применения ТМО для описания пассажирских транспортных систем. Так, в работах [10, 11] были построены и исследованы модели действующих типовых ТПУ в Москве. Эти модели имеют вид многофазных систем массового обслуживания (СМО) с *ВМАР*-потоками [9, 12]. Использование *ВМАР*-потоков позволяет составить единое математическое описание нескольких пассажиропотоков с различными характеристиками [11, 12], а многофазных СМО – учесть многоэтапное последовательное обслуживание пассажиров в системе [9, 10].

В данной работе предложена математическая модель работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, построенная на основе аппарата ТМО. Она предназначена для определения текущей пропускной способности и «узких мест» в структуре ВК И-П и в дальнейшем может стать необходимым инструментом для оценки эффективности планируемых мер и мероприятий при реконструкции этого объекта.

Далее в статье представлено предметное описание ВК И-П, которое актуально на февраль 2021 года. Особенностью этого ВК является то, что он обладает нелинейной иерархической структурой. В этом случае многофазные СМО неэффективны, поэтому для построения модели мы использовали более общий их случай – сети массового обслуживания (СеМО) [9] – одно из современных направлений в ТМО. С их помощью нам удалось детально описать структуру ВК И-П и перемещение пассажиропотоков в нем.

1. Предметное описание вокзала Иркутск-пассажирский. ВК И-П относится к типу одноуровневых вокзалов с боковым расположением пассажирского здания по отношению к ж/д путям, т.е. перрон с платформами, полы первого этажа вокзала и привокзальная площадь находятся на одном уровне. Схема ж/д вокзала И-П и прилегающей к нему территории представлена на рис.1.

На *ж/д станцию* при вокзале И-П прибывают поезда: пригородные и дальнего следования (далее – электрички и поезда), которые принимаются на путях 1, 3, 4, 5, 7. Также на вокзале имеется путь 15, на котором осуществляется прием/отправка туристических поездов.

На основе анализа расписания движения поездов установлено, что за сутки на вокзал прибывает 21 электричка и 19 поездов, а отправляется 16 электричек и 19 поездов. Средний интервал времени между поступлениями обеих категорий поездов составляет 27 мин., между отправлениями 30 мин.



Рис. 1. Схема вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

Как правило, после реконструкции вокзала новое расписание движения транспорта неизвестно до момента его ввода в эксплуатацию. В этом случае в ТМО используется интенсивность поступления заявок – среднее число заявок, поступивших в систему в единицу времени [9]. Далее мы будем оперировать именно этой характеристикой. Тогда интенсивность поступления электричек и поездов на платформы составляет $\lambda_{приб} = 1/27$, отправления с платформ – $\lambda_{отпр} = 1/30$.

Вместимость пассажирских поездов найдем из следующих соображений: в среднем в составе имеются 6 плацкартных вагонов на 54 места каждый и 4 вагона-купе на 36 мест. Тогда вместимость составит – 468 мест. В составе электрички имеются 2 головных вагона, вместимость каждого 80 мест и несколько прицепных вагонов на 116 мест. Большая часть электричек имеет 4 вагона с номинальной вместимостью 392 места, реже – 6 вагонов (2 головных по 80 мест, 4 прицепных по 116 мест), вместимость которых 624 места. По анализу статистических данных установлено, что средний размер прибывающих групп пассажиров в сутки для поездов составляет 74 чел., для электричек 41 чел., а максимальный 140 и 110 соответственно.

В здание вокзала пассажиры попадают с ж/д транспорта двумя путями: 1) с платформ 2 и 3 через подземный туннель; 2) с перрона через западные и восточные ворота, которые находятся справа и слева от здания. На каждой платформе имеются по 4 двери, которые ведут в туннель. Площадь перрона составляет 6497,4 кв.м., платформы 2 – 3725,9 кв.м., платформы 3 – 4118,9 кв.м. и тоннеля – 262 кв.м. Их расчетная вместимость составляет 1732, 990, 1090 и 188 чел. соответственно [13].

Здание вокзала делится на 4 подъезда. Подъезд 3 двухэтажный, остальные – одноэтажные. В Подъезде 1 расположен операционный зал, вмещающий девять касс, которые продают билеты на поезда. В Подъезде 2 имеются административные помещения, медпункт, сервис по перевозке корреспонденции. На первом этаже Подъезда 3 расположены зал ожидания и справочное бюро, на втором – зал повышенного комфорта, комнаты отдыха и административные помещения. Подъезд 4 (пригородный павильон) включает распределительный вестибюль со входом в подземный переход (4 двери), пять пригородных касс, из которых работа-

ют две (натурные данные), торговые павильоны и пункты питания. Пригородный павильон предназначен для принятия/отправления пассажиров как в пригородном, так и в дальнем сообщении. Также в здании вокзала имеется цокольный этаж, в котором располагаются камера хранения и вспомогательные помещения.

Подъезды 1 и 2, 3 и 4 сообщаются между собой. Вход пассажиров и посетителей в здание вокзала из города возможен через Подъезды 1, 3 и 4. В подъездах 1 и 3 имеется по одной двери, в Подъезде 4 – 4 двери (по 2 на вход и выход), однако сразу за ними расположены всего 2 рамки металлоискателя, т.е. по одной на вход и выход. Общая площадь здания вокзала составляет 3626,5 кв.м., площадь пригородного павильона (Подъезд 4) – 316 кв.м., первого этажа Подъезда 3 – 547 кв.м. На основе этих параметров мы определили их вместимость [13], которая составляет 800, 226 и 304 чел. соответственно.

Привокзальная площадь (2839,3 кв.м.) обеспечивает связь железнодорожного вокзального комплекса с различными видами общественного транспорта и сетью автомобильных дорог города Иркутска. На ней имеются парковка на 250 машиномест, две автобусные и трамвайная остановки. Автобусная остановка 1 предназначена для городского сообщения, через нее проследуют 7 маршрутов. На Автобусной остановке 2 обслуживаются 6 междугородних маршрутов. Автобусы междугородних маршрутов и двух городских маршрутов имеют максимальную номинальную вместимость 110 чел. (далее – автобусы). Автобусы других маршрутов вмещают до 13 чел. (далее – микроавтобусы). Через трамвайную остановку проследуют три маршрута, на которых используются вагоны серии 71-619, 71-617, 71-608КМ и КТМ-5. Их максимальная номинальная вместимость составляет – 145 чел. (5 чел./м²).

На основе натурного наблюдения установлено, что интенсивность поступления (и отправления) для парковки составляет – 7,9 ед./час, для Автобусной остановки 1 – 15 ед./час, для Автобусной остановки 2 – 3 ед./час, и для остановки трамвая – 5,5 ед./час, т.е. средний интервал времени между поступлением (и отправлением) 7, 6, 4, 20 и 10,9 мин. соответственно. Среднее число пассажиров в автомобилях – 2 чел., в микроавтобусах – 7 чел., в автобусах – 80 чел., в трамваях – 70 чел.

За 2019 пассажиропоток на ж/д станции при ВК И-П составил 835,5 тыс. чел. на поездах и 597,3 тыс. чел. на электричках, за первые 7 месяцев 2020 года – 241 и 240,9 тыс. чел. соответственно. На основе полученных данных установлено, что среднесуточное сообщение составляет 1,82 тыс. чел. для поездов дальнего следования и 1,46 тыс. чел. для пригородных поездов, а максимальный пассажиропоток в сутки составил 2,8 тыс. чел. для поездов и 2,16 тыс. чел. для электричек.

Нам не удалось установить распределение размеров прибывающих на вокзал групп пассажиров. Примем, что оно подчиняется биномиальному распределению, которое является дискретным аналогом нормального распределения [9]. Параметры биномиального распределения $B(n, p)$ находятся из следующих соображений: n – число «испытаний» – максимальный размер группы пассажиров, которую данный тип транспорта может перевезти; p – вероятность «успеха» – отношение значения среднего размера группы пассажиров к n . Распределения размеров групп пассажиров для различных видов транспорта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики групп пассажиров, прибывающих различным транспортом

Тип транспорта	Интенсивность поступления в мин.	Распределение размеров групп
Электричка	1/54	$B(110, 0,37)$
Поезд	1/54	$B(140, 0,53)$
Автомобиль	7,9	$B(7, 0,29)$.
Микроавтобус	10	$B(13, 0,54)$
Автобус	5	$B(110, 0,73)$
Трамвай	5,5	$B(145, 0,48)$

2. Математический аппарат. При построении модели работы вокзала мы выделяем два основных компонента: входящий пассажиропоток и процесс его обслуживания в системе, включая особенности ее структуры. Каждый из компонентов описывается отдельно. Далее представлен используемый для этого математический аппарат.

Общий поступающий на вокзал пассажиропоток складывается из пассажиров различных видов транспорта (электрички, поезда, автобусы, трамваи и личный транспорт). При этом для общественного транспорта характерно прибытие пассажиров группами, причем их размер, как правило, случаен. Таким образом, общий пассажиропоток состоит из нескольких групповых подпотоков с различными характеристиками: распределение размеров групп, интенсивность поступления и доля в общем потоке. Для его моделирования удобным инструментом является *ВМАР*-поток (Batch Markovian Arrival Process) [12], с помощью которого возможно описать несколько независимых групповых потоков с различными характеристиками как единую структуру.

ВМАР-поток задается в виде набора матриц D_k , $k = \overline{0, 75}$, размеры которых определяются по количеству подпотоков. Элементы матриц определяются следующим образом

$$(D_0)_{v,v} = -\lambda_v, (D_0)_{v,v'} = \lambda_v p_0(v, v'), (D_k)_{v,v'} = \lambda_v p_k(v, v'), v, v' = \overline{0, W}, k \geq 1, \quad (1)$$

где λ_v – интенсивность поступления подпотока $v = \overline{0, W}$, $p_k(v, v')$ – вероятность поступления группы заявок из подпотока v' притом, что последняя группа поступила из подпотока v .

Для описания процесса обслуживания пассажиров применяется сеть массового обслуживания – совокупность конечного числа S СМО (далее – узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой, в соответствии с некоторым маршрутом [9]. Если принять, что заявки поступают из внешнего источника и обозначить его, как новый узел с индексом 0, то маршрут заявки определяется стохастической матрицей $P = \|P_{ij}\|$, где P_{0j} – вероятность поступления в j -й узел заявки из источника; P_{j0} – вероятность покидания заявкой сети после обслуживания в j -м узле ($j = \overline{1, S}$); P_{ij} – вероятность переходящей заявки из узла i в узел j ($i, j = \overline{0, S}$). Очевидно, что $\sum_{j=0}^S P_{ij} = 1$ ($i = \overline{0, S}$), $P_{00} = 0$. Каждый узел описывает отдельный структурный элемент, например, двери, кассы в терминале или станцию (платформу), с которой отправляется транспорт. Таким образом, с помощью СеМО возможно описание объектов с многоэтапным нелинейным обслуживанием заявок.

3. Математическое описание. Применим представленный подход для моделирования работы ВК И-П. Сперва опишем входящий пассажиропоток, затем его движение и обслуживание в системе.

Пассажиры поступают на вокзал И-П различными видами транспорта: железнодорожным и городским. Каждую группу мы будем описывать отдельным *ВМАР*-потоком. Так, во-первых, пассажиропотоки из этих групп являются встречными, т.е. пассажиры из города стремятся сесть на поезд и обратно. Во-вторых, транспорт из каждой группы имеет свое место прибытия (станцию) в системе.

Модель входящего пассажиропотока с ж/д станции (ВМАР-а). Пассажиры прибывают на вокзал в электричках и поездах, следовательно, мы имеем два подпотока №а0 и №а1. Тогда матрицы D_k будут размера 2×2 . Максимальное число пассажиров наблюдается в поездах дальнего следования и равно 140, поэтому *ВМАР-а* будет включать 141 матрицу D_k , $k = \overline{0, 140}$. Элементы матриц вычисляются по формулам (1) при $\lambda_{a0} = \lambda_{a1} = \lambda_{приб} = 1/27$, вероятности переходов $p_k(v, v') = p_v f_v(k)$, $v, v' = \overline{0, 1}$, $k = \overline{0, 140}$, где p_v – вероятности поступления поезда определенной категории: $p_{a0} = 21 / 40 = 0,525$, $p_{a1} = 19 / 40 = 0,475$, $f_v(k)$ – вероятность

поступления группы пассажиров размера k , размеры групп подчинены биномиальному распределению (см. табл. 1).

Модель входящего пассажиропотока с городского транспорта (ВМАР-б) строится аналогично. Он имеет 4 подпотока: №b0 – автомобили, №b1 – микроавтобусы, №b2 – автобусы, №b3 – трамваи. Последние вмещают наибольшее число пассажиров – 145, поэтому ВМАР-б будет включать 146 матриц D_k , $k = \overline{0,145}$ размера 4×4 . В табл. 1 представлены интенсивности и распределения размеров групп заявок из подпотоков, которые необходимы для вычисления элементов матриц D_k .

В модели работы ВК И-П мы учитываем следующие функциональные элементы: ж/д станция – платформы и поезда, прибывающие на ж/д пути; подземный переход; здание вокзала – первый этаж Павильона 3 и Павильон 4 с кассами; привокзальная площадь – Парковка, Автобусная остановка 1 и Остановка трамвая, а также их транспортные средства.

Следующие элементы мы не учитываем в модели: а) Павильон 1; б) Павильон 2, второй этаж Павильона 3 и цокольный этаж; в) Автобусную остановку 2; г) пути 15. Так, как правило, билеты на поезда дальнего следования в б) берут заранее или же онлайн, т.е. посетители не оказывают влияния на пассажиропотоки в здании вокзала, которые осуществляют непосредственную пересадку между различными типами транспорта. В б) оказываются второстепенные услуги и количество пассажиров, которые ими могут воспользоваться, незначительно. Прибывающие на поезде пассажиры в основном являются иногородними и направляются в город. Покидающие город пассажиры могут воспользоваться услугами ж/д транспорта или междугородних автобусов, которые обслуживаются на в). Следовательно, в последнем случае пассажиры не посещают ВК И-П. Пассажиры туристических поездов попадают на г) через восточные ворота, т.е. минуют здание вокзала и не оказывают влияние на основные пассажиропотоки. Также исключим из рассмотрения случаи движения пассажиров по типу «поезд – электричка» и «парковка – наземный общественный транспорт». Предполагаем, что пассажир нацелен пересесть на другой вид транспорта, воспользовавшись зданием вокзала.

В структуре вокзала мы выделяем три основных пассажиропотока, проходящие через здание вокзала (рис. 2): I) С ж/д станции в город (пунктирная линия); II) Из города на ж/д станцию (прямая линия); III) Провожающие – прибывают из города, затем возвращаются обратно (двойная пунктирная линия).

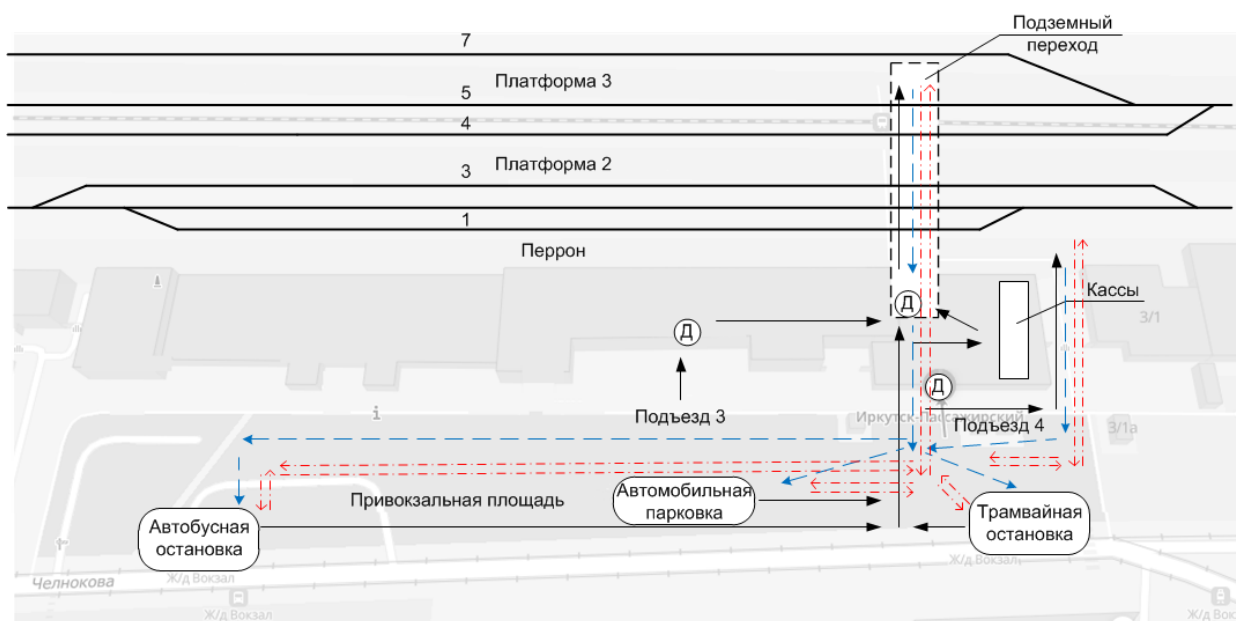


Рис. 2. Схема основных пассажиропотоков

Можно видеть, что эти пассажиропотоки проходят через функциональные элементы в двух направлениях: А) с транспортного средства на вокзал, Б) обратно. В первом случае транспортное средство – источник пассажиропотока, платформа, на которую высаживаются пассажиры – очередь, а двери в подземный переход (или вокзал) на платформе – обслуживающие устройства. Во втором случае транспортное средство – обслуживающее устройство, а платформа, с которой осуществляется посадка – очередь. Примем, что пассажиропотоки в обоих направлениях независимы. В этом случае работу функциональных элементов можно представить в виде двух СМО с конечными очередями.

Работу ж/д станции мы описываем двумя узлами (СМО): Узел-А обрабатывает пассажиров направления А, Узел-Б – направления Б. Каждой СМО отводится половина доступной вместимости двух платформ и перрона. Также половину от доступных на платформах дверей (ворот) мы отдаем для пассажиров направления А. Вторую половину – для выходящих из туннеля пассажиров.

- Ж/д станция: Узел-А1 и Узел-Б1 – пятиканальные СМО с очередью на 1906 мест.

Описание работы подземного перехода отличается только тем, что он сообщается со зданием вокзала через 4 двери, а с платформами через 8 дверей.

- Подземный переход: Узел-А2 – двухканальная СМО с очередью на 94 места, Узел-Б2 – четырехканальная СМО с очередью на 94 места.

В здании вокзала очередью мы считаем пригородный павильон и зал ожидания, а каналами – одну рамку металлоискателя, ведущую на остановки городского транспорта, и две двери в подземный туннель. Треть от вместимости пригородного павильона мы отводим следующим на автобусы пассажирам, треть – для очереди перед кассами, оставшуюся треть и вместимость зала ожидания – для пассажиров, которые направляются на ж/д станцию.

- Функционирование вокзала опишем тремя СМО: Узел-А3 (дверь к остановкам) – одноканальная СМО с очередью на 75 мест, Узел-Б3 (кассы) – двухканальная СМО с очередью на 76 мест, Узел-Б4 (двери в подземный переход) – двухканальная СМО с очередью на 379 мест.

На привокзальной площади имеется парковка, которая занимает две трети доступной территории. Поэтому пешеходам отводится 946,4 кв.м. Следовательно вместимость привокзальной площади составляет 946 чел. при расчете 1 кв.м / чел. Половину отведем для следующих в здание вокзала пассажиров, половину – для пассажиров, направляющихся на остановки городского транспорта.

- Функционирование остановок опишем одной трехканальной СМО с очередью 473 места – Узел-А4 (Парковка, Автобусная остановка 1 и Трамвайная остановка), а вход в здание вокзала (2 двери) – двухканальной СМО с очередью на 473 мест – Узел-Б5.

Характеристики работы каналов в СМО. Узлы А1, А2, А3, Б2, Б4 и Б5 описывают работу дверей (рамок металлоискателей), Узел-Б3 – касс. В них заявки обслуживаются по одной. Среднюю пропускную способность дверей и рамок металлоискателей положим равной 20 чел./мин, касс – 2 чел./мин.

Узлы Б1 и А4 моделируют работу транспортных средств, в которых пассажиры обслуживаются группами. Для большей части маршрутов остановка при ВК И-П является промежуточной. Поэтому мы считаем, что транспортные средства прибывают на остановки при ВК И-П, заполненными наполовину. Тогда максимальный размер обслуживаемой группы в каналах Узла Б1 равен 235 заявок, в первом канале Узла-А4 – 3 заявки (Парковка), во втором канале Узла-А4 – 55 заявок (Автобусная остановка 1), а в третьем канале Узла-А4 – 72 заявки (Трамвайная остановка). Интенсивность обслуживания в каналах Узла Б1 равна 1/30

групп/мин, в первом канате Узла-А4 – 7,9 групп/мин, во втором канале – 15 групп/мин, в третьем канале – 5,5 групп/мин (см. раздел Объект моделирования).

В терминах теории массового обслуживания модель работы ВК И-П будет иметь вид СеМО, состоящей из 11 узлов. Ее схема в виде графа представлена на рис. 3. Далее при описании узлов используется код Кендалла: первая и вторая позиции – символ или их комбинация, третья и четвертая – числа. Первая позиция обозначает входящий поток заявок, вторая – распределение времени обслуживания заявок (M – экспоненциальное) и размер обслуживаемой группы (X – групповое обслуживание), третья – число каналов, четвертая – максимальная длина очереди.

1. Узел-А0 – источник ВМАР-а;
2. Узел-А1 – ВМАР- / M / 5 / 1906;
3. Узел-А2 – * / M / 2 / 94;
4. Узел-А3 – * / M / 1 / 75;
5. Узел-А4 – * / M^X / 3 / 473;
6. Узел-Б0 – источник ВМАР-б;
7. Узел-Б1 – * / M^X / 5 / 1906;
8. Узел-Б2 – * / M / 4 / 94;
9. Узел-Б3 – * / M / 2 / 76;
10. Узел-Б4 – * / M / 2 / 379;
11. Узел-Б5 – ВМАР-б / M / 2 / 473.

Маршрутная матрица P строится на основе движения пассажиропотоков I, II и III. Опустим ее представление, так как, во-первых, она сильно разрежена и имеет большой размер, во-вторых, неинформативна. Вероятности переходов заявок между узлами представлены в виде весов на рис. 3.

Прямые стрелки на нем обозначены направления движения заявок, пунктирными – обратная связь. Последняя представляет собой временную блокировку каналов узла в случае, когда в следующем узле нет места для принятия заявок с текущего.

В полученной СеМО заявки поступают группами случайного размера, имеется большое число узлов, которые соединены между собой как прямыми, так и обратными связями, при этом часть узлов обслуживает заявки группами. Поэтому аналитически найти показатели ее эффективности в общем случае не удалось. В такой ситуации, как правило, используются численные методы, в частности, в настоящее время для исследования математических моделей пассажирских транспортных систем популярным является имитационное моделирование [14, 15]. Это требует разработки и программной реализации имитационной модели, что выходит за рамки данной статьи, но предполагается в дальнейшем.

Заключение. В настоящее время планируется реконструкция вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский и создание на его основе крупного транспортного узла, поэтому в статье предложена математическая модель его работы в виде сети массового обслуживания с ВМАР-потоками. Такого рода модели описывают систему укрупненно, т.е. элементы учитываются обобщенно. Тем не менее на основе данного математического аппарата нам удалось построить модель, детализации которой достаточно для решения различных инженерных задач, в частности определения «узких мест» в структуре выбранного объекта.

Дальнейшая работа предполагает разработку и программную реализацию численных методов исследования СеМО с двумя и более ВМАР-потоками, проведение вычислительных

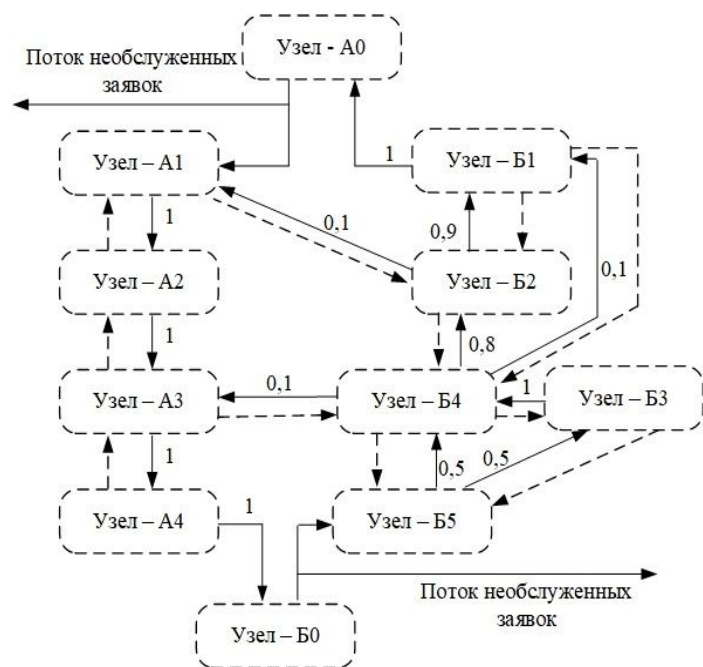


Рис. 3. Схема СеМО

экспериментов по исследованию предложенной модели ВК И-П и выработку рекомендаций по улучшению работы этого вокзального комплекса. Затем в модели планируется учет конкретных мер и мероприятий, которые связаны с будущей реконструкцией данного вокзала. Это позволит определить их эффективность перед внедрением.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-010-00724, РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 20-47-383002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 19 марта 2019 года №466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 г.» URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).
2. Журавская М.А., Казаков А.Л., Парсюроева П.А. О размещении остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 50-53.
3. Брусянин Д.А., Казаков А.Л., Маслов А.М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 106-109.
4. Программа комплексного развития транспортной инфраструктуры города Иркутска на 2016 - 2025 годы / Дума г. Иркутска, решение от 30 сентября 2016 года № 006-20-250396/6.
5. Шубко В.Г. [и др.] Железнодорожные станции и узлы. М.: УМК МПС России. 2002. 368 с.
6. Михайловская Т.В., Михалев А.И., Гуда А.И., Новикова Е.Ю. Моделирование движения пассажиропотока с использованием клеточно-автоматного подхода // Автомобильный транспорт. 2009. № 25. С. 250–253.
7. Козлов П.И., Власов Д.Н. Оценка параметров качества обслуживания пассажиров в транспортно-пересадочных узлах // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 529–536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536.
8. Аршинский Л.В., Бутырина Ю.О., Тирских В.В. Проблемы и моделирование пригородного железнодорожного сообщения на основе теории систем массового обслуживания // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2016. № 17. С. 28–33.
9. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М.: Физматлит. 2005. 295 с.
10. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Определение критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2017. № 3 (35). С. 40-52. DOI:10.20291/2079-0392-2017-3-40-52.
11. Жарков М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 45-56. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56.
12. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ. 2000. 176 с.

13. Об утверждении Типовых требований к размещению, эксплуатации, обслуживанию и ремонту пассажирских обустройств на железнодорожных линиях/ Распоряжение ОАО РЖД от 04.06.2013 г. № 1252 р.
14. Евреенова Н.Ю. Применение имитационного моделирования при управлении работой транспортно-пересадочного узла // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 8–12.
15. Ерофеев А.А., Рибиченок А.Ю. Моделирование пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2019. № 2 (39). С. 61–64.

UDK 519.872.5:656.01

SIMULATION OF THE OPERATION OF THE IRKUTSK-PASSENGER RAILWAY STATION COMPLEX BASED ON QUEUING NETWORKS

Maksim L. Zharkov,

PhD, Researcher, e-mail: zharkm@mail.ru,

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
134, Lermontova st., 664033, Irkutsk, Russia;

Anton V. Suprunovsky,

S. Lecturer, e-mail: as.irgups@gmail.com,

Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky st., 664074, Irkutsk, Russia.

Annotation. The paper proposes a mathematical model of the operation of the station complex Irkutsk-Passazhirsky on the basis of the queuing theory. This model can be used to scientifically substantiate the planned measures during the reconstruction of this facility and to create of a regional transport interchange hub on its basis. We are used a *BMAP* model to describe a complex incoming passenger flow. *BMAP* makes it possible to take into account the presence of several substreams with different parameters. To describe the passenger service process a queuing network is used. It makes it possible to describe in detail the structure and movement of passenger flows within the system.

Keywords. mathematical modeling, queuing networks, *BMAP* flow, railway station complex.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR project number 20-010-00724, by RFBR and the Government of the Irkutsk Region, project number 20-47-383002.

REFERENCES

1. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 19 marta 2019 goda №466-r «Ob utverzhdenii programmy razvitiya OAO «RZHD» do 2025 g.» [Order of the Government of the Russian Federation of March 19, 2019 No. 466-r "On approval of the development program of JSC Russian Railways until 2025"] URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (29.01.2021).
2. Zhuravskaya M.A., Kazakov A.L., Parsyurova P.A. O razmeshchenii ostanovochnykh punktov pri osushchestvlenii mul'timodal'nykh passazhirskikh perevozok [On the placement of stopping points in the implementation of multimodal passenger transportation] //Transport of the Urals = Transport of the Urals. 2012. № 4 (35). P. 50-53.
3. Brusyanin D.A., Kazakov A.L., Maslov A.M. Optimizatsiya regional'noy marshrutnoy seti mezhdugorodnykh i prigorodnykh passazhirskikh perevozok s ispol'zovaniyem logisticheskikh printsiptov [Optimization of the regional route network of intercity and suburban passenger transportation using logistic principles] // Transport of the Urals = Transport of the Urals. 2012. № 1 (32). P. 106-109.

4. Programma kompleksnogo razvitiya transportnoy infrastruktury goroda Irkutsk na 2016 - 2025 gody [Program for the integrated development of the transport infrastructure of the city of Irkutsk for 2016 – 2025] / Duma of Irkutsk, decision of September 30, 2016 № 006-20-250396 / 6.
5. Shubko V.G. [and others] Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly. [Railway stations and junctions]. Moscow: UMK MPS of Russia = UMK Ministry of Railways of Russia. 2002. 368 p.
6. Mikhailovskaya T.V., Mikhalev A.I., Guda A.I., Novikova E.Yu. Modelirovaniye dvizheniya passazhiropotoka s ispol'zovaniyem kletочно-avtomatnogo podkhoda [Modeling of passenger traffic using the cellular automata approach] // Avtomobil'nyy transport = Automobile transport. 2009. № 25. P. 250–253.
7. Kozlov P.I., Vlasov D.N. Otsenka parametrov kachestva obsluzhivaniya passazhirov v transportno-peresadochnykh uzлах [Assessment of the parameters of the quality of passenger service in transport interchange hubs] // Vestnik MGSU = Vestnik MGSU. 2017.Vol. 12. № 5 (104). P. 529-536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536.
8. Arshinsky L.V., Butyrina Yu.O., Tirsikh V.V. Problemy i modelirovaniye prigorodnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya na osnove teorii sistem massovogo obsluzhivaniya [Problems and modeling of suburban railway traffic based on the theory of queuing systems] // Informatsionnyye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh system = Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems. 2016. № 17. P. 28–33.
9. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing theory]. Moscow: Fizmatlit = Fizmatlit. 2005. 295 p.
10. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Lempert A.A. Opredeleniye kriticheskikh pokazateley raboty transportno-peresadochnogo uzla na osnove mnogofaznoy sistemy massovogo obsluzhivaniya [Determination of critical indicators of the operation of a transport interchange hub based on a multiphase mass service system] // Vestnik UrGUPS = Bulletin of UrGUPS. 2017. № 3 (35). P. 40-52. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-3-40-52.
11. Zharkov M.L. Matematicheskaya model' i programmnyy kompleks dlya opredeleniya statisticheskikh parametrov passazhiropotokov v transportnykh sistemakh [Mathematical model and software package for determining the statistical parameters of passenger traffic in transport systems] // Vestnik IrGTU = Bulletin of ISTU. 2018.Vol. 22. № 2 (133). P. 45-56. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56.
12. Dudin A.N., Klimenok V.I. Istemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami [Queuing systems with correlated flows] Minsk: BGU = Minsk: BSU, 2000. 176 p.
13. Ob utverzhdenii Tipovykh trebovaniy k razmeshcheniyu, ekspluatatsii, obsluzhivaniyu i remontu passazhirskikh obustroystv na zheleznodorozhnykh liniyakh [On approval of Standard requirements for the placement, operation, maintenance and repair of passenger facilities on railway lines] // Rasporyazheniye OAO RZHD ot 04.06.2013 g. = Order of JSC Russian Railways dated 04.06.2013. № 1252.
14. Evreenova N.Yu. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya pri upravlenii rabotoy transportno-peresadochnogo uzla [The use of simulation modeling in managing the operation of a transport interchange hub] // Nauka i tekhnika transporta = Science and technology of transport. 2020. № 2. P. 8-12.
15. Erofeev A.A., Ribichenok A.Yu. Modelirovaniye passazhiropotokov v transportno-peresadochnykh uzлах [Modeling of passenger traffic in transport interchange hubs] // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta = Bulletin of the Belarusian State University of Transport. 2019. № 2 (39). P. 61–64.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЗАДАЧЕ О ТЕПЛОВОМ ВЗРЫВЕ В СРЕДЕ С ФЛУКТУАЦИЯМИ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ

Донской Игорь Геннадьевич

к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории термодинамики,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru,

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

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. Формулируется задача о тепловом взрыве в среде с флуктуациями реакционной способности, которые задаются через функцию распределения энергии активации. Для дифференциального уравнения, описывающего стационарное распределение температуры в такой среде, предложена вариационная формулировка. С использованием простой пробной функции численно исследуется зависимость величины вариационного функционала от максимальной температуры. Критические условия теплового взрыва соответствуют появлению точки перегиба на этой зависимости. Расчеты показывают, что увеличение дисперсии распределения реакционной способности снижает устойчивость системы за счет уменьшения эффективной энергии активации для процесса тепловыделения.

Ключевые слова: тепловой взрыв, обратная вариационная задача, критические условия, численное решение.

Цитирование: Донской И. Г. Численная оценка критических условий в задаче о тепловом взрыве в среде с флуктуациями реакционной способности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 54-65. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.005

Введение. Тепловой взрыв происходит при нарушении баланса между теплоотводом и производством теплоты в активных средах, в первую очередь, в химических реакторах [1]. Прогнозирование условий теплового взрыва составляет важную задачу при проектировании аппаратов химической технологии и управления ими [2]. В данной работе рассматривается одномерная стационарная задача о распределении температуры в реакционноспособной среде со специальными свойствами. Для определения критических условий, как будет показано ниже, можно сформулировать задачу на существование экстремума интегрального функционала.

1. Обзор литературы. Вариационные методы разработаны для исследования процессов с диссипацией: электропроводностью, теплопроводностью, диффузией и вязким течением [4–6]. Даже в этих случаях, однако, возникают проблемы, связанные с полнотой описания и условиями стационарности [7, 8]. Для процессов вблизи равновесия существование вариационных принципов связано с выполнением соотношений линейной неравновесной термодинамики, однако в некоторых случаях эти связи могут быть распространены на нелинейную область [9, 10]. Известно, что условия химического равновесия определяются экстремумом термодинамического потенциала, вид которого зависит от условий обмена энергией и массой между физико-химической системой и окружением [11]. Аналитическое исследование задач химического равновесия возможно лишь в простейших случаях, однако для практических расчетов разработаны эффективные вычислительные методы (как правило, это методы решения задач нелинейной оптимизации).

Намного сложнее дело обстоит с применением вариационных методов в химической кинетике. Не существует общего метода построения потенциальной функции, градиент которой давал бы уравнения для скоростей химических реакций. В некоторых работах предлагаются различные варианты (часто довольно абстрактные) для построения такого «кинетического потенциала» [12 – 14]. Часто эти потенциалы пытаются связать с

термодинамическими свойствами системы (по аналогии со связью динамических и статических свойств механических систем) [15 – 17]. Авторами работ [18, 19] предложен оригинальный метод квазиградиентного описания динамики химических систем, который в явном виде включает параметры равновесного состояния. Другой метод, основанный на использовании новых «термодинамических» переменных при описании каталитических процессов, допускающий экстремальную постановку для стационарного состояния, предложен в [20]. В работах [21, 22] предлагается использовать принцип максимального производства энтропии для исследования динамики химических систем, хотя его применимость к этой проблеме не очевидна [23]. В работе [24], напротив, используется принцип минимального производства энтропии, причем результаты доведены до численных расчетов, которые показывают возможность использования этого принципа для редукции кинетических схем.

В работах [25 – 27] предложен вид функционала, минимальность которого выполняется для реализуемой динамики сложных химических систем (что было показано на численных расчетах на основе полной системы кинетических уравнений). Этот функционал имеет связь с термодинамическими характеристиками системы, однако явно зависит от скоростей реакций и производных скоростей реакций от концентраций компонентов. В таком случае вариационный принцип является скорее *post hoc*-закономерностью: решение экстремальной задачи оказывается сложнее, чем решение прямой кинетической задачи.

Численные методы, основанные на оптимизационных постановках, используются при решении обратных задач [28, 29] и для сокращения сложных механизмов химических реакций [30]. Распространение волн реагирования в нелинейных средах можно связать с вариационным принципом, который определяет скорость распространения [31 – 33]. Как указывается в [34], формальная аналогия между стационарными уравнениями реакции-диффузии и уравнениями механики в некоторых случаях позволяет объяснять существование периодических решений в нелинейных системах. Подобным образом в работе [35] предложен вариационный принцип для стационарных систем с простой (линейной) кинетикой.

2. Тепловой взрыв в системе с заданным распределением реакционной способности. В статье [36], по-видимому, впервые была предложена вариационная формулировка задачи о тепловом взрыве. В приближении Франк-Каменецкого источник теплоты является экспоненциальной функцией температуры, а на стадии предвзрывного разогрева расходом компонентов можно пренебречь. Квазистационарное распределение температуры удовлетворяет уравнению [1]:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + Q \rho k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = 0. \quad (1)$$

Здесь x – пространственная координата, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, Q – тепловой эффект химической реакции, ρ – плотность (массовая концентрация) активного компонента, R – газовая постоянная, k_0 – предэкспоненциальный множитель константы скорости химической реакции, E – энергия активации химической реакции. Энергия активации определяет температурную зависимость скорости реакции, поэтому является основной характеристикой реакционной способности при исследовании условий теплового взрыва.

Используя характерные масштабы задачи, можно переписать это уравнение в следующем виде [2]:

$$\theta'' + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1 + \text{Ar}\theta}\right) = 0. \quad (2)$$

На границах заданы условия:

$$\theta'(0) = 0, \theta(1) = 0. \quad (3)$$

Здесь θ – приведенная температура, Fk – критерий Франк-Каменецкого (отношение скорости реакции при температуре окружающей среды к скорости теплопередачи), Ar – число Аррениуса (обычно – малый параметр). При критическом значении Fk решение уравнения (2) разрушается, наступает тепловой взрыв.

Нелинейность функции источника не позволяет использовать в качестве функционала производство энтропии или другие связанные с ним интегральные характеристики системы. Можно показать, что минимум производства энтропии будет реализовываться только при $Ar \gg 1$: в большинстве случаев это условие не выполняется [9]. Однако можно легко показать, что при $Ar \rightarrow 0$ решение уравнения (1) является экстремалью интеграла:

$$I = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} (\theta')^2 - Fk \exp(\theta) \right] d\xi. \quad (4)$$

В работе [36] из условия экстремальности интеграла (4) были получены численные оценки критического значения параметра Fk для системы с двумя параллельными реакциями. Более подробно свойства интеграла (4) были исследованы в недавних работах [37, 38] на примере нескольких пробных функций (парабола и косинус), в том числе с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Вклад первого слагаемого в подынтегральное выражение в (4) положителен, второго слагаемого 0 отрицателен, поэтому существование ограниченного решения (1) определяется существованием локального минимума I . При критическом значении Fk локальный минимум превращается в точку перегиба.

Естественным образом можно распространить задачу минимизации интеграла (4) на систему с произвольным числом экзотермических реакций:

$$I = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} (\theta')^2 - \sum_i \frac{Fk_i}{s_i} \exp(s_i \theta) \right] d\xi. \quad (5)$$

В пределе можно перейти к непрерывному представлению:

$$I = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} (\theta')^2 - \int_{s_{min}}^{s_{max}} \frac{Fk(s)}{s} \exp(s\theta) ds \right] d\xi. \quad (6)$$

Например, при кинетическом описании динамического поведения некоторых реакционных сред используется приближение непрерывно изменяющейся энергии активации: в сложных многокомпонентных системах (особенно в конденсированной фазе) реакционная способность активных компонентов зависит от взаимного расположения реакционноспособных молекул и их фрагментов, поэтому температурная зависимость скорости реакции становится более сложной [39]. В этом случае лучшим приближением будет использование вместо дифференциального уравнения (2) следующего интегро-дифференциального уравнения:

$$\theta'' + Fk \int_{s_{min}}^{s_{max}} f(s) \exp\left(\frac{1-s}{Ar}\right) \exp(s\theta) ds = 0 \quad (7)$$

Интегральный функционал, экстремалью которого является решение (7), можно записать так:

$$I = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} (\theta')^2 - Fk \int_{s_{min}}^{s_{max}} \frac{f(s)}{s} \exp\left(\frac{1-s}{Ar}\right) \exp(s\theta) ds \right] d\xi. \quad (8)$$

Здесь $f(s)$ – это функция распределения, например, гауссова функция от s :

$$f(s) = C \exp \left[-\frac{(s-1)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (9)$$

Постоянная C определяется из условия нормировки, а параметр σ , равный среднему квадратичному отклонению энергии активации от среднего значения, является новым параметром задачи. Отметим, что приближение аррениусовского коэффициента экспоненциальной функцией приведенной температуры в уравнении (7) может давать

большие погрешности, если $s \ll 1$. Поэтому естественным условием применимости расчетов на основе уравнения (8) будет достаточно резкое уменьшение $f(s)$ при уменьшении s . Физически это условие означает, что реагирующая система должна быть химически устойчивой при низких температурах, т.е. величина σ не может быть слишком большой. Естественно, что интеграл (8) переходит в (4) при $\sigma \rightarrow 0$, т.е. для $f(s) = \delta(s - 1)$. В общем случае распределение не обязательно должно быть симметричным: в настоящей работе рассматривается лишь один из самых простых частных случаев.

Решение задачи на минимум функционала (8) позволяет исследовать условия возникновения теплового взрыва при наличии флуктуаций, которые изменяют реакционную способность реагирующих молекул. Влияние флуктуаций температуры в неоднородном потоке рассматривалось в работах [40]. Влияние флуктуаций концентрации реагента в дисперсных средах исследовалось в [41]. В настоящей работе рассматривается задача о стационарном распределении температуры, поэтому флуктуации связаны не колебаниями параметров во времени, а с распределением реагирующих частиц по конфигурациям.

3. Результаты расчетов. Для минимизации функционала в уравнении (8) используется пробная функция, удовлетворяющая граничным условиям (3) и содержащая единственный неопределенный параметр:

$$\varphi(\xi) = a(1 - \xi^2). \quad (10)$$

Такой выбор функции $\varphi(\xi)$ позволяет получить аналитическое решение при минимизации функционала (4) из условия $dl/da = 0$. Для функционала (8) получить аналитическое решение намного сложнее. Параметр a определяет максимальное значение приведенной температуры, которая обычно имеет порядок единицы при критическом значении Fk . Поскольку исходное уравнение описывает тепловое самовоспламенение, максимум температуры достигается в центре реактора. Параметр Ag равен 0.025, диапазон значений s составляет от 0.01 до 3. Численное интегрирование проводилось методом трапеций: шаг по координате ξ составляет 10^{-3} , шаг по переменной s тоже 10^{-3} . Предварительные расчеты показали, что при таком выборе шага численное решение слабо зависит от его величины (расчеты с шагом, меньшим в десять раз, дают незначительное изменение критических параметров).

Критическое значение Fk (обозначим его Fk_{cr}) для задачи (2) равно 0.88. Как указывалось выше, величина интеграла (4) при $Fk = Fk_{cr}$ имеет локальный минимум. При величине σ , близкой к нулю, Fk_{cr} в задаче (8) остается близким к 0.88. Пробная функция φ достаточно хорошо воспроизводит поведение распределение приведенной температуры, но ее использование все же вносит небольшую погрешность при оценке Fk_{cr} . Поэтому Fk_{cr} , определяемое из условия существования точки перегиба на зависимости I от a для уравнения (4), составляет около 0.89. При увеличении дисперсии усиливается вклад реагирования молекул с меньшей энергией активации, поэтому Fk_{cr} ожидаемо снижается. На рис. 1 приведены расчетные зависимости функционала I в уравнении (8) от a для разных значений σ и Fk вблизи критических значений. На всех графиках виден переход от кривой с локальным минимумом к кривой с монотонно убывающей кривой. Критическое значение Fk_{cr} , как говорилось выше, соответствует кривой с точкой перегиба вблизи $a = 1$ (в расчетах значение параметра a варьировалось в пределах от 0 до 3).

Зависимость Fk_{cr} от σ представлена на рис. 2а: при $\sigma = 10^{-3}$ функция распределения почти не отличается от δ -функции при выбранной величине шага по s , в области $\sigma = 10^{-2}$ – 10^{-1} происходит резкое снижение, после чего система становится неустойчивой уже при физически нереалистичных значениях Fk . Можно предположить, что с увеличением дисперсии уменьшается эффективная энергия активации реакции. То есть, предполагаем, что

уравнение (8) можно аппроксимировать уравнением (4), используя функцию распределения $f(s) = \delta(s - \langle s \rangle)$, где $\langle s \rangle = \langle E \rangle / E_0$ – эффективное среднее значение коэффициента s при заданном σ . Из определения параметра Fk [1] следует, что:

$$\frac{Fk}{Fk_0} = \langle s \rangle \exp\left(\frac{\langle s \rangle - 1}{Ar}\right). \quad (10)$$

Небольшое уменьшение энергии активации приводит к значительному ускорению химической реакции: можно приближенно пренебречь изменением s перед экспонентой и рассматривать изменение s только в показателе. Тогда получаем выражение для $\langle s \rangle$ в виде:

$$\langle s \rangle \simeq 1 + Ar \ln\left(\frac{Fk}{Fk_0}\right). \quad (11)$$

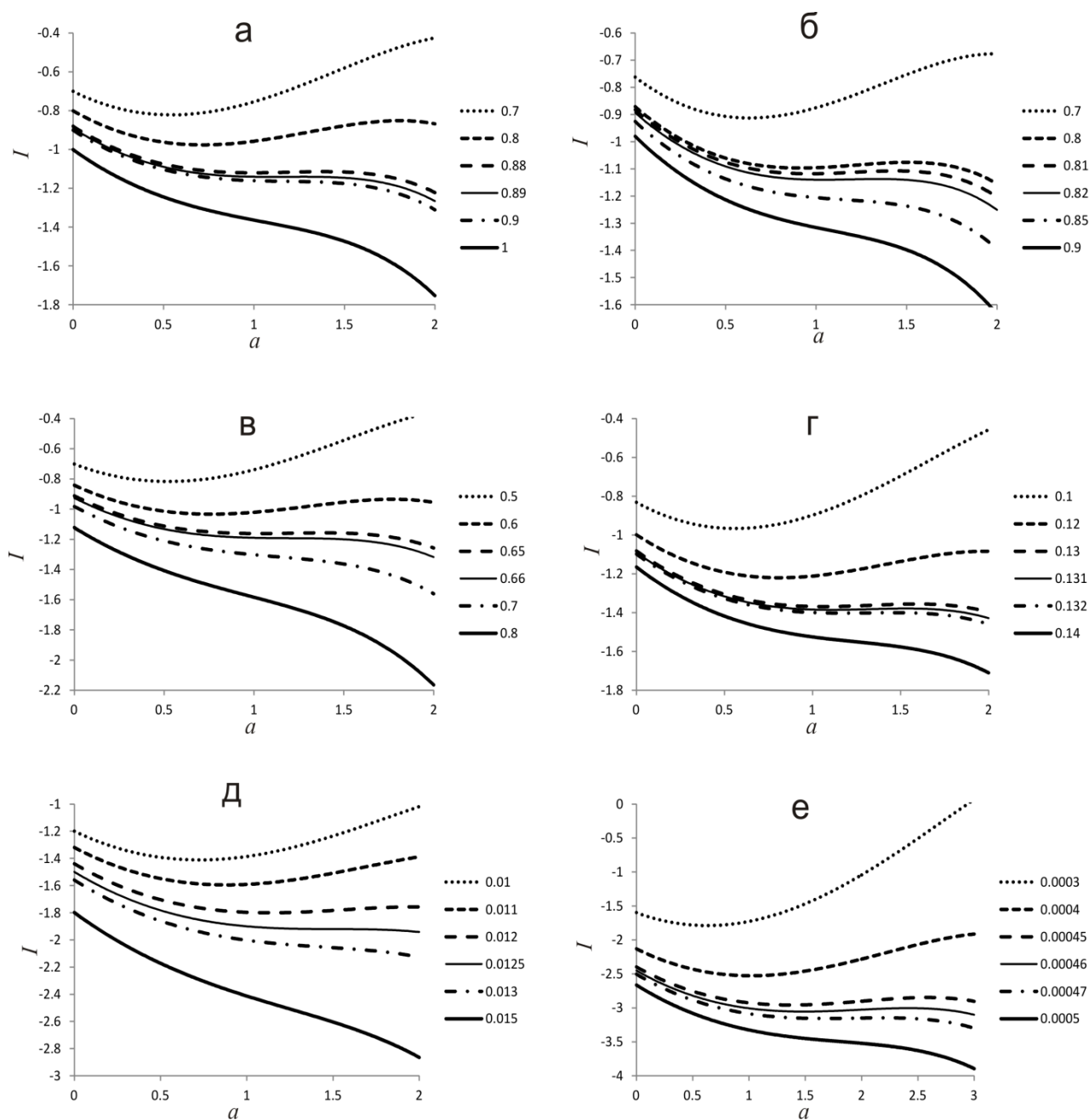


Рис. 1. Расчетные зависимости функционала I от максимальной приведенной температуры a : (а) $\sigma = 0.001$; (б) $\sigma = 0.01$; (в) $\sigma = 0.02$; (г) $\sigma = 0.05$; (д) $\sigma = 0.075$; (е) $\sigma = 0.1$.

Числа на легенде – значения параметра Fk .

Зависимость $\langle s \rangle$ от Fk_{cr} (при $Fk_0 = 0.89$) приведена на рис. 2б. С увеличением дисперсии до 0.1 происходит снижение эффективной энергии активации примерно на 20%, что и приводит к резкому увеличению скорости реакции (при прочих равных условиях) и, как следствие, быстрой потере тепловой устойчивости. Естественно, что вклад в снижение энергии активации дает лишь область $s < 1$, поэтому при рассмотрении несимметричных функций распределения решающее значение будет иметь именно эта часть распределения.

Наконец, отметим, что решение задачи оптимизации интеграла (8) требует намного меньших вычислительных затрат по сравнению с решением исходной краевой задачи, в том числе и благодаря тому, что интеграл (8) существует даже при недопустимых для дифференциального уравнения (7) значениях максимальной температуры. В связи с этим вариационный подход может оказаться полезным и для других, более детальных постановок задачи, связанных с существованием критических условий в системах с химическими реакциями.

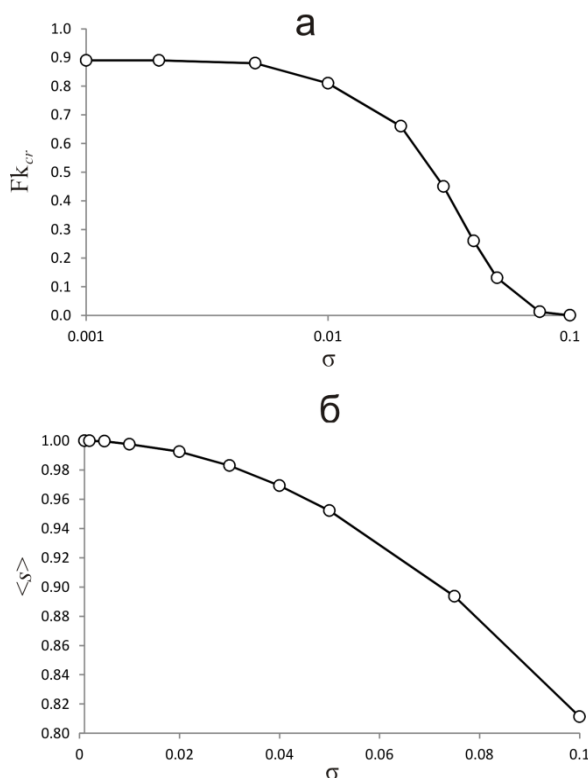


Рис. 2. Зависимость критического значения критерия Франк-Каменецкого и эффективной энергии активации от дисперсии σ .

Выводы. В работе предложен численный подход к оценке условий теплового взрыва в системе с флуктуациями реакционной способности на основе решения вариационной задачи. Распределение энергии активации считается гауссовым, а функция источника является средней величиной по этому распределению. Приближенное решение соответствует стационарной точке функционала, зависящего от градиента температуры и среднего значения функции источника. Расчеты показывают, что с увеличением дисперсии распределения происходит снижение эффективной энергии активации химической реакции, поэтому критическое значение критерия Франк-Каменецкого также снижается. Предложен способ оценки эффективной энергии активации по изменению критического значения критерия Франк-Каменецкого.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0005 (рег. № АААА-А21-121012190004-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and heat exchange in chemical kinetics. Princeton Univ. Press. 2015. 370 p.
2. Kahm W., Vassiliadis V.S. Thermal stability criterion integrated in model predictive control for batch reactors // Chemical Engineering Science. 2018. V. 188. Pp. 192-207. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.032
3. Shechter R.S. The variational method in engineering. McGraw-Hill. 1967. 287 p.
4. Gafiichuk V.V., Lubashevskii I.A. Variational principles of dissipative systems // Journal of Soviet Mathematics. 1993. V. 67. № 2. Pp. 2943-2949. DOI: 10.1007/BF01095874
5. Максимов Г.А. Обобщенный вариационный принцип для диссипативной гидродинамики и механики сплошной среды // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2. № 4. С. 92-104. DOI: 10.7242/1999-6691/2009.2.4.34
6. Fukugawa H., Fujitani Y. A Variational Principle for Dissipative Fluid Dynamics // Progress in Theoretical Physics. 2012. V. 127. № 5. Pp. 921-935. DOI: 10.1143/PTP.127.921
7. Finlayson B.A., Scriven L.E. On the search for variational principles // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1967. V. 10. № 6. Pp. 799-821. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90139-1
8. A variational principle for gradient flows in metric spaces / R. Rossi, G. Savare, A. Segatti, U. Stefanelli // Comptes Rendus Mathematique. 2011. V. 349. № 23-24. Pp. 1225-1228. DOI: 10.1016/j.crma.2011.11.002
9. Glansdorf P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. NY: Wiley-Interscience. 1971. 305 p.
10. Yang C.T. Variational Theories in Hydrodynamics and Hydraulics // Journal of Hydraulic Engineering. 1994. V. 120. № 6. Pp. 737. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:6(737)
11. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A. Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems // Advances in chemical engineering. Volume 39. Thermodynamics and kinetics of complex systems. Elsevier. 2010. Pp. 1-74. DOI: 10.1016/S0065-2377(10)39001-6
12. Kerner E.H. Dynamical aspects of kinetics // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1964. V. 26. № 4. Pp. 333-349. DOI: 10.1007/BF02484234
13. Орлов В.Н., Розоноэр Л.И. Вариационный принцип для уравнения макроскопической динамики и его приложение в химической кинетике // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1981. Т. 21. № 5. С. 1192-1205.
14. Biot M.A. Variational-lagrangian thermodynamics of evolution of collective chemical systems // Chemical Physics. 1978. V. 29. № 1-2. Pp. 97-115. DOI: 10.1016/0301-0104(78)85064-2
15. Sieniutycz S. Variational thermomechanical processes and chemical reactions in distributed systems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. V. 40. № 14. Pp. 3467-3485. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00235-9
16. Yourgrau W., Raw C.J.G. Variational principles and chemical reactions // Il Nuovo Cimento. 1957. V. 5(3). Pp. 472-478. DOI: 10.1007/BF02743932
17. Sieniutycz S., Shiner J.S. Variational and extremum properties of homogeneous chemical kinetics. I. Lagrangian and Hamiltonian-like formulations // Open Systems & Information Dynamics. 1992. V. 1. № 2. Pp. 149-182. DOI: 10.1007/BF02228941
18. Быков В.И., Старостин И.Е. Квазиградиентные модели динамики процессов горения в закрытых системах // ДАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 53-56. DOI: 10.7868/S0869565213190158

19. Mielke A. A gradient structure for reaction-diffusion systems and for energy-drift-diffusion systems // *Nonlinearity*. 2011. V. 24. Pp. 1329-1346. DOI: 10.1088/0951-7715/24/4/016
20. Parmon V.N. Catalysis and non-equilibrium thermodynamics: modern in situ studies and new theoretical approaches // *Catalysis Today*. 1999. V. 51. Pp. 435-456. DOI: 10.1016/S0920-5861(99)00032-2
21. Martyushev L.M., Seleznev V.D. Maximum entropy production: application to crystal growth and chemical kinetics // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2015. V. 7. Pp. 23-31. DOI: 10.1016/j.coche.2014.10.003
22. Moroz A. A variational framework for nonlinear chemical thermodynamics employing the maximum energy dissipation principle // *Journal of Physical Chemistry B*. 2009. V. 113. Pp. 8086-8090. DOI: 10.1021/jp9015646
23. Ross J., Corlan A.D., Muller S.C. Proposed Principles of Maximum Local Entropy Production // *Journal of Physical Chemistry B*. 2012. V. 116. № 27. Pp. 7858-7865. DOI: 10.1021/jp302088y
24. Lebiedz D. Computing minimal entropy production trajectories: An approach to model reduction in chemical kinetics // *Journal of Chemical Physics*. 2004. V. 120. Pp. 6890. DOI: 10.1063/1.1652428
25. Reinhardt V., Winckler M., Lebiedz D. Approximation of Slow Attracting Manifolds in Chemical Kinetics by Trajectory-Based Optimization Approaches // *Journal of Physical Chemistry A*. 2008. V. 112. № 8. Pp. 1712-1718. DOI: 10.1021/jp0739925
26. Lebiedz D., Reinhardt V., Siehr J. Minimal curvature trajectories: Riemann geometry concepts for slow manifold computation in chemical kinetics // *Journal of Computational Physics*. 2010. V. 229. Pp. 6512-6533. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.05.008
27. Lebiedz D. Entropy-related extremum principles for model reduction of dissipative dynamical systems // *Entropy*. 2010. V. 12. Pp. 706-719. DOI: 10.3390/e12040706
28. Pantoleonos G., Basinas P., Skodras G., Grammelis P., J.D. Pinter, Topis S., G.P. Sakellariopoulos A global optimization study on the devolatilisation kinetics of coal, biomass and waste fuels // *Fuel Processing Technology*. 2009. V. 90. Pp. 762-769. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.03.011
29. Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В. Развитие вариационного подхода для прямых и обратных задач гидротермодинамики и химии атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 3. С. 358-367. DOI: 10.7868/S0002351515030098
30. Sirdeshpande A.R., Ierapetritou M.G., Androulakis I.P. Design of flexible reduced kinetic mechanisms // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2001. V. 47. № 11. Pp. 2461-2473. DOI: 10.1002/aic.690471110
31. Вольперт В.А., Вольперт Вл.В., Давтян Д.С. Применение минимаксного метода в задачах горения // *Физика горения и взрыва*. 1990. № 4. С. 3-8.
32. Stevens A., Papanicolaou G., Heinze S. Variational Principles for Propagation Speeds in Inhomogeneous Media // *SIAM Journal of Applied Mathematics*. 2001. V. 62. № 1. Pp. 129-148. DOI: 10.1137/S0036139999361148
33. Benguria R.D., Depassier M.C. Variational Principles for the Speed of Traveling Fronts of Reaction-Diffusion Equations // *Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems*. Elsevier. 2005. Pp. 339-354. DOI: 10.1016/B978-008044488-8/50019-9
34. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations. NY: Wiley-Interscience. 1977. 491 p.

35. Strieder W., Aris R. Variational Bounds for Problems in Diffusion and Reaction // IMA Journal of Applied Mathematics. 1971. V. 8. № 3. Pp. 328–334. DOI: 10.1093/imamat/8.3.328
36. Graham-Eagle J.G., Wake G.C. Theory of thermal explosions with simultaneous parallel reactions. II. The two- and three-dimensional cases and the variational method // Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1985. V. 401. Pp. 195–202. DOI: 10.1098/rspa.1985.0094
37. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Вариационная форма модели теплового взрыва в твердом теле с зависящей от температуры теплопроводностью // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 235–240. DOI: 10.7868/S0040364418020102
38. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Y. Variational estimates of the parameters of a thermal explosion of a stationary medium in an arbitrary domain // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 135. Pp. 614–619. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.009
39. Miura K., Maki T. A Simple Method for Estimating $f(E)$ and $k_0(E)$ in the Distributed Activation Energy Model // Energy and Fuels. 1998. V. 12. № 5. Pp. 864–869. DOI: 10.1021/ef970212q
40. Деревич И.В., Галдина Д.Д. Влияние временной структуры флуктуаций температуры газа на воспламенение мелкодисперсных частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 6. С. 935–949.
41. Гринчук П.С. Влияние стохастичности пространственного распределения частиц газовзвеси на распространение фронта пламени // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 32–42.

UDK 517.972.5; 544.45

NUMERICAL ESTIMATION OF CRITICAL CONDITIONS IN THERMAL EXPLOSION PROBLEM FOR A MEDIUM WITH FLUCTUATIONS OF REACTIVITY

Igor G. Donskoy

Cand. Sci., Senior Researcher in Laboratory of Thermodynamics,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru,

Melentiev Energy Systems Institute,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontova st., 664033, Irkutsk, Russia.

Annotation. The problem of a thermal explosion in a medium with fluctuations in reactivity, which are specified through the distribution function for the activation energy, is formulated. A variational formulation is proposed for the differential equation describing the stationary temperature distribution in such a medium. Using a simple test function, the dependence of the variational functional on the value of the maximum temperature is numerically investigated. The critical conditions for a thermal explosion correspond to the appearance of an inflection point on this curve. Calculations show that an increase in the dispersion of the reactivity distribution the stability of the system decreases due to shift of the apparent activation energy of the chemical reaction.

Keywords. thermal explosion, inverse variational problem, critical conditions, numerical solution

Acknowledgements. The research was carried at the MESI SB RAS under the program for basic research of the SB RAS (project ID FWEU-2021-0005, reg. No. AAAA-A21-121012190004-5).

REFERENCES

1. Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and heat exchange in chemical kinetics. Princeton Univ. Press. 2015. 370 p.
2. Kahm W., Vassiliadis V.S. Thermal stability criterion integrated in model predictive control for batch reactors // Chemical Engineering Science. 2018. V. 188. Pp. 192-207. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.032
3. Shechter R.S. The variational method in engineering. McGraw-Hill. 1967. 287 p.
4. Gafiichuk V.V., Lubashevskii I.A. Variational principles of dissipative systems // Journal of Soviet Mathematics. 1993. V. 67. № 2. Pp. 2943-2949. DOI: 10.1007/BF01095874
5. Maximov G.A. Obobshchennyy variatsionnyy printsip dlya dissipativnoy gidrodinamiki i mekhaniki sploshnoy sredy [Generalized variational principle in dissipative hydrodynamics and continuum mechanics] // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred = Computational Continuum Mechanics. 2009. V. 2. № 4. Pp. 92. DOI: 10.7242/1999-6691/2009.2.4.34
6. Fukugawa H., Fujitani Y. A Variational Principle for Dissipative Fluid Dynamics // Progress in Theoretical Physics. 2012. V. 127. № 5. Pp. 921-935. DOI: 10.1143/PTP.127.921
7. Finlayson B.A., Scriven L.E. On the search for variational principles // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1967. V. 10. № 6. Pp. 799-821. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90139-1
8. A variational principle for gradient flows in metric spaces / R. Rossi, G. Savare, A. Segatti, U. Stefanelli // Comptes Rendus Mathematique. 2011. V. 349. № 23-24. Pp. 1225-1228. DOI: 10.1016/j.crma.2011.11.002
9. Glansdorf P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. NY: Wiley-Interscience. 1971. 305 p.
10. Yang C.T. Variational Theories in Hydrodynamics and Hydraulics // Journal of Hydraulic Engineering. 1994. V. 120. № 6. Pp. 737. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:6(737)
11. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A. Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems // Advances in chemical engineering. Volume 39. Thermodynamics and kinetics of complex systems. Elsevier. 2010. Pp. 1-74. DOI: 10.1016/S0065-2377(10)39001-6
12. Kerner E.H. Dynamical aspects of kinetics // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1964. V. 26. № 4. Pp. 333-349. DOI: 10.1007/BF02484234
13. Orlov V.N., Rozonoer L.I. Variatsionnyy printsip dlya uravneniya makroskopicheskoy dinamiki i yego prilozheniye v khimicheskoy kinetike [Variational principle for macroscopic dynamics equation and its application in chemical kinetics] // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1981. V. 21. № 5. Pp. 1192. [in Russian]
14. Biot M.A. Variational-lagrangian thermodynamics of evolution of collective chemical systems // Chemical Physics. 1978. V. 29. № 1-2. Pp. 97-115. DOI: 10.1016/0301-0104(78)85064-2
15. Sieniutycz S. Variational thermomechanical processes and chemical reactions in distributed systems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. V. 40. № 14. Pp. 3467-3485. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00235-9
16. Yourgrau W., Raw C.J.G. Variational principles and chemical reactions // Il Nuovo Cimento. 1957. V. 5(3). Pp. 472-478. DOI: 10.1007/BF02743932

17. Sieniutycz S., Shiner J.S. Variational and extremum properties of homogeneous chemical kinetics. I. Lagrangian- and Hamiltonian-like formulations // *Open Systems & Information Dynamics*. 1992. V. 1. № 2. Pp. 149-182. DOI: 10.1007/BF02228941
18. Bykov V.I., Starostin I.E. Kvazigradiyentnyye modeli dinamiki protsessov goreniya v zakrytykh sistemakh [Quasi-gradient models of the dynamics of combustion processes in closed systems] // *DAN = Doklady Physical Chemistry*. 2013. V. 451. № 1. Pp. 150-153. DOI: 10.1134/S0012501613070026
19. Mielke A. A gradient structure for reaction-diffusion systems and for energy-drift-diffusion systems // *Nonlinearity*. 2011. V. 24. Pp. 1329-1346. DOI: 10.1088/0951-7715/24/4/016
20. Parmon V.N. Catalysis and non-equilibrium thermodynamics: modern in situ studies and new theoretical approaches // *Catalysis Today*. 1999. V. 51. Pp. 435-456. DOI: 10.1016/S0920-5861(99)00032-2
21. Martyushev L.M., Seleznev V.D. Maximum entropy production: application to crystal growth and chemical kinetics // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2015. V. 7. Pp. 23-31. DOI: 10.1016/j.coche.2014.10.003
22. Moroz A. A variational framework for nonlinear chemical thermodynamics employing the maximum energy dissipation principle // *Journal of Physical Chemistry B*. 2009. V. 113. Pp. 8086-8090. DOI: 10.1021/jp9015646
23. Ross J., Corlan A.D., Muller S.C. Proposed Principles of Maximum Local Entropy Production // *Journal of Physical Chemistry B*. 2012. V. 116. № 27. Pp. 7858-7865. DOI: 10.1021/jp302088y
24. Lebiedz D. Computing minimal entropy production trajectories: An approach to model reduction in chemical kinetics // *Journal of Chemical Physics*. 2004. V. 120. Pp. 6890. DOI: 10.1063/1.1652428
25. Reinhardt V., Winckler M., Lebiedz D. Approximation of Slow Attracting Manifolds in Chemical Kinetics by Trajectory-Based Optimization Approaches // *Journal of Physical Chemistry A*. 2008. V. 112. № 8. Pp. 1712-1718. DOI: 10.1021/jp0739925
26. Lebiedz D., Reinhardt V., Siehr J. Minimal curvature trajectories: Riemann geometry concepts for slow manifold computation in chemical kinetics // *Journal of Computational Physics*. 2010. V. 229. Pp. 6512-6533. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.05.008
27. Lebiedz D. Entropy-related extremum principles for model reduction of dissipative dynamical systems // *Entropy*. 2010. V. 12. Pp. 706-719. DOI: 10.3390/e12040706
28. Pantoleontos G., Basinas P., Skodras G., Grammelis P., J.D. Pinter, Topis S., G.P. Sakellariopoulos A global optimization study on the devolatilisation kinetics of coal, biomass and waste fuels // *Fuel Processing Technology*. 2009. V. 90. Pp. 762-769. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.03.011
29. Penenko V.E., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Razvitiye variatsionnogo podkhoda dlya pryamykh i obratnykh zadach gidrotermodynamiki i khimii atmosfery [Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrodynamics and chemistry] // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya RAN. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. Pp. 311. DOI: 10.1134/S0001433815030093
30. Sirdeshpande A.R., Ierapetritou M.G., Androulakis I.P. Design of flexible reduced kinetic mechanisms // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2001. V. 47. № 11. Pp. 2461-2473. DOI: 10.1002/aic.690471110
31. Vol'pert V.A., Vol'pert V.I., Davtyan D.S. Primeneniye minimaksnogo metoda v zadachakh goreniya [Application of a minimax method in combustion problems] // *Fizika goreniya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*. 1990. V. 26. Pp. 371-376. DOI: 10.1007/BF00745072

32. Stevens A., Papanicolaou G., Heinze S. Variational Principles for Propagation Speeds in Inhomogeneous Media // SIAM Journal of Applied Mathematics. 2001. V. 62. № 1. Pp. 129-148. DOI: 10.1137/S0036139999361148
33. Benguria R.D., Depassier M.C. Variational Principles for the Speed of Traveling Fronts of Reaction–Diffusion Equations // Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems. Elsevier. 2005. Pp. 339-354. DOI: 10.1016/B978-008044488-8/50019-9
34. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations. NY: Wiley-Interscience. 1977. 491 p.
35. Strieder W., Aris R. Variational Bounds for Problems in Diffusion and Reaction // IMA Journal of Applied Mathematics. 1971. V. 8. № 3. Pp. 328–334. DOI: 10.1093/imamat/8.3.328
36. Graham-Eagle J.G., Wake G.C. Theory of thermal explosions with simultaneous parallel reactions. II. The two- and three-dimensional cases and the variational method // Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1985. V. 401. Pp. 195-202. DOI: 10.1098/rspa.1985.0094
1. 37 Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savel'eva I.Y. Variatsionnaya forma modeli teplovogo vzryva v tverdom tele s zavislyashchey ot temperatury teploprovodnost'yu [The Variational Form of the Mathematical Model of a Thermal Explosion in a Solid Body with Temperature-Dependent Thermal Conductivity] // Teplofizika vysokikh temperature = High Temperature Thermal Physics. 2018. V. 56. Pp. 223-228. DOI: 10.1134/S0018151X18010212
37. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Y. Variational estimates of the parameters of a thermal explosion of a stationary medium in an arbitrary domain // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 135. Pp. 614-619. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.009
38. Miura K., Maki T. A Simple Method for Estimating $f(E)$ and $k_0(E)$ in the Distributed Activation Energy Model // Energy and Fuels. 1998. V. 12. № 5. Pp. 864-869. DOI: 10.1021/ef970212q
39. Derevich I.V., Galdina D.D. Vliyaniye vremennoy struktury fluktuatsiy temperatury gaza na vosplameneniye melkodispersnykh chastits [Temporal structure of gas temperature fluctuations and ignition of fine particles] // Teplofizika i aeromekhanika = Thermal physics and aeromechanics. 2016. V. 23. Pp. 899-912. DOI: 10.1134/S0869864316060123
40. Grinchuk P.S. Vliyaniye stokhastichnosti prostranstvennogo raspredeleniya chastits gazovzvesi na rasprostraneniye fronta plameni [Effect of stochasticity of the spatial distribution of particles in a gas suspension on combustion front propagation] // Fizika goreniya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion. 2014. V. 50. Pp. 272-281. DOI: 10.1134/S0010508214030046

ИНТЕГРАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СТРУКТУРУ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Зорина Татьяна Геннадьевна

д.э.н., зав. сектором «Экономика энергетики», e-mail: tanyazorina@tut.by,

Институт энергетики НАН Беларуси,
220072 г. Минск, ул. Академическая, 15/2.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы развития возобновляемой энергетики в Республике Беларусь. Построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, собрана база исходных данных для моделирования энергопроизводства электрической энергии на среднесрочный период в программе MESSAGE. Построены три сценария развития возобновляемой энергетики в Республики Беларусь, которые предусматривают разную долю возобновляемых источников в общей структуре энергопроизводства. Выполнены прогнозы производства электрической энергии в энергетической системе Республики Беларусь на период до 2030 г. согласно выбранным сценариям. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования по следующим критериям: структура энергопроизводства, объемы и структура вводимых мощностей, производственная себестоимость электрической энергии.

Ключевые слова: структура энергопроизводства, возобновляемые источники энергии, MESSAGE, сценарное моделирование, энергетическая система Республики Беларусь, производственная себестоимость электрической энергии.

Цитирование: Зорина Т. Г. Интеграция возобновляемых источников энергии в структуру энергопроизводства республики Беларусь: сценарное моделирование // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С 66-79. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.006

Введение. За десять лет в мире установленная мощность источников, использующих ВИЭ, увеличилась в два раза. Несмотря на столь активное развитие, возобновляемые источники энергии все еще не способны покрыть прирост потребления энергии за аналогичный промежуток времени. Если за прошедшее десятилетие прирост выработки электроэнергии из ВИЭ составил 2,5 ТВт·ч, то прирост потребления электроэнергии в мире – почти 7 ТВт·ч. Этот факт свидетельствует о неизбежном росте потребления невозобновляемых источников энергии, что будет способствовать увеличению скорости их истощения, еще большему загрязнению окружающей среды и повышению прочих рисков, связанных с обеспечением населения планеты энергией. Чтобы сохранить уровень потребления невозобновляемых источников энергии на прежнем уровне, необходимо более активное строительство источников ВИЭ, которые увеличат долю производства энергии из ВИЭ в 2,5–3 раза. По мнению экспертов, для достижения поставленных в рамках борьбы с изменениями климата глобальных целей прирост мощностей возобновляемой энергетики должен увеличиться в шесть раз.

Интенсивность развития возобновляемой энергетики в Республике Беларусь уступает общемировому темпу почти в три раза. Прирост электроэнергии, произведенной ВИЭ, в размере 0,7 ТВт·ч намного меньше изменения потребления электроэнергии в стране, рост которого за тот же десятилетний промежуток составил 5,3 ТВт·ч [1].

Создание базы данных для моделирования. Для моделирования сценариев энергопроизводства Республики Беларусь в период с 2021 по 2030 гг. использовалась программа MESSAGE. Критерием, определяющим процесс расчета, в программе MESSAGE является функция оптимизации эксплуатационных затрат.

Для моделирования сценариев функционирования рынка была собрана база данных, включающая:

- 1) установленную мощность всех энергогенерирующих источников в Республике Беларусь;
- 2) инвестиционные затраты, переменные и постоянные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь (табл. 1, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- 3) цены на основные энергоресурсы в Республике Беларусь (табл.2, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- 4) прогнозируемый объем потребления электроэнергии на период до 2030 года (рис. 1, по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь).

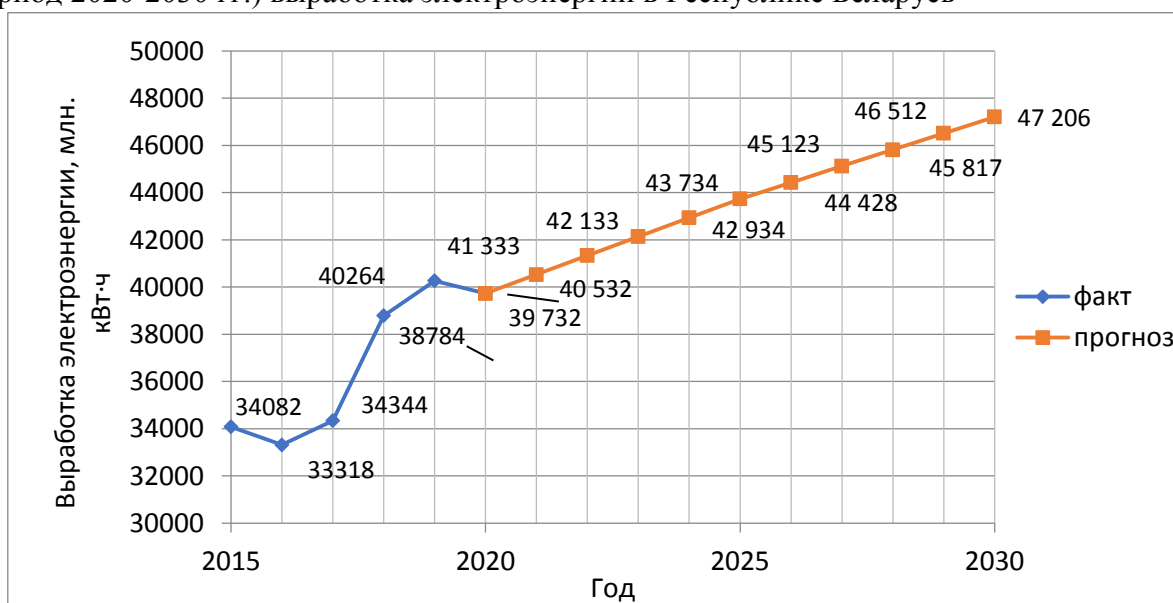
Таблица 1. Инвестиционные затраты, постоянные и переменные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь.

Энергоисточник	Инвестиционные затраты, долл. США/кВт	Постоянные издержки, долл. США/кВт/год	Переменные издержки, долл. США/ГВт·час
Лукомльская ГРЭС	700	10,34	2,39
Березовская ГРЭС	700	15,42	6,89
Минская ТЭЦ-5	1000	27,74	5,62
БелАЭС	5000	52	3
КЭС ПГУ большой мощности	750	14	28,4
Блок-станции	1400	24	10,5
Новые блок-станции	2289	73	44
ТЭЦ на МВТ	1200	24	10,5
ВЭУ	1740	57	0
СЭС	2366	15	0
Биогазовые блок-станции	3700	167	35
Минская ТЭЦ-4	800	32,83	15,66
Гомельская ТЭЦ	700	19,76	14,12
Бобруйская ТЭЦ-2	700	46,17	31,04
Гродненская ТЭЦ-2	700	61,01	38,89
Минская ТЭЦ-3	700	38,62	25,53
Могилевская ТЭЦ-2	800	27,61	27,16
Новополоцкая ТЭЦ	800	18,06	30,71
Мозырская ТЭЦ	700	33,91	40,1
Светлогорская ТЭЦ	700	31,36	32,38
Витебская ТЭЦ	700	45,92	39,28
Жодинская ТЭЦ	800	35,27	49,76
Оршанская ТЭЦ	800	48,89	34,31
Малые ТЭЦ	700	63,27	92,35
ГЭС	1508	30	3,5
ПГУ Минской ТЭЦ-3	900	12	24,5
Лидская ТЭЦ	750	18	42
Жлобинская ТЭЦ	1200	22	9,1
Блоки в ремонтном резерве	750	14,5	55,2

Таблица 2. Стоимость топлива в период 2015-2030 гг. в Республике Беларусь

Вид топлива	Газ природный, долл. США /тыс. м ³	Газ сжиженный, долл. США /тыс. м ³	Мазут топочный, долл. США /т	Мазут топочный (для населения), долл. США /т	Ядерное топливо, долл. США /кг	Древесина, долл. США /плотный м ³	Торф, долл. США /т
2015	196,80	235,05	312,74	219,18	37,31	20,62	26,34
2016	190,34	183,77	185,71	209,31	39,16	21,32	27,24
2017	183,13	162,58	186,98	207,89	41,12	21,95	28,04
2018	186,01	176,49	188,27	206,48	43,16	22,61	28,88
2019	183,13	182,51	189,55	205,07	45,32	23,26	29,73
2020	187,45	188,74	190,84	203,70	57,49	23,95	30,61
2021	201,53	195,19	192,13	202,34	47,59	24,54	31,36
2022	212,52	201,86	193,40	201,00	49,67	24,54	31,36
2023	221,98	208,76	194,46	199,90	49,67	24,54	31,36
2024	228,80	215,90	195,76	198,58	49,67	24,54	31,36
2025	234,47	223,28	197,04	197,29	49,67	24,54	31,36
2026	239,02	215,98	195,75	198,58	49,67	24,54	31,36
2027	243,18	218,38	196,18	198,15	49,67	24,54	31,36
2028	245,45	219,21	196,32	198,01	49,67	24,54	31,36
2029	246,26	217,86	196,08	198,25	49,67	24,54	31,36
2030	247,00	218,49	196,20	198,13	49,67	24,54	31,36

На рис. 1 представлена фактическая (период 2015-2019 гг.) и прогнозная согласно [2] (период 2020-2030 гг.) выработка электроэнергии в Республике Беларусь

**Рис.1.** Выработка электроэнергии в период 2015-2030 гг. в Республике Беларусь

Для прогнозирования структуры энергопроизводства была построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, которая схематично представлена на рис. 2.

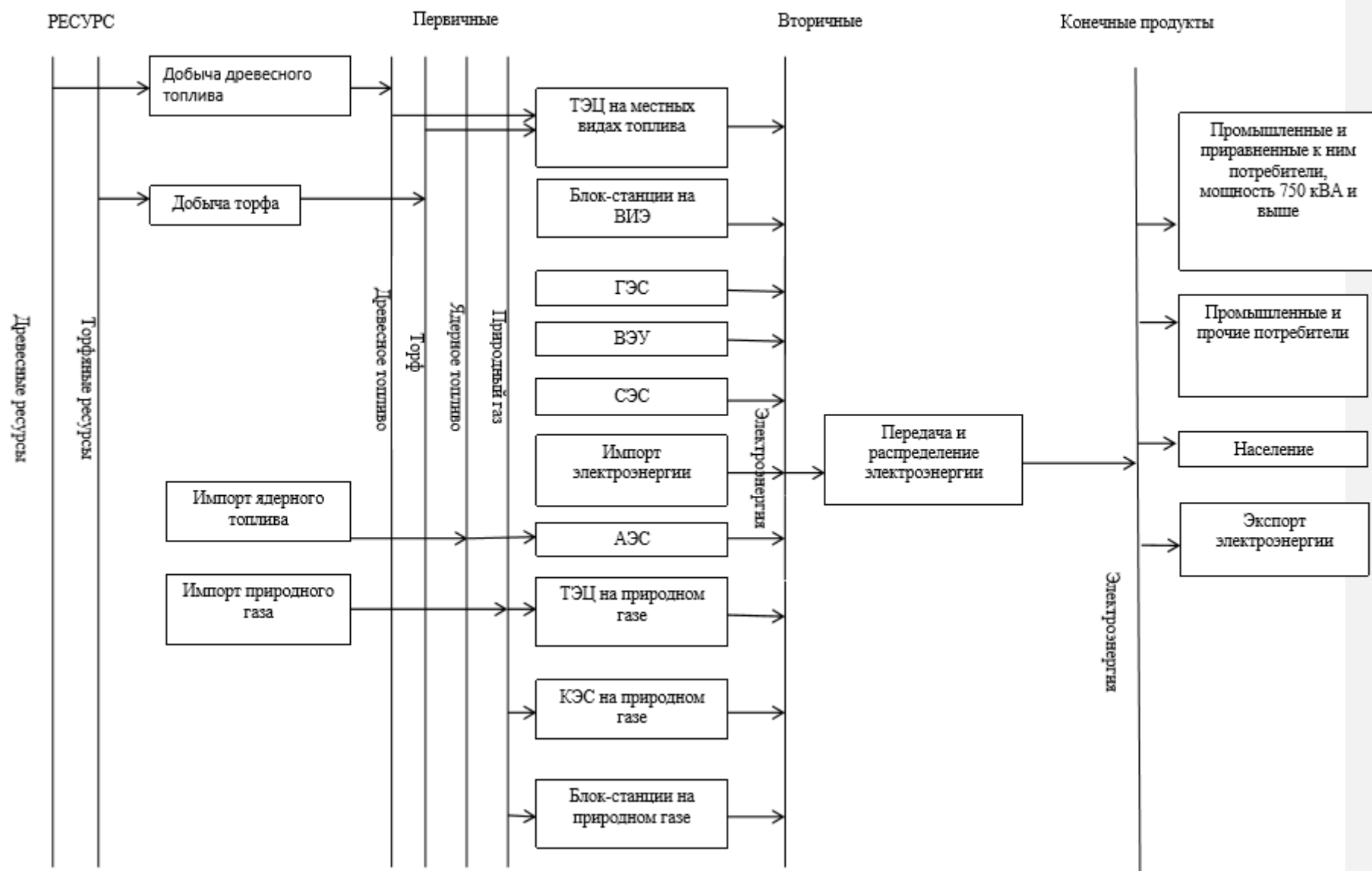


Рис. 2. Формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь

Объем централизованного и нецентрализованного производства тепловой энергии в стране относительно постоянен и обычно не превышает 70 млн. Гкал ежегодно [3]. Динамика производства тепловой энергии больше обусловлена климатическими факторами, чем особенностями развития энергосистемы и экономики.

Как видно из рис. 1, в процессе развития электроэнергетической системы Республики Беларусь объем выработки электроэнергии ежегодно возрастает. За период 2015-2019 гг. фактическая выработка возросла в 1,18 раза. В среднем ежегодно объем произведенной электроэнергии увеличивается на 1-2%, что свидетельствует о постепенном развитии отрасли. Согласно прогнозам в 2030 г. количество выработанной электроэнергии увеличится в 1,14 раза по отношению к 2019 г. и в 1,39 раза по отношению к 2015 г.

Рассмотрим фактическое производство тепловой энергии (рис. 3) и электрической энергии (рис. 4) с использованием возобновляемых источников энергии в период 2010-2019 гг. Республике Беларусь [4].

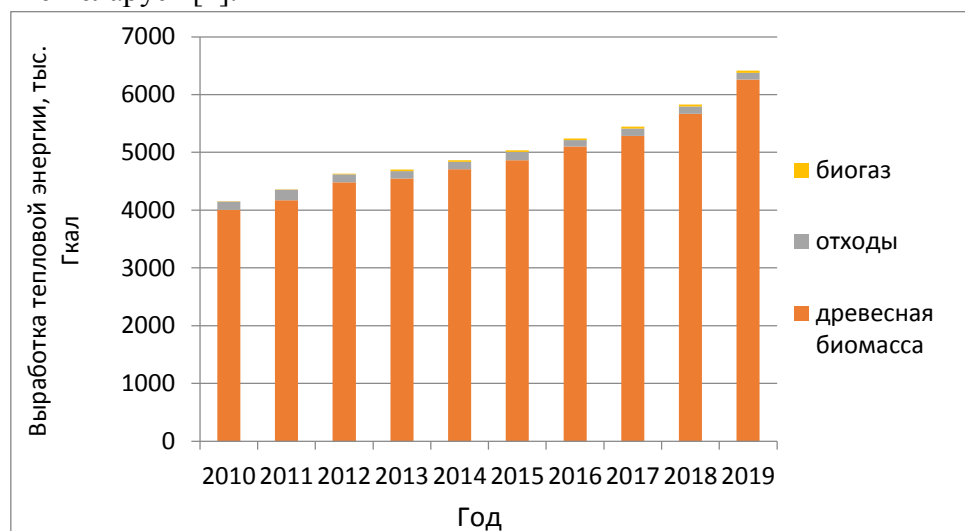


Рис. 3. Производство тепловой энергии с использованием возобновляемых источников энергии в период 2010-2019 гг. в Республике Беларусь

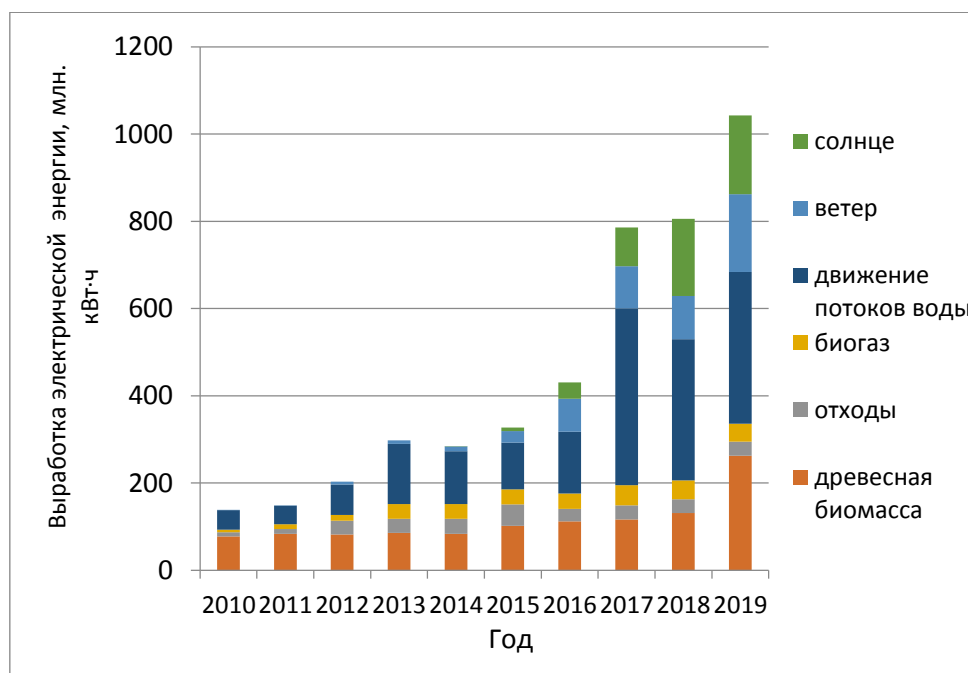


Рис. 4. Производство электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии в период 2010-2019 гг. в Республике Беларусь

При анализе графической информации, представленной на рис. 3 и 4, можно сделать заключение об интенсивном развитии возобновляемых источников энергии в 2010-2019 гг., особенно в период с 2015 г. Данное утверждение подтверждают следующие факты: производство тепловой энергии из возобновляемых источников энергии имеет ежегодный прирост в среднем в 4-7%, а средний прирост производства электрической энергии составляет более 25% по отношению к предыдущему году.

Рост производства энергии закономерно на протяжении исследуемого периода сопровождался ростом установленных мощностей. Рассмотрим динамику ввода новых мощностей в энергосистеме Республики Беларусь (рис. 5).

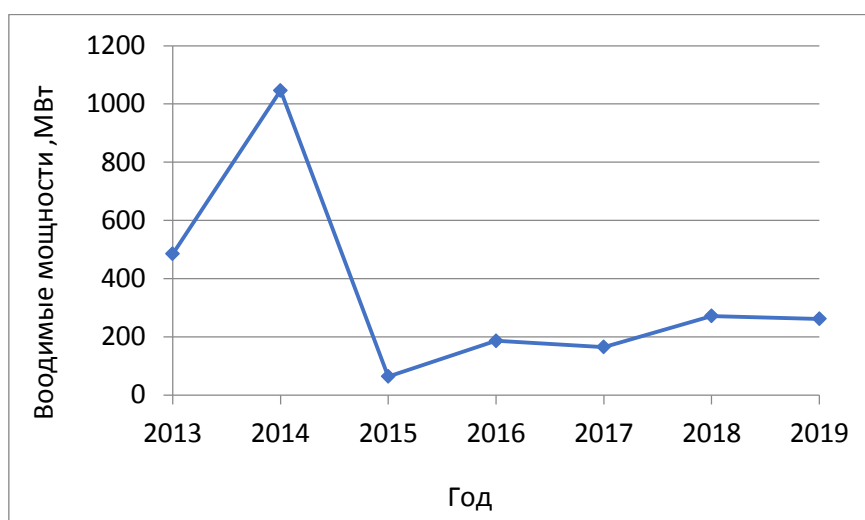


Рис. 5. Фактический ввод новых энергетических мощностей в Республике Беларусь в период 2013-2019 гг., МВт

Пик на рис. 5 соответствует вводу двух парогазовых установок на Лукомльской ГРЭС и Березовской ГРЭС мощностью по 427 МВт. Вводимые мощности в течение последующих лет невелики и составляют в среднем 0,5-2,5% от суммарной установленной мощности энергосистемы, что наряду с отсутствием импорта электроэнергии свидетельствует об отсутствии дефицита генерирующих мощностей в стране.

Рассмотрим ситуацию по возобновляемым источникам энергии. На рис. 6 и 7 представлены данные по приросту установленной мощности установок на различных ВИЭ согласно данным Международного энергетического агентства [4].

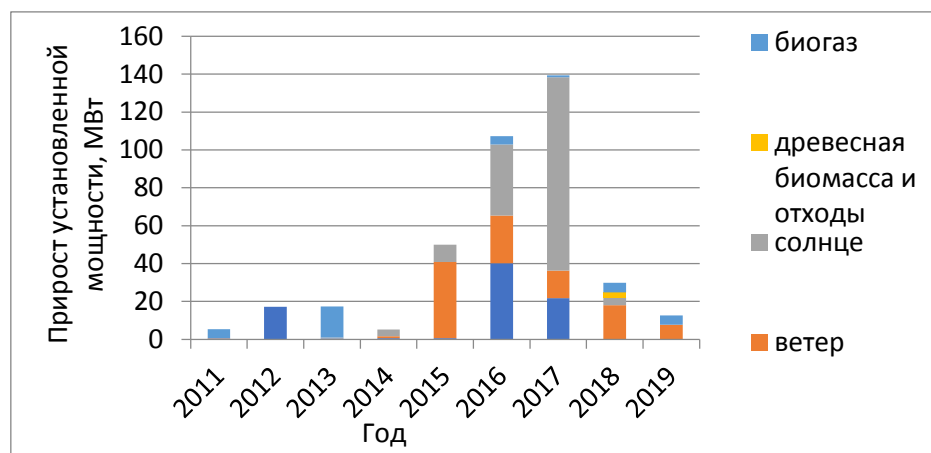


Рис. 6. Фактический прирост электрогенерирующих мощностей на возобновляемых источниках энергии, МВт

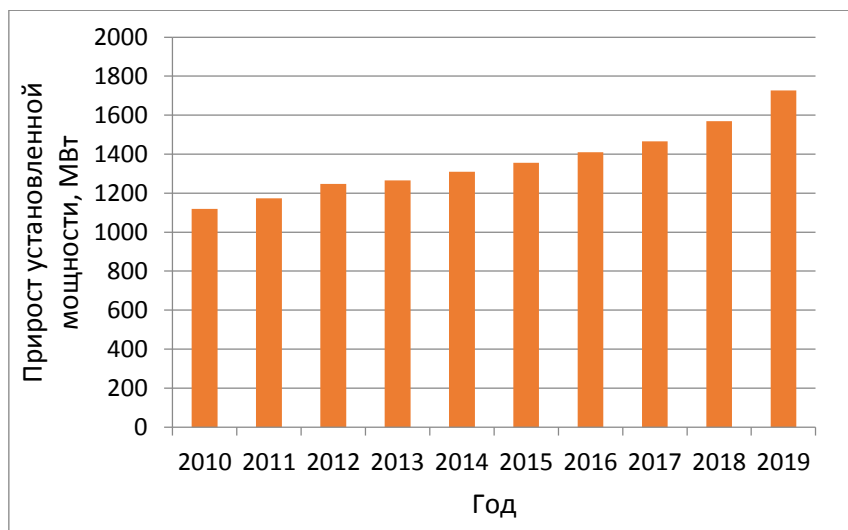


Рис. 7. Фактический прирост теплогенерирующих мощностей на возобновляемых источниках энергии, МВт

Построение сценариев.

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

Введем следующие переменные:

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

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

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

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

I_{et} - импорт энергии в период t ;

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

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

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

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

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

U_{lt} - величина спроса на энергию l в период t ;

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

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

$$f = \sum_l \sum_t (R_{mt} c_{mt} + I_{mt} ci_{mt}) + \sum_n \left(\sum_m \sum_t \left(\left(\sum_l U_{nmlt} \right) vom_{mt} \right) \right) + \sum_t \sum_l I_{et} ci_{et} \rightarrow \min \quad (1)$$

Ограничения можно разделить на несколько групп:

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

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

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

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

Здесь необходимо учесть взаимосвязь между параметрами:

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

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

3. Ограничения по потреблению сырья.

$$R_{mt} \leq \bar{R}_{mt} \quad (5)$$

4. Ограничение по спросу на энергию.

$$\sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} \geq U_{lt} \quad (6)$$

Левая часть ограничения описывает количество произведенной и закупленной энергии, правая – прогнозируемый спрос на энергию (электрическую либо тепловую) [8].

Для прогнозирования структуры энергопроизводства в программе MESSAGE были выбраны три сценария развития возобновляемой энергетики на период 2021-2030 г. Производство энергии из возобновляемых источников энергии по трем сценариям представлено в Таблице 3.

Таблица 3. Планируемое производство электрической энергии из ВИЭ в период 2011-2030 гг. в Республике Беларусь, ГВт·ч

Год	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Сценарий 1	863	965	1015	1048	1095	1145	1194	1244	1294	1344
Сценарий 2	1242	1300	1359	1417	1475	1600	1725	1850	1975	2100
Сценарий 3	1292	1410	1538	1677	1828	1987	2159	2346	2548	2767

Первый сценарий опирается на значения Индикатора №2 «Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР» согласно Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [5], а также прогноз топливно-энергетического баланса Республики Беларусь до 2030 г. [6]. На основе указанных выше документов был составлен прогноз ввода новых мощностей возобновляемых источников энергии, представленный на рис. 8.

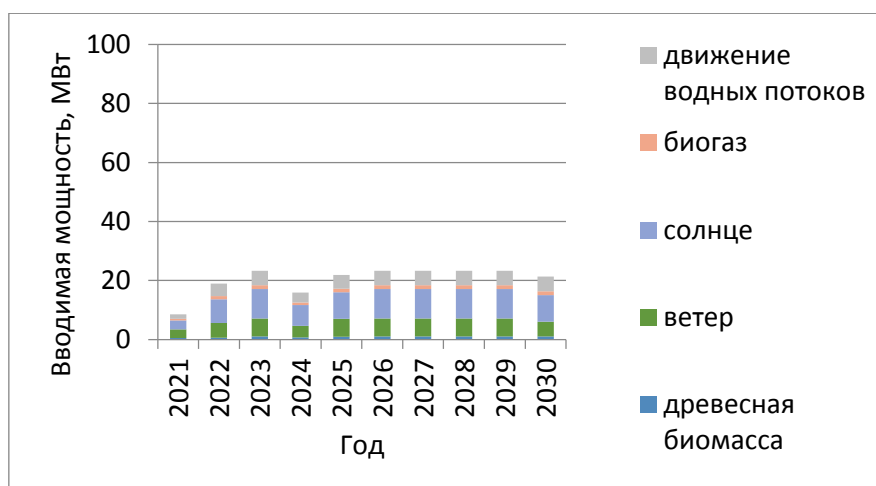


Рис. 8. Структура ввода новых энергетических мощностей возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 1, МВт

Второй сценарий соответствует Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, одобренной Постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 25 февраля 2020 г. № 7. В данной Концепции представлены фактические балансы производства электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь с 2010 г. и прогнозы балансов энергоресурсов, включая возобновляемые источники энергии до 2030 года [2]. На основе прогнозных значений объемов производства энергии был выполнен прогноз ввода новых мощностей возобновляемых источников энергии (рис. 9).

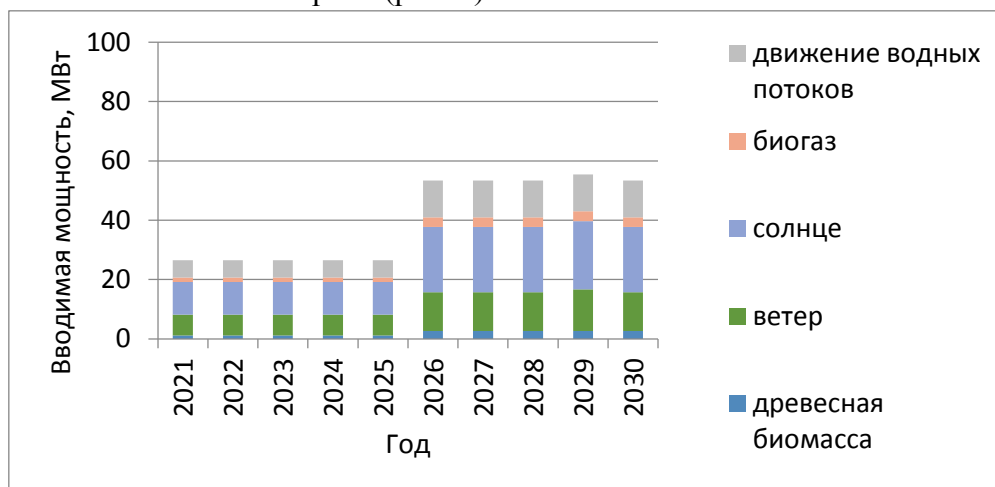


Рис. 9. Структура ввода новых энергетических мощностей возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 2, МВт

Третий сценарий построен с ориентацией на достижение Целей устойчивого развития к 2030 г. Международное энергетическое агентство произвело расчеты и сделало вывод о необходимости поддержания роста доли возобновляемых источников энергии как минимум на 7 % ежегодно в течение 2019-2030 гг. для достижения поставленных Целей устойчивого развития. Однако рост производства электроэнергии из возобновляемых источников в 2019 г. (6,5 %) был ниже, чем в 2018 г. (7 %), а это означает, что потребуются более активное внедрение технологий возобновляемой энергетики [7]. Таким образом, в основу данного сценария положен рост выработки энергии за счет возобновляемых источников на 7 % ежегодно. Вводимые в период с 2021 по 2030 г. объекты возобновляемой энергетики представлены согласно распределению их мощностей по годам на рис. 10.

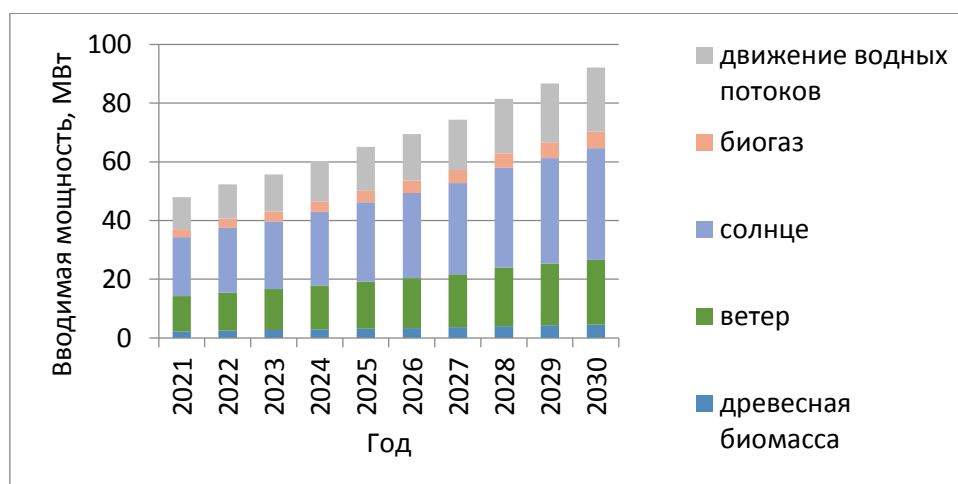


Рис. 10. Структура ввода новых энергетических мощностей возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 3, МВт

Результаты моделирования. По результатам моделирования прогнозная структура ввода энергетических мощностей в энергосистему Республики Беларусь в 2021-2030 гг. согласно всем сценариям характеризуется вводом второго блока БелаЭС мощностью 1200 МВт и блок-станций – мощностью около 200 МВт.

Относительно возобновляемой энергетики, согласно сценарию 1 наиболее активно и стабильно вводятся объекты солнечной энергетики, чуть менее активно и с изменениями по мощности – гидро- и ветровой энергетики. Источники, производящие энергию из биогаза и древесной биомассы, прогнозируются к вводу в незначительном объеме, что объясняется в том числе и ограниченностью потенциала.

Структура производства электрической энергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 1 представлена на рис. 11.

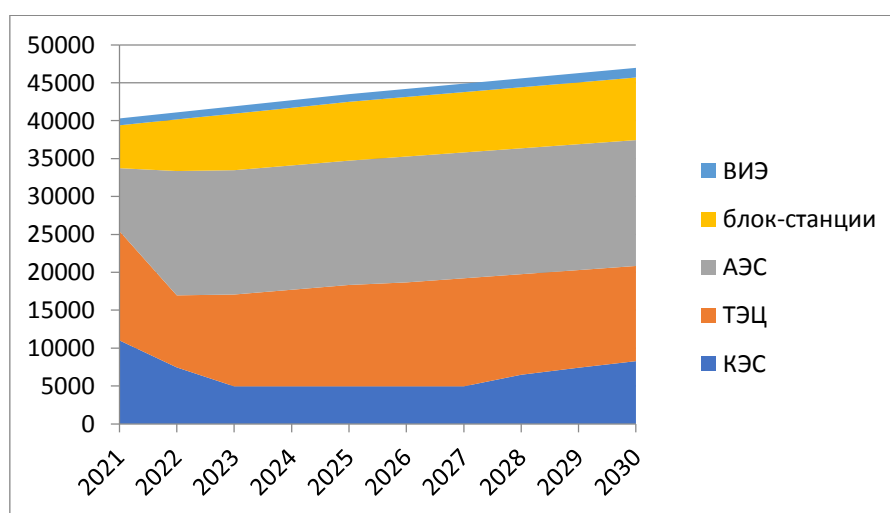


Рис. 11. Структура производства электрической энергии в Республике Беларусь в 2021-2030 гг. согласно сценарию 1, млн. кВт·ч

Структура производства электроэнергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 2 представлена на рис. 12.

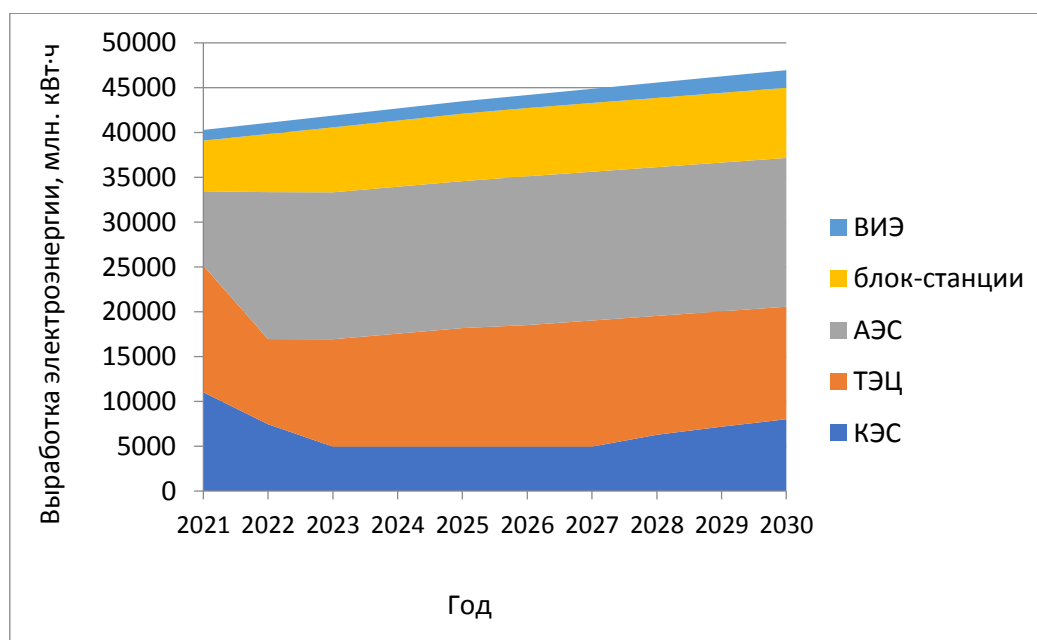


Рис. 12. Структура производства электрической энергии в Республике Беларусь в 2021-2030 гг. согласно сценарию 2, млн. кВт·ч

Доля вводимых объектов на возобновляемых источниках энергии в сценарии 3 к концу анализируемого периода становится равна половине вводимых блок-станций и приближается к 100 МВт ежегодно. В данном сценарии возобновляемые источники энергии развиваются с ежегодным увеличением вновь вводимых мощностей постепенно, без резких скачков. На первом месте по приросту мощности находится солнечная энергетика, далее следуют ветро- и гидроэнергетика, наименьший прирост наблюдается среди источников на биомассе и биогазе.

Структура производства электроэнергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. согласно сценарию 3 представлена на рис. 13.

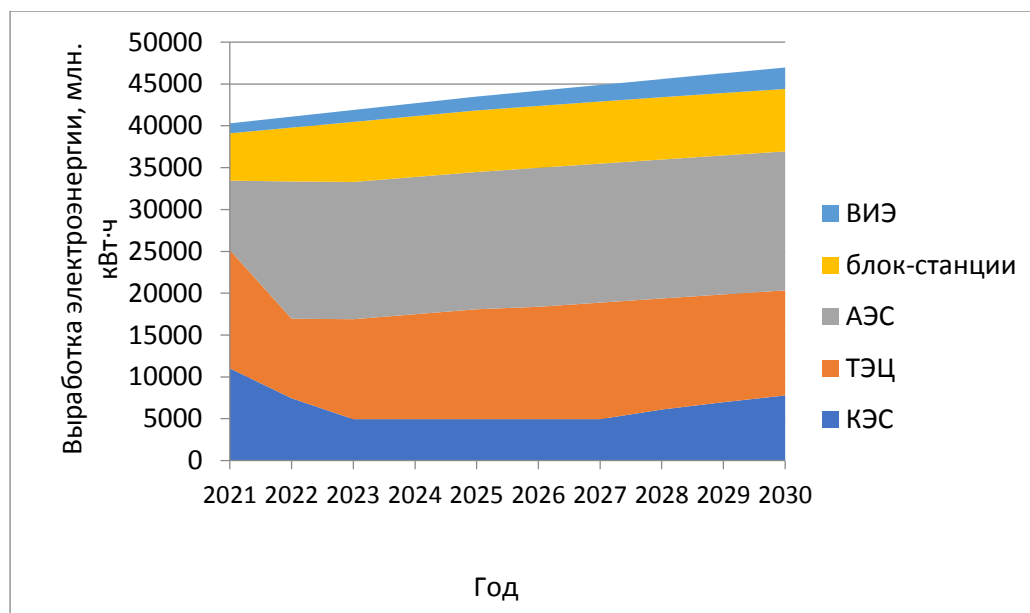


Рис. 13. Структура производства электрической энергии в Республике Беларусь в 2021-2030 гг. согласно сценарию 2, млн. кВт·ч

Анализ структуры производства электрической энергии в Республике Беларусь в период 2021-2030 гг. по трем сценариям (рис. 11-13) показывает, что с увеличением доли

возобновляемых источников в производстве энергии уменьшается доля в выработке на КЭС и блок-станциях, что снижает потребление импортируемого природного газа. Объем выработки электроэнергии на ТЭЦ и АЭС сохраняется постоянным.

Динамика производственной себестоимости электрической энергии в энергосистеме Республики Беларусь для трех сценариев в 2021-2030 гг. представлена на рис. 14.

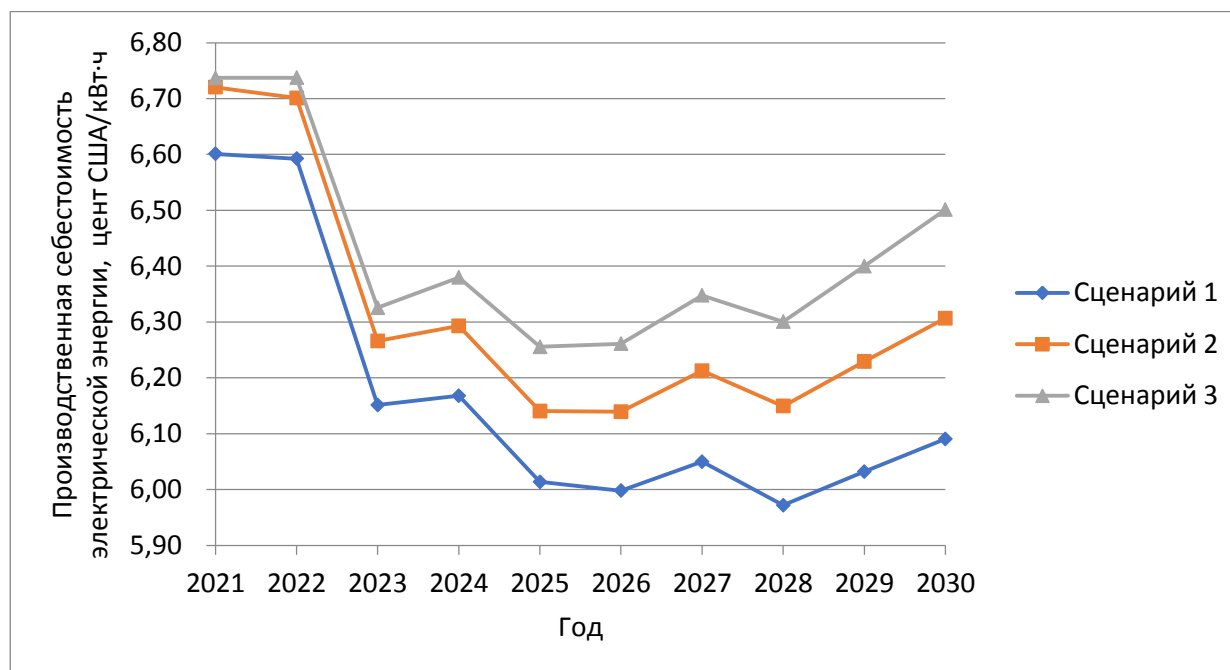


Рис. 14. Производственная себестоимость электрической энергии в энергосистеме Республики Беларусь в 2021-2030 гг., цент США/кВт·ч

Как видно из рис. 14, ввод возобновляемых источников энергии повышает производственную себестоимость электрической энергии (в сценарии 3 наибольший процент возобновляемых источников). Каждый дополнительный процент возобновляемых источников в структуре энергопроизводства повышает производственную себестоимость в среднем на 0,15 цент США/кВт·ч. Высокие значения себестоимости в 2021-2022 гг. можно объяснить вводом БелАЭС, что означает начало амортизационных отчислений и исполнения кредитных обязательств, и одновременным сохранением высокой доли КЭС. С 2023 г. себестоимость нормализуется. Небольшой последующий рост возникает по причине инвестиционных затрат в возобновляемые источники энергии, ежегодно вводимая мощность которых увеличивается к концу рассматриваемого периода (сценарии 2 и 3), а также увеличении доли КЭС в балансе с 2028 г.

Заключение. Результаты моделирования показали, что во всех трех сценариях наблюдаются схожие тенденции в развитии возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь на протяжении прогнозного периода: увеличение доли древесной биомассы и гидроэнергетики в производстве энергии и небольшое снижение остальных видов возобновляемых источников к 2030 г.

В структуре затрат на производство электрической энергии в энергосистеме Республики Беларусь в 2021-2030 гг. наблюдается закономерность, которую обеспечивают возобновляемые источники энергии. При большей доле возобновляемых источников в структуре энергопроизводства возрастают инвестиционные затраты, однако все прочие составляющие демонстрируют тенденцию к снижению. Особенно ярко выражена данная особенность в части топливных затрат. Учитывая тот факт, что практически все виды

топлива импортируются в Республику Беларусь, топливные затраты являются наименее предсказуемой составляющей при составлении прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любчик О.А., Александрович С.А., Зорина Т.Г., Хвацовас О.В. Оценка влияния возобновляемых источников энергии на энергетическую безопасность // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 11. С. 94–103.
2. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года. Приложение к постановлению Министерства энергетики Республики Беларусь 25 февраля 2020. № 7. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi (Дата доступа 09.03.2021).
3. Международное энергетическое агентство. Данные и статистика. Режим доступа: <https://www.iea.org/dataandstatistics/?country=BELARUS&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=HeatGenByFuel> (Дата доступа 16.03.2021).
4. Международное энергетическое агентство. Возобновляемые источники энергии. Режим доступа: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables> (Дата доступа 16.03.2021).
5. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: утв. пост. Совета Министров Республики Беларусь 23.12.2015. № 1084 // Консультант Плюс: Беларусь. Технология 3000 // ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информации Республики Беларусь.
6. Пояснительная записка к проекту прогноза топливно-энергетического баланса Республики Беларусь до 2030 года. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi/ (Дата доступа 06.03.2021).
7. Generation from renewable sources continues to grow but acceleration is needed to reach 2030 targets. Availabel at: <https://www.iea.org/reports/renewable-power> (Date of access 06.03.2021).
8. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. – Vienna, 2004. – 244 p.

UDK 620.92

INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE ENERGY PRODUCTION STRUCTURE OF THE REPUBLIC OF BELARUS: SCENARIO SIMULATION

Tatsiana G. Zoryna

Dr., Head of Sector " Energy Economics ", e-mail: tanyazorina@tut.by,
Institute of power engineering of the National Academy of Sciences of Belarus of Belarus
15/2, Akademicheskaya st., 220072, Minsk, Republic of Belarus.

Annotation. The article deals with the development of renewable energy in the Republic of Belarus. A formalized model of the energy system of the Republic of Belarus has been built, a base of initial data has been collected for modeling energy production of electrical energy for a medium-term period in the MESSAGE program. Three scenarios for the development of renewable energy in the Republic of Belarus have been constructed, which provide for a different share of renewable sources in the overall structure of energy production. Forecasts of electricity production in the energy system of the Republic of Belarus for the period up to 2030 have been made according to the selected scenarios. A comparative

analysis of the simulation results was carried out according to the following criteria: structure of energy production, volumes and structure of commissioned capacities, production cost of electric energy.

Keywords. structure of energy production, renewable energy sources, MESSAGE, scenario modeling, energy system of the Republic of Belarus, production cost of electrical energy.

REFERENCES

1. Lyubchik O.A., Aleksandrovich S.A., Zoryna T.G., Hvacovas O.V. Ocenka vliyaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii na energeticheskuyu bezopasnost' [Assessment of the impact of renewable energy sources on energy security] // *Аl'ternativnaya energetika i ekologiya* = Alternative energy and ecology. 2020. № 11. P. 94–103 (in Russian).
2. Konceptiya razvitiya elektrogeneriruyushchih moshchnostej i elektricheskikh setej na period do 2030 goda. Prilozhenie k postanovleniyu Ministerstva energetiki Respubliki Belarus' 25 fevralya 2020 [Concept for the development of electricity generating capacities and electric networks for the period up to 2030. Appendix to the resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus on February 25] № 7. Availabel at: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi (accessed: 09.03.2021) (in Russian).
3. International Energy Agency. Data and statistics [International Energy Agency. Data and statistics] Availabel at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=BELARUS&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=HeatGenByFuel> (accessed: 16.03.2021).
4. International Energy Agency. Renewable energy sources [International Energy Agency. Renewable energy sources] Availabel at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. (accessed: 16.03.2021).
5. Konceptiya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus': utv. post. Soveta Ministrov Respubliki Belarus'. 23.12.2015 [Concept of energy security of the Republic of Belarus: approved. fast. Council of Ministers of the Republic of Belarus 23.12.2015]. № 1084. / Konsul'tant Plyus: Belarus'. Tekhnologiya 3000 / ООО «YUrSpektr», Nac. centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'= LLC "YurSpektr", Nat. center of legal information of the Republic of Belarus. (in Russian).
6. Poyasnitel'naya zapiska k proektu prognoza toplivno-energeticheskogo balansa Respubliki Belarus' do 2030 goda [Explanatory note to the draft forecast of the fuel and energy balance of the Republic of Belarus until 2030] Availabel at: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi/ (accessed: 06.03.2021) (in Russian).
7. Generation from renewable sources continues to grow but acceleration is needed to reach 2030 targets. Availabel at: <https://www.iea.org/reports/renewable-power> (accessed: 06.03.2021).
8. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. – Vienna, 2004. – 244 p.

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, ЗНАЧИМОСТИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Берберова Мария Александровна,

к.т.н., научный сотрудник АНО «Международный Центр по ядерной безопасности»,

доцент РТУ МИРЭА, e-mail: maria.berberova@gmail.com,

Москва, Малая Красносельская ул., 2/8, корп. 7

Балута Виктор Иванович

к.т.н., с.н.с., Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН,

e-mail: Vbaluta@yandex.ru

Москва, Миусская пл., д. 4

Аннотация. Атомные электростанции (АЭС) вследствие накопления в процессе эксплуатации значительных количеств радиоактивных продуктов и наличия принципиальной возможности выхода их при авариях за предусмотренные границы представляют собой источник потенциальной опасности или источник риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Степень радиационного риска прямо зависит от уровня безопасности АЭС, которая является одним из основных свойств АЭС, определяющих возможность их использования в качестве источников тепловой и электрической энергии. Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) АЭС представляет собой комплексный, всесторонний системный анализ безопасности, в процессе которого разрабатываются вероятностные модели для определения конечных состояний с повреждением источников радиоактивности и конечных состояний АЭС с превышением установленных пределов по выбросам радиоактивных продуктов и радиационному воздействию на население и окружающую среду и определяются значения вероятностных показателей безопасности. Результаты ВАБ используются для качественных и количественных оценок достигнутого уровня безопасности, а также для выработки и принятия решений при проектировании и эксплуатации АЭС.

Ключевые слова: неопределенность, значимость, чувствительность, ВАБ, АЭС.

Цитирование: Берберова М. А., Балута В.И. Анализ неопределенности, значимости и чувствительности результатов вероятностного анализа безопасности АЭС //Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С.80-93. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.007

Введение. В настоящей работе рассматривается два типа неопределенностей при проведении ВАБ, а именно вероятностная и детерминистическая.

Источниками вероятностных неопределенностей являются: 1) стохастический характер и изменчивость данных, используемых для оценки вероятностных показателей: (например, оценки параметров статистической модели базовых событий); 2) недостаточность знания явлений и процессов в ходе развития последовательности аварии.

Источниками детерминистических неопределенностей являются: а) неопределенности при идентификации и классификации событий (например, в ВАБ 1-го уровня (ВАБ-1) рассматриваются не все возможные события); б) неопределенности в описании сценариев аварийной последовательности (АП) (например, в ВАБ-1 рассматриваются не все начальные условия или условия продолжения аварии); с) неопределенности в принятии критериев успеха (например, в ВАБ не рассматриваются достижение максимума снижения температуры или максимума снижения окисления).

1. Анализ неопределенности

1.1. Вероятностная неопределенность. Неопределенность модели. Вероятностная неопределенность определяется неопределенностью как показателей надежности базисных событий вероятностной модели, так и логических составляющих модели.

Анализ неопределенности как показателей надежности базовых событий, так и логических составляющих модели может проводиться при помощи двух методов: 1) метода аналитико-статистического моделирования; 2) критериев Фишера и «Хи-квадрат» (χ^2).

Метод аналитико-статистического моделирования. Метод аналитико-статистического моделирования подробно описан в [1].

Аналитико-статистическое моделирование – метод апробации n входных данных $X_1, X_2, \dots, X_n$, приводящей к функции $Y=y(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Эта выборка приводит к значениям, расположенным в интервале времени $[t, T]$.

В этом методе переменная X_j беспорядочно выбрана из распределения $F(x)$ при условии, что $(X_j < X_k, j \neq k)$. Значение X переменной X_j беспорядочно выбрано следующим условием (рис. 1):

$$F(x) = \frac{P\{X_j < x | X_j < t, X_j < T, X_j < X_k, j \neq k\}}{P\{X_j < t, X_j < T, X_j < X_k, j \neq k\}}$$

$$x = F^{-1}(r)$$

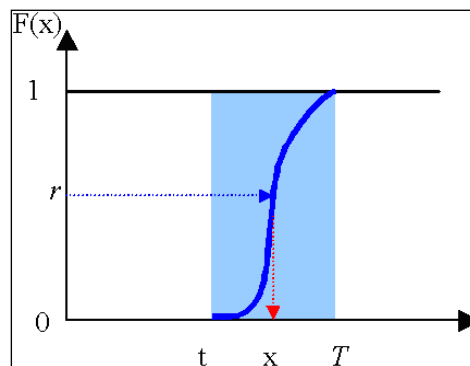


Рис. 1. Графическое представление метода аналитико-статистического моделирования

Критерий «Хи-квадрат» (χ^2). Критерий «Хи-квадрат» (χ^2) – непараметрический критерий для статистической проверки гипотезы о статистической связи между двумя переменными по таблице сопряженности. В основе критерия χ^2 лежит наиболее общее определение статистической связи, согласно которому две переменные связаны между собой, если при изменении одной переменной меняется распределение другой.

Существует большое количество параметрических и непараметрических критериев проверки соответствия предполагаемого закона распределения наблюдениям. Здесь мы рассмотрим один простой метод проверки гипотезы о виде распределения, основанный на хорошо известном критерии χ^2 (хи-квадрат).

Предположим, что выходом модели является случайная величина Y . Пусть имеется выборка объема n , $\{Y_1, \dots, Y_n\}$, независимых реализаций случайной величины Y . Суть анализа неопределенности модели в данном случае состоит в проверке адекватности выбранных в модели законов распределения, т.е. их соответствия наблюдаемым величинам $\{Y_j\}$.

Разобьем множество значений случайной величины Y на конечное число (m) интервалов $[y_0, y_1], [y_1, y_2], \dots, [y_{m-1}, y_m]$. Последний интервал может быть бесконечным, если случайная величина может принимать сколь угодно большие значения. В этом случае полагаем $y_m = \infty$.

Обозначим через n_i количество наблюдаемых величин $\{Y_j\}$, попавших в i -й интервал $[y_{i-1}, y_i]$. Тогда частота $h_i = n_i/n$ попадания в i -й интервал является несмещенной оценкой для вероятностей

$$p_i = P(y_{i-1} < Y < y_i) = \int_{y_{i-1}}^{y_i} f(y) dy$$

где $f(y)$ – плотность распределения случайной величины Y .

Если наша модель адекватна, то следует ожидать, что оценки частот h_i будут близки к ожидаемым (истинным) их значениям p_i . Для проверки этой гипотезы построим статистику

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} = n \sum_{i=1}^m \frac{(h_i - p_i)^2}{p_i}$$

Известно, что при достаточно больших значениях n эта статистика приближенно распределена как χ^2 с $(m-1)$ степенями свободы. Зададимся уровнем значимости α (0.1, 0.05, и т.д.) и по таблицам χ^2 -распределения найдем соответствующий этому значению квантиль $\chi^2_{1-\alpha}(m-1)$. Если верно следующее неравенство

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}(m-1)$$

то говорится, что наблюдения согласуются с предполагаемым распределением f и, следовательно, построенная модель принимается адекватной. В противном случае эта гипотеза отвергается – считается, что произошло редкое, «невероятное» событие.

Необходимо сделать два важных замечания:

1. Разбиение интервала должно быть достаточно частым для того, чтобы наиболее полно учесть особенности распределения случайной величины Y и наиболее важные и значимые области ее значений.
2. Критерий χ^2 эффективен, когда для всех ожидаемых частот p_i выполнены неравенства $np_i > 10$. В противном случае статистика χ^2 плохо аппроксимируется χ^2 -распределением.

Несоблюдение этих условий является наиболее распространенными ошибками при использовании критерия χ^2 .

Критерий Фишера. Подробно критерий Фишера рассмотрен в [2].

Критерий Фишера – специальное событие теории статистической сходимости. Предположим, что критерий проверяет соответствие модели. Для определения точности оценки параметра a_{ei} введем коэффициент S^2_{rep} . Для определения отклонения эмпирических параметров от используемой теоретической модели введем коэффициент S^2_{ad} . Статистический **критерий Фишера** может быть написан в следующей форме:

$$\bar{F} = \frac{S^2_{ad}}{S^2_{rep}}.$$

Расчетное значение статистического **критерия Фишера** должно быть сравнимо со значением $F(q, \alpha)$ где q – степень свободы, α – уровень значения, с которым принята гипотеза соответствия модели.

Если $F < F(q, \alpha)$, то гипотеза о соответствии принята, если нет – гипотеза отклонена.

1.2. Детерминистическая неопределенность. Может быть 2-х типов:

- 1) неопределенность детерминистической модели,
- 2) неопределенность параметров детерминистической модели.

1.2.1. Неопределенность детерминистической модели. Метод стохастической аппроксимации детерминистической модели. Стохастическая аппроксимация (от греч. *stochastikos* - умеющий угадывать, проницательный и лат. *approximo* - приближаюсь) – метод решения широкого класса задач статистического оценивания, при котором каждое следующее значение оценки получается в виде основанной лишь на новом наблюдении поправки к уже построенной оценке. Основными чертами, обусловившими популярность стохастической аппроксимации в теоретических и прикладных работах, явились её непараметричность (применимость при весьма скудной информации об объекте наблюдения) и рекуррентность (простота пересчета оценки при поступлении нового результата наблюдений).

Коэффициент стохастической аппроксимации (SAR) [1, 2], как мера неопределенности модели Y , определяется следующим образом. Предположим, что $X_1, X_2, \dots, X_n$ являются случайными параметрами, а переменная Z является детерминистически связанной с рассматриваемыми параметрами $Z(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Параметры $X_1, X_2, \dots, X_n$ рассматривают, т.к. входные данные для модели Y и соответствующей модели $Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ рассматриваются как ожидаемое приближение переменной Z . Коэффициент стохастической аппроксимации, как мера неопределенности модели Y может быть записан как:

$$SAR = \left(1 - \frac{\sqrt{a_{Y-Z}}}{\sqrt{a_Y} + \sqrt{a_Z}} \right)^2,$$

где a_{Y-Z} , a_Y и a_Z – моменты второго порядка:

$$a_{Y-Z} = \int [Y(x) - Z(x)]^2 f(x) dx,$$

$$a_Y = \int [Y(x)]^2 f(x) dx,$$

$$a_Z = \int [Z(x)]^2 f(x) dx,$$

и $f(x)$ – функция плотности.

Значение коэффициента стохастической аппроксимации определено, как $[0,1]$. Если значение SAR близко к 1, то это означает, что переменная Z и соответствующая модель Y очень близки ($Z(X_1, X_2, \dots, X_n) \cong Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$) и неопределенность модели очень низка. Если $SAR \ll 1$, то это означает, что переменная Z и соответствующая модель Y не близки, и неопределенность очень высока.

1.2.2. Неопределенность параметров детерминистической модели. Анализ неопределенности параметров детерминистической модели проводится при помощи следующих методов [3, 4].

Аналитические методы

Анализ чувствительности амплитуды Фурье. Анализ чувствительности амплитуды Фурье (Fourier Amplitude Sensitivity Test - FAST) может быть двух типов – классический и расширенный. Подробнее этот метод представлен в [5-7].

В [8] представлены два подхода к распространению неопределенностей – критический и статистический.

В [9, 10] приведен закон распространения ошибки (суммарная стандартная неопределенность результата измерения y , определяемая как $u_c(y)$ и рассмотренная для оценки среднеквадратичного отклонения результата).

Анализ регрессии. Анализ регрессии может быть использован в качестве метода вероятностного анализа чувствительности и неопределенности. Анализ регрессии имеет три основных цели: 1) описание взаимодействия между параметрами; 2) контроль разброса предсказаний для заданного отклонения значения отклика; 3) Предсказание отклика на вариацию входных параметров.

Анализ регрессии наилучшим образом работает, если все входные параметры статистически независимы. Более того, отклонения от метода наименьших квадратов должны быть нормально распределены и статистически независимы. Если эти условия нарушены, результат анализа может не иметь строгой количественной интерпретации, но он может дать абстрактное качественное представление о возможной зависимости величин.

Результат анализа регрессии может критически зависеть от выбора функциональной зависимости в модели регрессии. То есть, любые полученные результаты обуславливаются использованной моделью.

Анализ регрессии может предоставить результаты, которые статистически незначимы или противоречат интуиции. Результат регрессии может быть чувствителен к диапазону значений данных, использованных при моделировании, и не всегда точно отражать реальную зависимость.

Аналитический подход. Для относительно простых уравнений численный анализ неопределенностей может быть выполнен при помощи аналитических методов для распространения статистической ошибки. Аналитический подход наиболее часто используется для анализа неопределенности простых уравнений [11-13].

Формула, используемая для оценки среднего значения и отклонения логарифмов для каждого неопределенного параметра, зависит от конкретного типа распределения вероятности неопределенных параметров. Уравнения, оценивающие среднее значение и отклонение логарифмов для логнормального, логравномерного и логтреугольного распределений, приведены в [14].

Анализ неопределенности систем (SUAM) и согласованных подсистем (CSSUAM). Методы анализа неопределенностей системы (system uncertainty analysis method – SUAM) и согласованных подсистем (concurrent subsystem uncertainty analysis method – CSSUAM) описаны в [15].

Подход SUAM использует разложение Тейлора в качестве общего анализа чувствительности (по производным первого порядка), чтобы оценить среднее значение и стандартное отклонение отклика модели и неопределенности модели в многопрофильной системе.

Чтобы устранить зависимость анализа системы от компьютерных вычислений и сделать возможным использование параллельных вычислений, предлагается метод анализа неопределенностей согласованных подсистем (CSSUAM) для распространения неопределенностей. Метод облегчает организацию параллельных вычислений оценки отклонений на выходе системы, которые обуславливаются различными подсистемами. Метод распространения неопределенности разработан таким образом, чтобы среднее значение и отклонение для каждой подсистемы можно было посчитать одновременно, используя параллельные вычисления.

Система и метод вычисления неопределенности (UCSM). В [9] описан алгоритм распространения значений неопределенности между компонентами системы измерений.

В математических терминах измерение может быть выражено в качестве функции входных данных системы:

$$x_{sys} = f_{sys}(x_1, \dots, x_i),$$

где каждый из параметров $x_1, \dots, x_i$ может вносить значительный вклад в изменение результата x_{sys} .

1.2.3. Численные методы

GRS-метод оценки неопределенностей и чувствительности. GRS-метод оценки неопределенностей и чувствительности был разработан для оценки неопределенностей. Информация всех неточных параметрах задается диапазоном значений и вероятностным распределением (рис. 2). Для получения информации о результатах расчетов нужно многократно повторить процесс вычисления. Для каждой серии расчетов все значения параметров меняются одновременно. Параметрами неопределенности являются неопределенные входные данные, модели, начальные и граничные условия, а также такие численные значения, как критерий сходимости или максимальный временной интервал и т.д.

Подробно GRS-метод представлен в [16, 17].

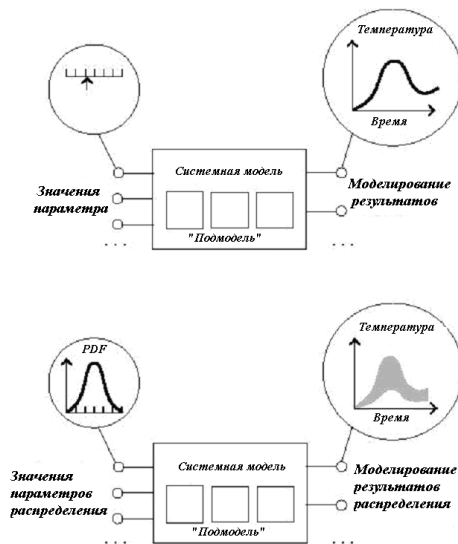


Рис. 2. Представление диапазонов значений входных параметров вместо дискретных значений в GRS-методе оценки неопределенностей и чувствительности.

Метод построения поверхности отклика. Метод построения поверхности отклика (RSM) используется для того, чтобы представить зависимость величины отклика (выходных данных) от одного или более входных параметров модели.

Метод RSM может выделять кривые на поверхности отклика, объясняя эффекты высших порядков. Метод RSM довольно сложен и поэтому применяется на последних стадиях исследования, когда все малозначимые параметры уже отброшены.

В [18] показано использование метода RSM для анализа неопределенностей и чувствительности компьютерной модели.

Анализ второго момента первого порядка. Анализ второго момента первого порядка (first-order second moment method – FOSM) непосредственно выявляет место наиболее вероятного отказа системы. По определению, метод FOSM не дает информации о распределении предельных значений переменной G , и вероятность отказа p_f выводится приблизительно посредством сложных преобразований и линеаризаций. Метод Монте-Карло непосредственно предоставляет распределение вероятности пределов надежности, то есть функцию p_f . Точность метода определяется количеством прогонов моделирующей программы.

Модель Байеса. Байесовский подход всесторонне рассматривает модель (параметры, структуру, или все сразу) для снижения ее неопределенности. Кроме того, неопределенность параметров и структуры модели рассматривается как вероятность.

Подробно модель Байеса описана в [19-23].

Метод простого моделирования (метод Монте-Карло). Данный метод заключается в непосредственном моделировании случайной выборки $x = \{x_1, x_2, \dots\}$ по ее функции распределения $F(x)$. Каждое x_i вычисляется как

$$x_i = F^{-1}(u_i)$$

где u_i – независимые, равномерно распределенные на интервале $[0,1]$ случайные величины, $F^{-1}()$ – обратная функция.

Преимуществами данного метода являются простота, наличие хорошо известных методов оценивания и статистического анализа, устойчивость и аддитивность. Устойчивость означает сходимость оценок параметров к истинным значениям с увеличением объема выборки. В силу наличия аддитивности случайные выборки, полученные методом простого моделирования для одной и той же модели с одинаковыми параметрами функций распределения, можно объединить, получив, таким образом, большую выборку и, тем самым, повысив точность оценок. Основным недостатком метода простого моделирования является то, что он

требует для сложных моделей, таких как модели ВАБ, значительных временных затрат, которые, в свою очередь, могут налагать чрезмерные требования на время вычисления.

Метод латинского гиперкуба. Одним из методов, более эффективно модулирующим большие многомерные выборки, является метод латинского гиперкуба. В методе латинского гиперкуба интервалы изменения параметров разбиваются на более мелкие равновероятные подынтервалы [24]. Например, при разбиении на K подынтервалов $[a_0^i, a_1^i]$, $[a_1^i, a_2^i]$, ... для i -го параметра X_i

$$P\{a_{j-1}^i < X_i < a_j^i\} = \frac{1}{K}, \quad j = 1, \dots, K$$

Метод латинского гиперкуба делит область значений параметра на отдельные равновероятные интервалы (см. рис. 3).

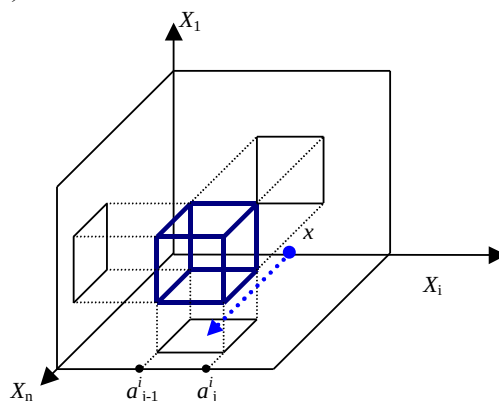


Рис. 3. Графическое представление разбиения в методе латинского гиперкуба

С помощью метода латинского гиперкуба можно получать несмещенные оценки параметров. Напомним, что несмещенность оценки означает, что ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемого параметра. Этот метод по сравнению с методом простого моделирования позволяет уменьшить объем выборки, не снижая точности оценок. Например, более высокая эффективность метода латинского гиперкуба в сравнении с методом простого моделирования имеет место, когда выходные данные являются монотонной функцией от входных параметров. Так, в моделях ВАБ частота разрушения активной зоны является монотонной функцией от различных входных параметров.

Однако если рассматривать произвольную модель, которая может быть не монотонной, теоретическое обоснование того, что метод латинского гиперкуба более эффективен, чем метод простого моделирования, отсутствует. Метод латинского гиперкуба не обладает, в отличие от метода простого моделирования, свойством аддитивности. В целом, метод латинского гиперкуба уменьшает «стоимость» анализа неопределенности при ВАБ, но его преимущество перед методом простой случайной выборки в области некогерентных моделей редких событий все еще остается недоказанным.

Метод нечетких множеств. Метод нечетких множеств и теория вероятности предоставляют технически надежный и мощный аппарат для работы с погрешностями и неопределенностями и с гибкими запросами. Безусловно, методы нечетких множеств эффективны для простого моделирования выбора допустимых значений.

Нечеткость и неопределенность в объектно-ориентированном представлении описаны в [25], где приведено объектно-центрированное представление. Здесь оба диапазона рассматриваемых параметров и диапазоны типичных значений могут быть установлены для свойств, характеризующих класс. Области значений также могут быть нечеткими. Тогда между классами могут быть определены различные типы дополнительных отношений. Другой подход представлен в [26].

Метод типового выравнивания размера. Функция распределения параметров вычисляется дважды для выборок одинакового размера. На основе результатов двух выборок вычисляется *t*-критерий Стьюдента [27].

Метод простой случайной выборки (SRS). Метод простой случайной выборки – это простейший из методов выборки. В этом методе каждое значение множества $x = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ выбирается случайным образом из распределения $F(x)$ [28].

В табл. 1 представлены применимость, достоинства и недостатки всех перечисленные выше методов анализа неопределенности

Таблица 1. Сводная таблица применимости, достоинств и недостатков методов анализа неопределенности

Название метода	Применимость	Достоинства	Недостатки
Анализ неопределенности вероятностной модели			
Критерий «Хи-квадрат» (χ^2)	Анализ неопределенности вероятностной модели	Проверка адекватности выбранных в модели законов распределения	Критерий эффективен, когда для всех ожидаемых частот p_i выполнены неравенства $np_i > 10$. В противном случае статистика χ^2 плохо аппроксимируется χ^2 -распределением
Критерий Фишера	Анализ неопределенности вероятностной модели	Способность оценивать соответствие при ограниченных статистических данных	Критерий эффективен для простого моделирования и сложен для сложных моделей
Анализ неопределенности параметров вероятностной модели			
Метод аналитико-статистического моделирования	Анализ неопределенности параметров вероятностной модели	Отсутствие ограничений и допущений, накладываемых на модели систем аналитическими методами, такими как деревья отказов, марковские и полумарковские процессы. Определение доверительных интервалов оценок. Учет детерминистских физических процессов. Слабая зависимость времени вычислений от параметров «редких событий». Возможность оценки значимости, чувствительности и неопределенности параметров стохастических и детерминистических процессов	Требуется специальное программное обеспечение
Анализ неопределенности детерминистической модели			
Метод стохастической аппроксимации детерминистической модели	Анализ неопределенности детерминистической модели	Непараметричность (применимость при весьма скудной информации об объекте наблюдения) и рекуррентность (простота пересчета оценки при поступлении нового результата наблюдений) метода	Требуется специальное программное обеспечение
Анализ неопределенности параметров детерминистической модели			
Аналитические методы			
Анализ чувствительности амплитуды Фурье	Анализ неопределенности входных параметров/анализ чувствительности модели	Используется для оценки ожидаемой величины и отклонения результата и влияния отдельных параметров на изменение результата. Не требует предположений	Метод хорошо работает на некоррелированных данных. Могут возникнуть проблемы при использовании дискретных

Название метода	Применимость	Достоинства	Недостатки
		о структуре модели и одинаково хорошо работает для монотонных и немонотонных моделей. Может оценить эффект от изменения только одного параметра или всех параметров одновременно	данных. Громоздкость компьютерных вычислений для большого числа входных параметров
Критический подход к оценке распространения неопределенности	Анализ неопределенности входных параметров/анализ чувствительности модели	Установление пределов значений выходных данных модели системы	Чувствительность к количеству расчетов
Статистический подход к оценке распространения неопределенности	Анализ неопределенности входных параметров/анализ чувствительности модели	Полная вероятностная информация на выходе модели системы	Для рассмотрения неопределенности в последовательности модели используется метод Монте-Карло. Чувствителен к количеству расчетов
Закон распространения ошибки	Анализ неопределенности входных параметров	Уравнение, описывающее среднеквадратичное отклонение результата, удобно для описания закона распространения неопределенности	Необходимо большое количество расчетных данных для выполнения данного закона
Анализ регрессии	Анализ неопределенности входных параметров / анализ чувствительности модели	Метод может быть использован для автоматического «отбрасывания» статистически незначительных параметров	Модель должна быть представлена в виде аналитического выражения. Время расчета зависит от способа моделирования
Аналитический подход	Анализ неопределенности простых уравнений	Наиболее часто используется для анализа неопределенности простых уравнений	Формула, используемая для оценки среднего значения и отклонения логарифмов для каждого неопределенного параметра, зависит от конкретного типа распределения вероятности неопределенных параметров. Необходимо подтверждение корректности выбранного закона распределения
Анализ неопределенности систем (SUAM) и согласованных подсистем (CSSUAM)	Анализ неопределенности входных параметров	Метод разработан так, чтобы среднее значение и отклонение для каждой подсистемы можно было посчитать одновременно, используя параллельные вычисления	Метод обеспечивает информацию только в небольшой окрестности точки. Обычно требуется сложная процедура численного моделирования
Система и метод вычисления неопределенности (UCSM)	Анализ неопределенности входных параметров	Возможен расчет произведения коэффициента чувствительности и значения неопределенности параметров	Необходимо большое количество расчетных данных для работы метода
Численные методы			
GRS-метод оценки неопределенностей и чувствительности	Анализ неопределенности входных параметров	Объем вычислений зависит не от числа параметров, а от необходимого уровня доверия к пределам статистического отклонения	Чувствительность к количеству расчетов
Метод построения поверхности отклика	Анализ неопределенности входных параметров/анализ чувствительности модели	Метод используется для представления зависимости величины отклика (выходных данных) от одного или более входных параметров модели. Метод может выделять кривые на поверхности	Необходимо большое количество расчетных данных для построения поверхности отклика.

Название метода	Применимость	Достоинства	Недостатки
		отклика, объясняя эффекты высших порядков	
Анализ второго момента первого порядка	Анализ неопределенности входных параметров / анализ чувствительности модели	Анализ непосредственно выявляет место наиболее вероятного отказа системы	Чувствительность к количеству расчетов
Модель Байеса	Анализ неопределенности входных параметров	Байесовский подход всесторонне рассматривает модель (параметры, структуру, или все сразу) для снижения ее неопределенности. Кроме того, неопределенность параметров и структуры модели рассматривается как вероятность. Байесовский подход базируется на различном представлении рассматриваемых данных, в которых вероятность используется для представления неопределенности отношений между рассматриваемыми данными	Метод позволяет выбор между моделями, используя «доказательство» модели. Это - одна из самых больших проблем Байесовского метода. Рассматривая распределения (и, возможно, гиперпараметры), не просто найти наилучшее значение. Точные аналитические методы для сложных моделей не рассматриваются
Метод Монте-Карло	Анализ неопределенности входных параметров	Простота, наличие хорошо известных методов оценивания и статистического анализа, устойчивость и аддитивность	Требует для сложных моделей значительных временных затрат, которые, в свою очередь, могут налагать чрезмерные требования на время вычисления
Метод латинского гиперкуба	Анализ неопределенности входных параметров	Более эффективно модулирует большие многомерные выборки. Позволяет уменьшить объем выборки, не снижая точности оценок.	Не обладает свойством аддитивности
Метод нечетких множеств	Анализ неопределенности входных параметров	Технически надежный и мощный аппарат для работы с погрешностями и неопределенностями	Метод эффективен для простого моделирования выбора допустимых значений и сложен для сложных моделей
Метод типового выравнивания размера	Анализ неопределенности входных параметров	Вычислением t-критерия Стьюдента выявляется необходимый размер выборки	Чувствительность к количеству расчетов
Метод простой случайной выборки (SRS)	Анализ неопределенности входных параметров	Простота реализации, доступность для всех существующих методов оценки и статистического анализа, надежность и плотность покрытия всего интервала	Чувствительность к количеству расчетов

Из табл. 1 видно, что все из всех рассмотренных методов только метод аналитико-статистической аппроксимации и метод стохастической аппроксимации детерминистической модели требуют наличия специального программного кода. Все остальные методы имеют более серьезные недостатки, что ставит под сомнение эффективность их использования.

2. Анализ значимости. Анализ значимости – это анализ результатов количественной оценки с точки зрения мер значимости вкладов различных групп базовых событий, исходных событий, аварийных последовательностей и других объектов анализа в суммарную частоту повреждения активной зоны [29].

Существуют два класса анализа значимости: 1) количественный анализ значимости; 2) качественный анализ значимости.

Количественный анализ значимости – вероятностный показатель безопасности, который получается из логической структуры моделей ВАБ. Количественная оценка ВАБ обеспечивает критерии, необходимые для анализа значимости составляющих вкладов в риск.

Качественный анализ значимости – анализ на основе мер значимости составляющих оцененного вероятностного показателя безопасности, полученного в результате проведения количественной оценки ВАБ-1.

В качестве мер значимости могут быть использованы следующие вероятностные показатели: показатель значимости Fussell-Vesely; инспекционный показатель значимости; линейный показатель значимости; нормированный показатель значимости; показатель увеличения риска; показатель снижения риска.

Методы расчета анализа значимости приведены в [29].

3. Анализ чувствительности. Анализ чувствительности исследует влияние на конечные результаты ВАБ допущений, сделанных в моделях и данных по поводу потенциально важных, но точно неизвестных факторов.

Существует два основных типа чувствительности: чувствительность к модели; чувствительность к данным.

При анализе чувствительности изменение данных или модели может приводить как к снижению вероятности реализации сечений, так и к ее повышению.

Методы расчета анализа чувствительности представлены в [29].

Заключение. Целью данного исследования является единый подход к выполнению анализа неопределенности, значимости и чувствительности. Проведено исследование методов анализа неопределенности, значимости и чувствительности. Рассмотрены классы и типы указанных анализов и описаны их методики. Разработана таблица применимости, достоинств и недостатков методов анализа неопределенности. Сделаны выводы о возможности применения методов анализа неопределенности.

В дальнейшем необходимо доработать метод аналитико-статистической аппроксимации и метод стохастической аппроксимации детерминистической модели в части создания программного кода. Необходимо также разработать метод анализа неопределенности входных параметров, учитывая, по возможности, недостатки рассмотренных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uncertainty Analysis: Report for US Nuclear Regulatory Commission. / R.T. Islamov. - Moscow: Russian Academy of Science Nuclear Safety Institute, 1998. 80 p.
2. Development of Standard Probabilistic Risk Assessment Procedure Guides: Quantification Uncertainty and Sensitivity Analysis: Report for US Department of Energy. / R.T. Islamov - Moscow: Russian Academy of Science Nuclear Safety Institute, 1998. 107 p.
3. NUREG/CR-2300 PRA Procedures Guide: a Guide To The Performance Of Probabilistic Risk Assessment For Nuclear Power Plants. - NRC, 1983. 670 p.
4. Dr. Papushkin V., Dr. Islamov R., Volkov A.A. NSI-Predraft-Report-1999 // Development of Standard Probabilistic Risk Assessment (PRA) Procedure Guide. System modelling. 1999. Russian Academy of Science. Nuclear Safety Institute.
5. Sastry S.Isukapalli Uncertainty Analysis of Transport-Transformation Models. A dissertation submitted to the Graduate School - New Brunswick Rutgers. The State University of New Jersey. New Brunswick. New Jersey January. 1999. 218 p.
6. M.Koda, G.J.McRae and J.H.Seinfeld. Automatic sensitivity analysis of kinetic mechanisms. International Journal of Chemical Kinetics. 11:427-444. 1979. Pp. 427-444
7. G.J.McRae, J.W.Tilden and J.H.Seinfeld. Global sensitivity analysis - a computational implementation of the fourier amplitude sensitivity test (FAST). Computers and Chemical Engineering. 6(1):15-25. 1982.

8. Xiaoping Du and Wei Chen Raman Garimella Propagation and Management of Uncertainties in Simulation-Based Collaborative Systems Design. University of Illinois at Chicago, Chicago. IL 60607-7022. 1999.
9. B.D.Hall Calculating uncertainty automatically in instrumentation systems. Measurement Standards Laboratory of New Zealand Lower Hutt. New Zealand 2002.
10. Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Physics Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-0001. 1994.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA). Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. IAEA Safety Series 100. Austria. 1989. 106 p.
12. Martz, H.F. and Waller R.A. Bayesian Reliability Analysis. John Wiley & Sons. New York. 1982. Pp. 143-154
13. Morgan M.G. and Henrion M. Uncertainty A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press. New York. 1990.
14. J.S.Hammonds, F.O.Hoffman, S.M.Bartell An Introductory Guide to Uncertainty Analysis in Environmental and Health Risk Assessment. Oak Ridge National Laboratory. 1994. 51 p.
15. Xiaoping Du and Wei Chen An efficient approach to probabilistic uncertainty analysis in simulation-based multidisciplinary design. Department of Mechanical Engineering. University of Illinois at Chicago. 11 p.
16. S.S.Wilks, «Determination of sample sizes for setting tolerance limits,» Annals of Mathematical Statistics. Vol. 12. № 1. Pp. 91-96. 1941.
17. S.S.Wilks Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits. Annals of Mathematical Statistics. Vol. 13. № 4. Pp. 400-409. 1942.
18. Ronald L. Iman and Jon C. Helman. An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models. 1986.
19. MacKay D.J.C. Bayesian interpolation. Neural Computation. 1992a. 4. 415-447.
20. MacKay D.J.C. A practical Bayesian framework for backpropagation networks» Neural Computation. 1992b. 4. Pp. 448-472.
21. MacKay D.J.C. Bayesian methods for neural networks: theory and applications. 1995.
22. Neal R.M. Bayesian learning via stochastic dynamics in C.L.Giles, S.J.Hanson, and J.D.Cowan (editors). Advances in Neural Information Processing Systems 5. San Mateo. California: Morgan Kaufmann. 1993a. Pp. 475-482.
23. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. New York: Springer-Verlag. ISBN 0-387-94724-8. 1996.
24. D.McKay, W.J.Conover, R.J.Beckman A Comparison of Three Methods for selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. Technometrics 21. 1979. Pp. 39-45.
25. Dubois D., Prade H., Rossazza J.P. Vagueness, typicality and uncertainty in class hierarchies. Int. J. of Intelligent Systems. 1991. 6. Pp. 167-183.
26. Dubois D., Prade H. (with the collaboration of Farreny H., Martin-Clouaire R., Testemale C.) Possibility Theory: an Approach to Computerized Processing of Uncertainty. Plenum Press. New York. 1988a.
27. Student. The probable error of a mean // Biometrika. 1908. № 6 (1). Pp. 1-25.
28. Yates Daniel S. David S. Moore, Daren S. Starnes The Practice of Statistics, 3rd Ed. Freeman. 2008. ISBN 978-0-7167-7309-2.
29. Р.Ш.Кальметьев, А.С.Филиппов, Д.В.Михайлович. Анализ значимости и чувствительности результатов вероятностного анализа безопасности АЭС. М.: ТРУДЫ МФТИ. 2012. Том 4. № 3. С. 205-210.

UDK 62.001.25

ANALYSIS OF UNCERTAINTY, SIGNIFICANCE AND SENSITIVITY OF THE RESULTS OF PROBABILITY ANALYSIS OF NPP SAFETY

Maria A. Berberova,

Ph.D, Researcher ANO «INSC», Associate Professor,

e-mail: maria.berberova@gmail.com,

Moscow, Malaya Krasnoselskaya st., 2/8, bldg. 7

Viktor I. Baluta

Ph.D, Senior Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS,

e-mail: Vbaluta@yandex.ru,

Moscow, Miuskaya Sq., 4

Annotation. Nuclear power plants (NPPs), due to the accumulation during operation of significant amounts of radioactive products and the existence of a fundamental possibility of their exit in case of accidents beyond the envisaged boundaries, represent a source of potential danger or a source of risk of radiation exposure to personnel, population and the environment. The degree of radiation risk directly depends on the level of NPP safety, which is one of the main properties of NPPs, which determine the possibility of their use as sources of thermal and electrical energy. Probabilistic safety analysis (PSA) of a nuclear power plant is a complex, comprehensive systematic safety analysis, in the process of which probabilistic models are developed to determine the end states with damage to radioactivity sources and the end states of a nuclear power plant in excess of the established limits for releases of radioactive products and radiation impact on the population and the environment. The values of probabilistic safety indicators are determined. The PSA results are used for qualitative and quantitative assessments of the achieved safety level, as well as for the development and adoption of decisions in the design and operation of NPPs.

Key words: uncertainty, significance, sensitivity, PSA, NPP.

REFERENCES

1. Uncertainty Analysis: Report for US Nuclear Regulatory Commission. / R.T. Islamov. - Moscow: Russian Academy of Science Nuclear Safety Institute. 1998. 80 p.
2. Development of Standard Probabilistic Risk Assessment Procedure Guides: Quantification Uncertainty and Sensitivity Analysis: Report for US Department of Energy. / R.T. Islamov - Moscow: Russian Academy of Science Nuclear Safety Institute, 1998. 107 p.
3. NUREG/CR-2300 PRA Procedures Guide: a Guide To The Performance Of Probabilistic Risk Assessment For Nuclear Power Plants. - NRC, 1983. 670 p.
4. Dr. Papushkin V., Dr. Islamov R., Volkov A.A. NSI-Predraft-Report-1999 // Development of Standard Probabilistic Risk Assessment (PRA) Procedure Guide. System modelling. 1999. Russian Academy of Science. Nuclear Safety Institute.
5. Sastry S.Isukapalli Uncertainty Analysis of Transport-Transformation Models. A dissertation submitted to the Graduate School - New Brunswick Rutgers. The State University of New Jersey. New Brunswick. New Jersey January. 1999. 218 p.
6. M.Koda, G.J.McRae and J.H.Seinfeld. Automatic sensitivity analysis of kinetic mechanisms. International Journal of Chemical Kinetics. 11:427-444. 1979. Pp. 427-444
7. G.J.McRae, J.W.Tilden and J.H.Seinfeld. Global sensitivity analysis - a computational implementation of the fourier amplitude sensitivity test (FAST). Computers and Chemical Engineering. 6(1):15-25. 1982.
8. Xiaoping Du and Wei Chen Raman Garimella Propagation and Management of Uncertainties in Simulation-Based Collaborative Systems Design. University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607-7022. 1999.
9. B.D.Hall Calculating uncertainty automatically in instrumentation systems. Measurement Standards Laboratory of New Zealand Lower Hutt. New Zealand 2002.

10. Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Physics Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-0001. 1994.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA). Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. IAEA Safety Series 100. Austria. 1989. 106 p.
12. Martz, H.F. and Waller R.A. Bayesian Reliability Analysis. John Wiley & Sons. New York. 1982. Pp. 143-154
13. Morgan M.G. and Henrion M. Uncertainty A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press. New York. 1990.
14. J.S.Hammonds, F.O.Hoffman, S.M.Bartell An Introductory Guide to Uncertainty Analysis in Environmental and Health Risk Assessment. Oak Ridge National Laboratory. 1994. 51 p.
15. Xiaoping Du and Wei Chen An efficient approach to probabilistic uncertainty analysis in simulation-based multidisciplinary design. Department of Mechanical Engineering. University of Illinois at Chicago. 11 p.
16. S.S.Wilks, «Determination of sample sizes for setting tolerance limits,» Annals of Mathematical Statistics. Vol. 12. № 1. Pp. 91-96. 1941.
17. S.S.Wilks Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits. Annals of Mathematical Statistics. Vol. 13. № 4. Pp. 400-409. 1942.
18. Ronald L. Iman and Jon C. Helman. An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models. 1986.
19. MacKay D.J.C. Bayesian interpolation. Neural Computation. 1992a. 4. 415-447.
20. MacKay D.J.C. A practical Bayesian framework for backpropagation networks» Neural Computation. 1992b. 4. Pp. 448-472.
21. MacKay D.J.C. Bayesian methods for neural networks: theory and applications. 1995.
22. Neal R.M. Bayesian learning via stochastic dynamics in C.L.Giles, S.J.Hanson, and J.D.Cowan (editors). Advances in Neural Information Processing Systems 5. San Mateo. California: Morgan Kaufmann. 1993a. Pp. 475-482.
23. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. New York: Springer-Verlag. ISBN 0-387-94724-8. 1996.
24. D.McKay, W.J.Conover, R.J.Beckman A Comparison of Three Methods for selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. Technometrics 21. 1979. Pp. 39-45.
25. Dubois D., Prade H., Rossazza J.P. Vagueness, typicality and uncertainty in class hierarchies. Int. J. of Intelligent Systems. 1991. 6. Pp. 167-183.
26. Dubois D., Prade H. (with the collaboration of Farreny H., Martin-Clouaire R., Testemale C.) Possibility Theory: an Approach to Computerized Processing of Uncertainty. Plenum Press. New York. 1988a.
27. Student. The probable error of a mean // Biometrika. 1908. № 6 (1). Pp. 1-25.
28. Yates Daniel S. David S. Moore, Daren S. Starnes The Practice of Statistics, 3rd Ed. Freeman. 2008. ISBN 978-0-7167-7309-2.
29. R.Sh.Kalmetiev, A.S.Filippov, D.V.Mikhailovich Analiz znachimosti i chuvstvitel'nosti rezul'tatov veroyatnostnogo analiza bezopasnosti AES [Analysis of the significance and sensitivity of the results of the probabilistic analysis of NPP safety]. M.:TRUDY MFTI = TRUDY MIPT. 2012. Volume 4. № 3. Pp. 205-210.

ОТ ТРУДНО РЕШАЕМЫХ ПРОБЛЕМ К ПАРАДИГМАМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Городняя Лидия Васильевна

к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., e-mail: gorod@iis.nsk.su,

Институт систем информатики СО РАН,

630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6.

Аннотация. Статья посвящена описанию и анализу взаимосвязи между трудно решаемыми проблемами и процессом формирования парадигм программирования, которые могут быть полезны при решении таких проблем. Материал для анализа даёт история вычислительной техники, а также малозаметная линия научной деятельности лидера программирования А.П. Ершова в области проявления и развития парадигм программирования¹. Результаты анализа позволили выполнить систематизацию языков программирования, представляя оценку их сходства и различия, что позволяет строить лаконичные определения относительно парадигмальных моделей. Это даёт возможность стратификации особенностей семантики языков программирования с разделением на автономно развиваемые компоненты в процессе пошаговой разработки экспериментальных систем программирования и формирования схем изучения и преподавания системного программирования, что может быть полезным для повышения производительности программного обеспечения. Попутно формируется ранжирование постановок задач по степени их изученности, что влияет на оценку трудоёмкости программирования.

Ключевые слова: систематизации языков программирования, парадигмальные модели, лаконичные определения, А.П. Ершов, парадигма программирования, стратегические парадигмы, проблемы программирования, степень изученности задач, архитектура фон Неймана.

Цитирование: Городняя Л. В. От трудно решаемых проблем к парадигмам программирования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 94-109. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.008

Введение. Многие проблемы современного программирования связаны с недостаточным учётом гуманитарных аспектов любой человеческой деятельности [1]. Известно, что успехи пионерных проектов Новосибирской школы программирования, выполненных в сфере влияния академика А.П. Ершова в ВЦ СО АН СССР, достигнуты в условиях исключительного внимания человеческому фактору в вопросах подбора кадров и создания в Новосибирском Академгородке плодотворной обстановки для выполнения всех необходимых целевых и вспомогательных работ по применению вычислительной техники. Широкий контекст и концентрация исследовательской и конструкторской активности позволили именно в Новосибирском Академгородке сформулировать перспективы исследования и развития системной информатики, включая ключевое значение образовательной информатики как механизма профориентации в программировании. Тем не менее, до сих пор не получила четкой формулировки общая характеристика предмета информатики как фундаментальной науки и системного программирования как самостоятельной деятельности. За исключением вопросов информационной безопасности, признание стратегического значения исследований в области ИТ не привело к поддержке актуальных направлений развития системной информатики, являющейся несущей линией развития устойчивых, надёжных и безопасных информационных систем и технологий. Не описаны механизмы поиска и реализации рациональных решений трудных проблем, обременённых сложно удостоверяемыми критериями качества и ошибками в прогнозе трудоёмкости их решения.

В сфере программирования наиболее яркой является школа академика Андрея Петровича Ершова. Научная карьера Андрея Петровича затрагивает четыре направления:

¹Термин «парадигмы программирования» предложил Роберт Флойд в 1978 году в своей Тьюринговской лекции [12].

программные эксперименты, теория программирования, общественная деятельность по формированию программистского сообщества, постановка школьной учебной дисциплины «информатика». В науке лидерство означает умение распознавать проблемы и расширять пространство путей их решения. А.П. Ершов оказался способным распознавать неожиданные ключевые проблемы программирования как новой области и убеждённо расширять пространства решений таких проблем. Коллеги и ученики Андрея Петровича освещают преимущественно линию построения компиляторов, практическая значимость которой наиболее очевидна. Остальные направления служат фоном, их признание и проявление требуют более тонких исследований, результат которых могут не дожидаться подтверждения очевидцами и участниками. При систематизации парадигм программирования² бросается в глаза, что многие системообразующие и перспективно-стратегические парадигмы программирования не просто входили в сферу интересов Андрея Петровича, но в формирование многих из них ему удалось сделать значительный вклад, другие – получили развитие трудами его учеников [2]. Отдельно следует отметить концепцию лексикона программирования [3].

Статья начинается с общего представления о парадигмах программирования [4]. и краткого изложения подхода к описанию этого термина в Тьюринговской лекции Роберта Флойда [5]. Далее выполнено сравнение близких понятий с анализом их специфики, сводимой к проверяемым правилам, показывающим роль понятий в процессе решения задач с учётом степени их изученности [6]. Затем показана зависимость появления и признания парадигм от их практичности и изученности решаемых задач, а также связанность лексикона программирования с параллельно развивающимися стратегическими исследованиями на уровне теории [7, 8]. Таким образом, выстраивается последовательность расширения класса практических задач, проявления в нём трудно решаемых проблем и формирования парадигм как общих интуитивных схем для снижения трудоёмкости представления и отладки программ решения трудных проблем [9]. В результате можно классифицировать пространство постановок задач и формулировать требования к современным языкам и системам программирования (ЯиСП) для решения новых трудно решаемых проблем, возникающих в связи с расширением возможностей аппаратуры, ростом квалификации пользователей и разработчиков, а также общим прогрессом ИТ-индустрии [10, 11, 12].

1. Общее представление. Словарное определение термина «парадигма» сводит его к понятиям «пример, модель, образец». Такого понимания не достаточно для ответов на практические вопросы программирования:

- Почему стремительно растёт число ЯиСП?
- Что позволяет обосновывать выбор ЯиСП для решения конкретной задачи?
- Какие параметры позволяют определять, какую парадигму поддерживает ЯиСП?
- Какова трудоёмкость разработки программы на базе определённых ЯиСП?
- Что отличает Парадигму программирования от технологии, методики, стиля, техники, метода, вида и др. близких или сопутствующих понятий?
- Кто отвечает за правильность и производительность программ?

Мировая практика насчитывает несколько десятков тысяч языков программирования (ЯП) [13]. Долгоживущие, учебные и новые ЯиСП преимущественно мультипарадигмальны [14]. Понимание «правильности» по разному рассматривается в теории и практике. Прогноз трудоёмкости программирования обычно содержит систематическую ошибку в 2-8 раз. Измерение производительности готовых программ не даёт основания для вывода

² Достаточно конструктивное определение понятию «парадигмы программирования» дал Питер Вегнер, связывая его с условиями, которые могут быть проверены [5]. Р. Флойд ввёл этот термин без формального определения, просто показал на примерах.

направлений их улучшения и вклада программируемых решений. Расхождение интуитивных и измеримых характеристик сложных систем (ошибка конъюнкции) выдерживает научно-образовательную коррекцию даже среди математиков.

2. История термина. Вернёмся в 1978 год, когда Роберт Флойд провозгласил: «Искусство программирования включает в себя расширение репертуара используемых парадигм» [5]. Этой проблеме он посвятил свою Тьюринговскую лекцию с акцентом на проблему обучения программистов, влияния парадигм программирования на успех программистских проектов и как парадигмы должны быть поддержаны в языках программирования. Прежде всего он счёл нужным отметить пробелы в программистском образовании, по его мнению, потеряны рекурсивные сопрограммы, бывшие в языке Fortran, слабо осваиваются недетерминизм и макротехника, а также концепции языка Lisp, активно использующие программы как данные в соответствии с принципами архитектуры фон Неймана. Выход из всего этого Р. Флойд видел в переходе к обучению семантическим методам, позволяющим без чрезмерного синтаксического разнообразия продвигаться от упрощённой учебной постановки задачи до непрерывно расширяющегося класса практических задач.

Не приводя определение термина, Роберт Флойд в качестве примера привёл «Структурное программирование» как методологически доминирующую парадигму, нацеленную на нисходящее проектирование, пошаговое улучшение, сведение задачи к более простым подзадачам и переход от конкретных данных и процедур машинного уровня к более абстрактным объектам и функциям, позволяющим продумывать модули, выделяемые при нисходящем проектировании.

Трудности учебного процесса в отмеченных Флойдом проблемах не случайны. Рекурсивные сопрограммы не изучаются в учебной практике – их трудно отлаживать, не было удобных параллельных систем программирования для лабораторных работ. Недетерминизм изучается как теория без перехода к производству, т. к. хватает более изученных задач, с ними работать легче. Макротехнику трудно отлаживать и проверять результат. Идея языка Lisp, что программы можно обрабатывать, как данные, противоречит традиции императивно-процедурного программирования и требует перехода к сложному абстрагированию. Обучению семантическим методам препятствует математический ценз, необходимый для перехода от упрощённой учебной постановки задачи к более сложным и абстрактным. Упрощённые кажутся несерьёзными и для производства бесполезными, а возникающие потом непрерывно расширяющиеся и альтернативные классы практических задач влекут страх перед новыми проблемами, решения которых преподавателю не известны.

Понимание любой парадигмы скрывает переход от имплицитного, интуитивного образа мышления и скрытой грамматики решения проблем к системе осознанных понятий и приоритетов, используемых в определённом конкретном виде деятельности или поведения, включая речевое поведение или вербализацию решений, а для программирования – выбор схемы жизненного цикла программ их решения и стиля программирования, влияющих на трудоёмкость отладки программ и их жизнеспособность. Наследуя историю понимания и восприятия, следует отметить, что парадигмы имеют специфику, связанную с предпочтением программируемого эксперимента, похожего на удостоверение результатов в физике.

Следует отметить, что списки парадигм в описаниях языков программирования (ЯП) могут не соответствовать смыслу парадигм [15]. Обычно известны предшественники и сфера влияния ЯП. Заметно отставание осознания парадигм от их практического

применения на 10-15 лет. Появляется инструмент, потом вдруг обнаруживается, что он поддерживает новую парадигму.

3. Сопутствующие и близкие понятия. Отдельный вопрос лексикона программирования – отличие парадигм от других сопутствующих и близких понятий, слабо отличающихся в речевой практике [14, 16]:

- Технология – комплекс методик для гарантированного получения результатов программирования при выполнении определённых условий, соответствующих постановке задачи.
- Методика – готовый рецепт для проведения каких-либо целенаправленных действий.
- Стил – форма деятельности, характеризующая особенности общения, манера себя вести, методы и приёмы работы, возможно, отражающие склад мышления.
- Техника – устройства для повышения эффективности труда, а также снижения вероятности ошибок человека при выполнении каких-либо сложных операций.
- Метод – способ достижения цели, совокупность приемов и операций практического и теоретического освоения действительности.
- Формы – типичный образец оформления программ.
- Виды – характеристика составляющих программы, их внешнее представление.

Технология может использовать комплекс парадигм, вызванных разнообразием требований к отдельным фазам производства. Методика – может быть частью парадигмы без учёта остальных аспектов. Стил – может внешне быть похожим, но содержательно не соответствовать решаемой задаче. Техника – может быть частью парадигмы без принципиального влияния на успех в программировании решения задач. Метод – может быть частью парадигмы на ограниченном классе задач, а на других выходить за пределы её успешного применения. Формы – могут внешне быть похожими, но без содержательного соответствия решаемым задачам. Виды – могут маскировать иные подходы, даже противоречащие провозглашаемой парадигме.

Соглашаясь, что парадигма – это образец, рассмотрим несколько часто цитируемых определений³.

Диомидис Спинеллис: «Слово «парадигма» используется в программировании для определения семейства **обозначений** (нотаций), разделяющих общий способ (методику) реализаций программ» – реально это сведение к синтаксису.

Венская методика в конце 1950-ых констатировала, что сводимые к общему абстрактному синтаксису ЯП эквивалентны. Синтаксис – предельно изученный в теории аспект представления программ, определены нормализованные и канонические формы, достаточные для автоматического конструирования анализаторов и генераторов программ. Практика обучения программированию показывает, что на синтаксис можно не обращать внимания, т. к. ошибки такого рода ловит система программирования, что побуждает быстро научиться их исключать.

Многие определения сводят термин «парадигма» к понятию «подход»:

- Дэниел Бобров (D. G. Bobrow): парадигма определяется как «стил программирования как описания **намерений** программиста».
- Брюс Шрайвер (Bruce Shriver): определяет парадигму программирования как «**модель** или подход к решению проблемы».
- Линда Фридман (Linda Friedman): «подход к решению проблем программирования».

³ Определения из раздела «Парадигма программирования» Википедии

- Памела Зейв (Pamela Zave): «способ размышления о компьютерных системах» (в оригинале «way of thinking about computer systems»).

Такие определения отражают уровень «технического задания», но не поясняют причин развития репертуара парадигм и расширение спектра задач программирования. Несколько детальнее определение парадигм как способа или метода.

Тимоти Бадд (Т. А. Budd.) : «способ концептуализации того, что значит „производить вычисления“, и как задачи, подлежащие решению на компьютере, должны быть структурированы и организованы». - Это уровень «Технического проекта», но нет перехода собственно к программированию после проектирования, а также к отладке и развитию программ.

Имеется и определение парадигмы как классификации и проверки выбора нужных средств: Питер Вегнер (Peter Wegner)⁴ предлагает в его работе «Concepts and paradigms of object-oriented programming» парадигмы определять как «правила классификации языков программирования в соответствии с некоторыми условиями, которые могут быть проверены» [16].

4. Проверяемые правила и новизна задач. Возникает вопрос: какие параметры позволяют различать парадигмы программирования и сферу их успешного применения? Насколько возможно измерение зависимости успеха программирования от выбора парадигмы (трудоемкость, производительность)? Логично предположить, что измерение зависимости успеха программирования связано с оценкой степени изученности решаемых задач [17]. Это можно проиллюстрировать на аналогии с решением проблем создания компьютерного мира.

Макетный образец – концептуальный минимум, показывающий произошедшее **открытие** новых задач, ранее их не замечали, абсолютно нет образцов для сравнения пользы от их решения (аналитическая машина Ч. Беббиджа).

Экспериментальный полигон – потенциальный максимум, **изобретение** альтернативных и исследование как можно более полного пространства пробных решений (авторы первых компьютеров – «храняемая программа»)

Практичная версия – производственный компромисс, **рационализация** уже известных готовых решений обычных, типовых постановок задач и их улучшение ради экономической целесообразности снижением трудозатрат (языки и системы программирования, базы данных, операционные системы, программные инструменты).

Эффективная реализация – **стабилизация** предельного баланса трудоемкости и производительности для решения точно поставленных задач, улучшение которого не оправдано на текущем уровне знаний (требования и качество, «правильность», эталоны, готовые встраиваемые модули).

История программирования для компьютеров начиналась с решения точно поставленных задач, достаточно изученных в докомпьютерную эпоху и потому приспособленных к нисходящей методике программирования. Решения новых задач формируются по восходящей методике, главное, по меткому замечанию А.Н. Томилина, чтобы была решена полезная задача [18]. Отмертм сразу, что компьютерная инженерия развивается на сравнительно стабильном классе задач усовершенствования техники. Программное производство поддерживает непрерывное расширение класса решаемых задач, связанных с кругом пользователей, элементной базой и стремительным развитием ИТ. Это объясняет резкий дисбаланс между прогрессом аппаратуры и отставанием понимания её возможностей пользователями, а также определяет вхождение в почти любой

⁴ Вегнер П. Программирование на языке АДА. М. Мир. Пер. с англ. 1983. 240 с.

программистский проект некоторого числа новых задач, решение которых никому не известно, и ставит образовательную проблему самообучения программистов [19].

Открытия Беббиджа в начале 1830-х ждали признания почти сто лет, изобретения К. Цузе, В. Атанасова, Г. Айкена, Дж.П. Эккерта и др. в первой половине двадцатого века происходят в соревновании за приоритеты и патенты на изобретения, во второй половине начинается период рационализации индустрии элементной базы и программного обеспечения, теперь можно видеть стремление гарантировать надёжность и безопасность использования ИТ стабилизацией используемых средств [17].

Наследники Ч. Беббиджа воспроизвели по его чертежам макетный образец аналитической машины на уровне технологической точности его времени, чем опровергли объяснение неудачи чрезмерным опережением технических возможностей. Основные трудности были связаны с общим непониманием проблемы автоматизации вычислений и отсутствием речевой практики обсуждения возможных решений. Для каждого открываемого элемента проекта приходилось придумывать названия, позволяющие приблизительно воспринимать и обсуждать его назначение. А. Тьюринг, Г. Айкен, В. Атанасов и Дж. фон Нейман упоминают о предварительном знакомстве с идеями Ч. Беббиджа и проектом аналитической машины, что позволило от открытий перейти к изобретениям на фоне уже понятного проекта макетного образца, лексикона, формальных моделей вычислимости и множества примеров отдельных ранее созданных вычислительных устройств. На этом же фоне К. Цузе и Дж.П. Эккерт изобретают свои машины независимо и самостоятельно. Здесь стоит принять во внимание существование проблем, имеющих единственное разумное решение, к которому с необходимостью приходит каждый конструктор без всякого заимствования. В этом кругу неслучайных решений Дж. фон Нейман приходит к идее иерархии памяти, согласно которой внешние устройства и средства ввода-вывода данных обмениваются с оперативной памятью, а не с арифметическим и логическим устройствами, как это было в более ранних архитектурах [20]⁵.

«2.7 Четвертое: устройство должно иметь органы для передачи (числовой или другой) информации от R в его определенные части, C и M. Эти органы образуют его вход, четвертую конкретную часть: I. Видно, что **это лучше всего делать все переводы из R (посредством I) в M, а не напрямую в C** (ср. f14.1, 15.3g).

2.8 Пятое: устройство должно иметь органы для передачи (предположительно, только числовой информации) из его конкретных частей C и M в R. Эти органы образуют его выход, пятую конкретную часть: O. Будет видно, что **снова лучше делать все переводы из M (посредством O) в R, и никогда напрямую из C** (см. f14.1, 15.3g) ».

Если степеням изученности решаемых проблем сопоставить последовательность парадигм программирования: логическое, функциональное, объектно-ориентированное и императивно-процедурное, то можно сделать вывод, что парадигма программирования – это проявление образа мышления в принятии решений, зависящего от степени изученности постановок задач, выбора схемы жизненного цикла программ и стиля программирования, влияющих на трудоёмкость отладки программ и их жизнеспособность. Принятие решений с учётом прогноза развития может учитывать и другие параметры:

- Легко – зависимость от одного параметра.

⁵ «2.7 Fourth: The device must have organs to transfer (numerical or other) information from R into its specific parts, C and M. These organs form its input, the fourth specific part: I. It will be seen that it is best to make all transfers **from R (by I) into M, and never directly into C** (cf. f14.1, 15.3g).

2.8 Fifth: The device must have organs to transfer (presumably only numerical information) from its specific parts C and M into R. These organs form its output, the fifth specific part: O. It will be seen that it is again best to make all transfers **from M (by O) into R, and never directly from C**, (cf. f14.1, 15.3g).» [20]

- Часто – взаимодействие двух независимо изменяющихся параметров.
- Редко и трудно – взаимодействие большего числа параметров.

Для мультипарадигмальных ЯП отдельная парадигма – аналог проективной геометрии или плоских проекций в инженерии, дифференциального анализа в математике.

Инженеров учат строить проекции, по которым можно вообразить и сделать объёмную конструкцию. Проверка принадлежности или поддержки парадигмы подразумевает возможность измеримых характеристик (трудоемкость, производительность), допускающих внешнюю демонстрацию [10, 11, 21].

5. Изученность и абстрагирование. В практике парадигма программирования (ПП) является технологичным инструментом интуитивного грамматического описания фактов, событий, явлений и процессов, возможно, не существующих одновременно, но объединяемых в общее понятие в рамках деятельности по созданию свободных от ошибок решений нужных задач.

Различие основных ПП подобно разнице в уровне изученности решаемых задач:

- предельная эффективность (готовый алгоритм),
- практичная версия (зрелый лексикон приложения),
- экспериментальный максимум (исследование),
- концептуальный минимум (не вполне ясная перспектива).

Выделяются категории (монады) языковых средств, подобные частям процессора и конфигурациям аппаратуры, а вместе с ними – новые проблемно-ориентированные языки, лишь отчасти решающие проблемы понятного и лаконичного описания семантики языков и систем программирования, их реализационной и эксплуатационной прагматики, выделения из программ автономно развиваемых компонентов, учёт механизмов имплицитного обучения, использования интуиции и неявного знания [9,19]. Функциональное программирование обладает высокой моделирующей силой, его можно использовать как нормализующую форму при сравнении семантики [6].

Существует качественное различие между решением **простых** задач на небольшом числе примеров, представимых легко обозримыми данными, и решением **сложных** задач, требующих анализа большого разнообразия редко встречающихся ситуаций и трудно обозримых данных, осложнённых повышенными требованиями к правильности, надёжности и другим критериям. Нет признания, что устанавливается соответствие осознанных и интуитивных представлений, в частности, выражающееся разницей уровней абстрагирования понятий задач и языков программирования, преодоление которой требует представления схем и отдельно – фрагментов для их наполнения [1].

Независимо от парадигмы программирования трудоемкость тесно связана с уровнем абстрагирования используемых понятий, часть которых могут не иметь аналогов в речевой практике:

- Низкоуровневое программирование – возможность реализации эффективных решений ценой использования общего доступа к любым слабо защищенным структурам данных.
- Языки высокого уровня – использование иерархии, независимые компоненты которой защищены от бесконтрольного взаимодействия.
- Средства сверх высокого уровня (языки спецификаций, языки параллельного программирования, системы представления знаний и т.д.) – полнота пространства решений по отдельным направлениям проблем, связанных с разработкой и применением программ.
- Проблемно-ориентированные языки (DSL) – переход от наследования библиотек к наследованию подязыков.

6. Практичные и стратегические парадигмы программирования. Внешне различие парадигм программирования (ПП) сводится к приоритетам в оценке важности понятий, используемых для решения задач разработки программ или изучения методов программирования в четырёх направлениях: вычисления, управление вычислениями, хранение данных и их укрупнение – комплексы. Известно, что усложнение по одному направлению обычно не вызывает затруднений, два направления уже требуют некоторых усилий, три или четыре направления часто оказываются принципиальным препятствием для понимания. Это позволяет дать формальное описание типовых категорий семантических систем, характерных для поддержки конкретных базовых ПП и оценки их сложности. Описанию производных ПП в таком случае можно сопоставлять нечто вроде семантического индекса, отражающего разницу с базовой ПП. К базовым парадигмам в настоящее время принято относить императивно-процедурное (ИПП), функциональное (ФП), логическое (ЛП) и объектно-ориентированное (ООП) программирование, а также иногда параллельные вычисления (ПВ). Альтернативой, преимущественно в образовательной среде, является выделение в качестве фундаментальных парадигм функционального, параллельного и императивно-процедурного программирования, а логическое и объектно-ориентированное относят к дополнительным парадигмам, преподавание которых обременено необходимостью знания некоторых предметных областей.

Постановки задач в рамках ИПП начинаются с определённого алгоритма решения задачи, для которого прежде всего принимают решения по организации хранимых данных и логике управления их обработкой (информационно-логический граф). Производные ИПП выделяют разные методы представления данных и организации порождаемых программой последовательных процессов: автоматное – без процедур; скалярное – без структур данных; структурное – регулярная логика и типы данных; сборочное – крупноблочность; диаграммно-графовое – визуальность; сценарное – одноуровневое, поверхностное; операционное – управление заданиями; языки действий – управление акторами; векторно-ориентированные – обработка массивов; синхронизация над общей памятью и т. п.

Постановка задач ООП основана на доступе к иерархии классов объектов с готовыми работоспособными методами решения ряда задач некоторой сферы приложения ИТ. Требуется без лишних трудозатрат уточнить эту иерархию, чтобы приспособить её к решению новых востребованных задач этой области, её расширения или ей подобной. Производные ООП дают разнообразные конкретизации понятия «класс объектов»: аспектно-ориентированное – разделение слоёв (вертикальное слоение А.Л. Фуксмана [21]); прототипная – без классов; табличная – с таблицами в роли классов; обобщённая – с абстрактными типами данных в роли классов; DSL – языково-ориентированная настройка над gss; субъектно-ориентированное – объекты с поведением; агентно-ориентированное – выделение исполнителей; сервис-ориентированное – выделение обслуживания и т.п.

Задачи ФП ориентированы на известную предметную область, в рамках которой следует выбрать и отладить систему универсальных функций вычисления результатов по заданным аргументам, используя символьное представление данных с иерархией структур над ними, пригодное для создания и исследования прототипов решения задач из этой области. Производные ФП представляют собой вариации в методах организации вычислений: ленивые вычисления – откладывание действий; комбинаторное – сведение к функциям; гомеоконное – подобию структур данных и обрабатываемых программы; аппликативное – подгрузка любого базиса; потоковый параллелизм – множество результатов; правило переписывания – подстановка; бесточечное – форма записи; алгебраическое – выделение семантических систем; инсерционное – динамические вставки-замены (точки

роста С.С. Лаврова [22]; грамматико – ориентированная обработка (BNF – формы Бэкуса-Наура); стек-ориентированное (Forth) и пр.

Решения задач ЛП исходят из заданной коллекции фактов, прецедентов и отношений, частично характеризующей новую задачу, пока не имеющую эффективного или практического решения. Надо привести эту коллекцию к форме, демонстрирующей возможность ответов на практические запросы относительно данной задачи. Производные ЛП используют разные подходы к смягчению зависимости получения результатов от случайного, избыточного или недостаточного детерминизма при переборе вариантов: откаты-бэктрекинг – перебор вариантов; программирование в ограничениях – границы определённости; представление знаний – привлечение экспертов; вопрос-ответное – задачи поиска; индуктивное – вывод решения; естественно-языковое – запросы на известном подмножестве естественного языка; онтологическое – системы понятий в предметной области; недетерминированное – без преждевременного упорядочения и др.

Постановки задач организации **параллельных вычислений** учитывают существование областей приложения, в которых недостаточна скорость получения результатов по доступным программам решения конкретных задач. Парадигмы этого направления находятся в стадии формирования из-за сложности перехода от готовых решений к масштабируемым решениям сверхвысокого уровня, допускающим автоматическую настройку на реальные конфигурации оборудования, а также из-за отсутствия традиции представлять течение времени в классических математических моделях. Высокопроизводительные вычисления расширяют спектр методов управления вычислениями и критериев эффективности программ благодаря возможности использования процессорных резервов и наследования ранее отлаженных программ, как правило, посягая на их неприкосновенность. Это позволяет рассматривать такие задачи, как бесспорный полигон для признания потенциала доказательных методов программирования и верификации. Есть основания доказательные методы рассматривать, как важную составляющую неограниченных парадигм, работоспособность которых зависит от качества автоматизированной проверки **правильности** функционирования программ.

Ряд **перспективно-стратегических** парадигм, ориентированных на совершенствование программирования как деятельности, получили особую поддержку академика А.П. Ершова. Перспективно-стратегические парадигмы программирования нацелены на повышение квалификации программистского корпуса, выделяя в качестве фундаментальных теоретическое, системообразующие, учебно-ознакомительное, экспериментальное и другие парадигмы программирования, отличия которых не сводятся к приаппаратной или реализационной характеристике, но могут быть выражены в терминах приоритетов и наполнения категорий семантических систем [17].

Парадигмы теоретического программирования базируются на схематологии, алгоритмическом, доказательном и верификационном программировании. Системообразующие парадигмы программирования, кроме процессорного уровня, учитывают особенности многократного использования внешней памяти и периферийных устройств, необходимых при разработке инструментария для накопительных эффектов обработки данных, включая системы программирования, операционные системы, базы данных и многопроцессорные комплексы. Здесь системное программирование отличается от поддержки отдельного прогона программы переходом к обеспечению серии прогонов и отладки улучшаемых программ, а также, операционных систем, систем управления базами данных и средств доступа к многопроцессорным комплексам. Отладка может рассматриваться как вторичное проектирование программы или повышение степени

изученности решаемой задачи – взаимная учёба разработчиков и пользователей. Учебное программирование дополняется олимпиадным, а также непрофессиональным и экспериментальным, позволяющим любителям программирования формировать свою квалификацию методом самообучения (табл. 1).

Таблица 1. Систематизация парадигм программирования.

Практичные	Парадигмы программирования	Стратегические	Парадигмы программирования
Базовые	Императивно-процедурное Функциональное Логическое Объектно-ориентированное	Фундаментальные	Алгоритмическое Теоретическое (схематология) Доказательное Верификационное
Технологичные	Оптимизационное Трансформационное (проекции) Отладочное и тестирование Свободно-распространяемое	Системно-расширяющие	Системное (компиляторы) Операционные системы Системы управления БД Многопроцессорные комплексы
Безграничные	Большеобъёмные данные Дистанционный доступ Параллельные вычисления Суперкомпьютерное (высокопроизводительное)	Образовательные	Учебное Олимпиадное Непрофессиональное Экспериментальное (любительское)

7. Трудно решаемые проблемы и парадигмы программирования. Часто утверждают, что основная задача программиста – это кодирование созданных математиками алгоритмов, выполнение подготовленных менеджерами технических заданий или реализация разработанных аналитиками спецификаций. Перспективно-стратегические парадигмы программирования академика А.П. Ершова различаются по обнаруживаемым проблемам и подходам к их решению, открывающим новые пространства решений, по мере изучения которых проблемы преобразуются в практические задачи с примерами типовых решений. Нахождение практичных методов и создание удобных средств приводит к исчезновению проблемы, кажется, что её и не было. Черёда пройденных Андреем Петровичем парадигм программирования доказывает, что истинная **миссия программирования** – решение новых задач при отсутствии готовых средств и типовых методов, что делает актуальным самообучение программистов методам решения изобретательских и новых задач на любом материале [19]. Многие из этих парадигм для его коллег и учеников стали полигоном научных исследований, другие парадигмы обрели аналоги по мере развития ИТ, некоторые временно оттеснились от массового программирования, ждут своего времени [17]. Темп проявления новых проблем и появления парадигм программирования усложняет процесс формирования профессионального лексикона. Развитие современного программирования проходит фазу формирования парадигм параллельного программирования, связанных с проблемами обработки больших массивов данных, организации суперкомпьютерных вычислений и эксплуатации сетевых компьютерно – коммуникационных взаимодействий (табл. 2).

Таблица 2. Взаимосвязь между обнаружением проблем и проявлением парадигм.

№ ⁶	Проблемы	Практика	Перспективы
1	Практичность	Технологичное программирование	
2	Надёжность		Теоретическое программирование
3	Трудоёмкость	Системное программирование	
4	Результативность		Алгоритмическое программирование
5	Эффективность	Оптимизационное программирование	
6	Эквивалентность		Доказательное программирование
7	стартовый барьер	Ознакомительное программирование	
8	Обучаемость		Учебное программирование
9	Производство	Операционные системы	
10	Исследования		Мультипарадигмальное программирование
11	Новые машины	Многопроцессорные комплексы	
12	Новые языки		Многоязыковое программирование
13	Интеллектуальные инструменты	Экспериментальное программирование	
14	Интеллектуальные технологии		Исследовательское программирование
15	Искусственный интеллект	Непрофессиональное программирование	
16	Пространство решений		Параллельное программирование
17	Свойства исполнимого кода	Типизация данных	
18	Правильность программ		Верификационное программирование
19	Доступ к новым источникам	Системы управления БД	
20	Лексикон		Популяризация знаний
21	Устойчивость систем	Конструктивное программирование	
22	Корректность программ		Трансформационное программирование
23	Полиграфия	Издательское программирование	

24	Фактография		Редакционное программирование
25	Прогресс элементной базы	Школьная информатика	

8. Пространство постановок задач. По трудоёмкости решения вполне очевидно предпочитают стабильные задачи, удобно использующие императивное программирование с добавлением обработки векторов. Несколько труднее решаются развивающиеся задачи, допускающие множественность решений, варианты и пользовательские классы понятий, обычно решаемые в рамках ООП, функционального или логического программирования. Возникает разнообразие структур данных, контроль типов данных и сигнатур операций, методов непрерывной разработки, отладки, тестирования и верификации программ.

Более сложные задачи требуют усложнения методов автоматизации программируемых решений, что с одной стороны дают языки сверх высокого уровня, а с другой стороны – создание новых языков программирования – DSL-языки. Значительная доля таких задач связана с необходимостью эффективной организации параллельных вычислений и процессов на современной технике, включая асинхронное программирование, параллельное программирование над общей памятью и синхронизацию функционирования независимо создаваемых и улучшаемых программ. Многие такие задачи обладают повышенными требованиями к надёжности, безопасности, жизнеспособности, производительности.

Разработка систем программирования для решения сложных задач обычно представляет собой обработку данных не менее четырёх форматов: текст, структуры, коды, библиотеки. Кроме проблем реализации обработчиков текстов на языках программирования, решаются менее формализованные, но не менее сложные задачи, связанные с методиками, инструментами и оборудованием, что существенно влияет на требования к уровню квалификации системного программиста.

9. Современные требования к языкам и системам программирования. Одна из болезненных проблем применения ИТ – необходимость их непрерывного улучшения, лишь отчасти связанного с обновлением аппаратуры. Техника улучшения реализуется как обновление операционных и прикладных программных систем, нередко сопровождаемое искажением функционирования сторонних инструментов. Не исключено, что такое положение дел навязано исходным убеждением, что «полезная» программа может быть создана раз и навсегда. Само понятие пользы подвержено незаметному развитию, влекущему необходимость пересмотра ранее выполненных решений, что приводит к итеративности процесса разработки программ решения практических задач.

Другая проблема связана с пропускной способностью восприятия, для учёта возможностей которой нужна методика создания лаконичных и конструктивных форм, позволяющих сложные программы верифицировать по частям, анализируя их отдельные свойства без разрушения взаимосвязей в полной программе. Имеется и обратная проблема – расширяемость программ по мере развития класса частично решённых задач. Эта проблема ярко проявляется в задачах организации параллельных вычислений на фоне имеющихся программ решения тех же задач в обычной императивно-процедурной парадигме программирования.

Заключение. Таким образом, анализ и сравнение языков и систем программирования, а также их выбор при решении практических задач можно выполнять на основе классификации особенностей класса трудно решаемых проблем, поиска подходящих парадигм программирования, а при отсутствии парадигм с подходящим прогнозом трудоёмкости – изобретение новых парадигм программирования. Как показывает опыт

развития Новосибирской школы А.П. Ершова, такой путь может дать конструктивные результаты и обеспечить повышение уровня квалификации программистского корпуса, являющегося ключевым для достижения надёжности и безопасности современных ИТ [17].

Понимание разницы между парадигмами программирования как различий в упорядочении приоритетов принятия решений в процессе полного жизненного цикла программ, начинающегося с постановки задачи, позволяет наметить ответы на вопросы, перечисленные в начале статьи:

- Стремительно растёт число языков программирования вслед за столь же стремительным расширением пространства решаемых задач, часть которых ранее не были заметны.
- Для обосновывания выбора парадигм и языков программирования для решения конкретной задачи, следует определить степень её изученности и последовательность приоритетов, вытекающих из требований к её решению в виде программы.
- Параметры, позволяющие определять, какие именно парадигмы поддерживает язык программирования, проявляются при выделении монопарадигмальных подязыков, схема понятий которых удобно упорядочивается в соответствии с предполагаемыми парадигмами.
- Прогнозировать трудоёмкость разработки программы на базе определённой системы программирования можно по оценке степени изученности решаемых подзадач и поддержке системой программирования выбираемых парадигм.
- Парадигму от технологии, методики, стиля, техники, метода и других понятий отличает её обусловленность скрытой, интуитивной грамматикой деятельности, образом мышления, пониманием приоритетов для успешного полного жизненного цикла программ, а не только собственно программирования.
- Программист отвечает за правильность и производительность программ даже в тех случаях, когда ему навязывают выбор средств и методов потому, что не устранима возможность дополнять систему программирования библиотечными модулями, способными компенсировать исходное отсутствие нужной парадигмы.

Всё вышеизложенное можно рассматривать как методику формирования лексикона программирования в современных условиях развития ИТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Городняя Л.В. Гуманитарные факторы программирования. Новосибирск: СО РАН. 2020 г. 163 с.. ISBN 978-5-6044349-4-9
- 2 Городняя Л.В. Перспективно стратегические парадигмы программирования Академика Андрея Петровича Ершова //5-я международная конференция «Развитие вычислительной техники в России, странах бывшего СССР и СЭВ (SORUCOM 2020)». 2020. С. 87-101
- 3 П. Ершов Предварительные соображения о лексиконе программирования. 1983. Режим доступа: <http://rkka21.ru/ershov-lexicon.htm>
- 4 Городняя Л. В. Парадигма программирования. Учебное пособие // Лань Спб. 2019. ISBN 978-5-8114-3565-4. 232 с.
- 5 Floyd R. W. (1979). The paradigms of Programming Communications of the ACM 22 (8). 455p.
- 6 Городняя Л.В. Парадигмы программирования: анализ и сравнение. Новосибирск. СО РАН «Наука» 2017. 232 с. Режим доступа: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2043045
- 7 Городняя Л.В. Методика парадигмального анализа языков и систем программирования // XX Всероссийская научная конференция г. Новороссийск. М.:

- ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. С. 262-277. Режим доступа: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/03.pdf> DOI:10.20948/ abrau-2019-03
- 8 Лавров С.С. Методы задания семантики языков программирования // Программирование. 1978. № 6. С. 3-10.
 - 9 Городняя Л.В. О представлении результатов анализа языков и систем программирования // XX Всероссийская научная конференция г. Новороссийск. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018.
 - 10 Городняя Л.В. Парадигмальная декомпозиция определения языка программирования // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции г. Новороссийск. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. С. 115-127. Режим доступа: <http://keldysh.ru/abrau/2016/21.pdf>
 - 11 Городняя Л.В., Кирпотина И.А. Методика декомпозиции сложных информационных систем // 30-я Международная конференция "Современные информационные технологии в образовании 2019" ИТО-Троицк-Москва. 2019 г. С.311-312
 - 12 Лаврищева Е.М. Программная инженерия и технологии программирования сложных систем. Учебник для вузов. М. 2018 г. 432 с.
 - 13 Maintenance. Диаграмма, представляющая хронологию появления и наследования многих ЯП. Режим доступа: <https://www.levenez.com/lang/>
 - 14 Peter Van Roy. Диаграмма с результатами сравнения более 30-ти парадигм программирования. Режим доступа: <https://www.info.ucl.ac.be/~pvr/paradigmsDIAGRAMeng108.pdf>.
 - 15 Энциклопедия языков программирования. Режим доступа: <http://progopedia.ru/>
 - 16 Peter Wegner. 1990. Concepts and paradigms of object-oriented programming. SIGPLAN OOPS Mess. 1. 1990. Pp. 7-87. . Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/DOI:dx.doi.org/10.1145/>
 - 17 Городняя Л.В., Кирпотина И.А. О проблеме достоверности доступной в Интернете исторической фактографии // ТРУДЫ SORUCOM. 2017. С. 46-55. Режим доступа: <https://www.sorucum.org/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucum-2017/1648>
 - 18 Томилин А.Н. Информационные системы и научные телекоммуникации // Вестник РФФИ. 1998. № 4.
 - 19 Городняя Л.В., Кирпотина И.А. Электронное издание как механизм самообучения // Тр. Междунар. научно-практической конф. «Новые информационные технологии в университетском образовании». Томск. 2000. С. 101–102
 - 20 John von Neumann. First Draft of a Report on the EDVAC. University of Pennsylvania 1945.
 - 21 Фуксман А.Л. Технические аспекты создания программных систем. М.: Статистика. 1979. 180 с.
 - 22 Бабаев И.О., Новикова Ф.А., Петрушина Т.И. Язык ДЕКАРТ входной язык системы СПОРА. М.: Финансы и статистика. 1981. вып.1. С. 35-73

UDK 004.43 (042.4)

FROM DIFFICULT PROBLEMS TO PROGRAMMING PARADIGMS

Lidia V. Gorodnyaya

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Scientist,
e-mail: gorod@iis.nsk.su

Ershov Institute of Informatics Systems (IIS)
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
630090 Novosibirsk, Academician Lavrentiev Avenue, 6.

Annotation. The article is devoted to the description and analysis of the relationship between hard-to-solve problems and the process of forming programming paradigms that can be useful in solving such problems. The material for analysis is provided by the history of computer technology, as well as the inconspicuous line of scientific activity of the leader of programming A.P. Ershov in the field of manifestation and development of programming paradigms. The results of the analysis made it possible to systematize programming languages, present an assessment of their similarities and differences, which allows constructing laconic definitions regarding paradigmatic models. This makes it possible to stratify the presentation of the peculiarities of the semantics of programming language into autonomously developed components in the process of step-by-step development of experimental programming systems and the formation of schemes for studying and teaching system programming, which can be useful for increasing software performance. Along the way, a ranking of problem statements is formed according to the degree of their knowledge and staging, which affects the assessment of labor intensity.

Keywords. systematization of programming languages, paradigm models, laconic definitions, A.P. Ershov, programming paradigm, strategic paradigms, programming problems, degree of study of problem statements, von Neumann architecture.

REFERENCES

1. Gorodnyaya L. V. Gumanitarnyye faktory programmirovaniya. Novosibirsk: SO RAN [Humanitarian factors of programming]. Novosibirsk: SB RAS = SB RAS. 2020. 163 p. ISBN 978-5-6044349-4-9 (in Russian)
2. Gorodnyaya L. V. Perspektivno strategicheskiye paradigmy programmirovaniya Akademika Andrey Petrovicha Yershova [Prospectively strategic programming paradigms of Academician Andrey Petrovich Ershov] // 5-ya mezhdunarodnaya konferentsiya «Razvitiye vychislitel'noy tekhniki v Rossii, stranakh byvshego SSSR i SEV (SORUCOM 2020)» = 5th international conference "Development of computer technology in Russia, the countries of the former USSR and CMEA (SORUCOM 2020)". 2020. Pp. 87-101.
3. P. Yershov Predvaritel'nyye soobrazheniya o leksikone programmirovaniya [Preliminary considerations about the vocabulary of programming]. 1983. Available at: <http://rkka21.ru/ershov-lexicon.htm> (in Russian).
4. Gorodnyaya L. V. Paradigma programmirovaniya. Uchebnoye posobiye [Programming paradigm. Textbook] // Lan' Spb = Lan SPb. 2019. ISBN 978-5-8114-3565-4. 232 p.
5. Floyd R. W. (1979). The paradigms of Programming.-- Communications of the ACM 22 (8). 455p.
6. Gorodnyaya L.V. Paradigmy programmirovaniya: analiz i sravneniye [Programming paradigms: analysis and comparison] // Novosibirsk. SO RAN «Nauka» = Novosibirsk. SB RAS "Science". 2017. 232 p. Available at: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2043045
7. Gorodnyaya L.V. Metodika paradigmal'nogo analiza yazykov i sistem programmirovaniya [Methods of paradigm analysis of languages and programming systems] // XX Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya g. Novorossiysk. M.: IPM im. M.V.Keldysha = XX All-Russian scientific conference Novorossiysk. M.: IPM im. M.V. Keldysh. 2019. Pp. 262-277. Available at: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/03.pdf> DOI: 10.20948 / abrau-2019-03.

8. Lavrov S.S. Metody zadaniya semantiki yazykov programmirovaniya [Methods for setting the semantics of programming languages] // Programirovaniye = Programming. 1978. № 6. Pp. 3-10.
9. Gorodnyaya L.V. O predstavlenii rezul'tatov analiza yazykov i sistem programmirovaniya [On the presentation of the results of the analysis of languages and programming systems] // XX Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya g. Novorossiysk M.: IPM im. M. V. Keldysha = XX All-Russian Scientific Conference Novorossiysk M.: IPM im. M.V. Keldysh. 2018.
10. Gorodnyaya L.V. Paradigmal'naya dekompozitsiya opredeleniya yazyka programmirovaniya [Paradigmatic decomposition of programming language definition] // Nauchnyy servis v seti Internet: trudy XVIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii g. Novorossiysk. M.: IPM im. M.V. Keldysha = Scientific service on the Internet: proceedings of the XVIII All-Russian scientific conference in Novorossiysk. M.: IPM im. M.V. Keldysh. 2016. Pp. 115-127. Available at: <http://keldysh.ru/abrau/2016/21.pdf>.
11. Gorodnyaya L.V., Kirpotina I.A. Metodika dekompozitsii slozhnykh informatsionnykh sistem [Methodology for decomposition of complex information systems] // 30-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii 2019" ITO-Troitsk-Moskva = 30th International Conference "Modern Information Technologies in Education 2019" ITO-Troitsk-Moscow. 2019. Pp. 311 – 312.
12. Lavrishcheva Ye.M. Programmnaya inzheneriya i tekhnologii programmirovaniya slozhnykh sistem. Uchebnik dlya vuzov [Software engineering and technologies for programming complex systems. Textbook for universities] // M. 2018. 432 p.
13. Maintenance. Diagramma, predstavlyayushchaya khronologiyu poyavleniya i nasledovaniya mnogikh YAP. Available at: <https://www.levenez.com/lang/>
14. Peter Van Roy. Diagram showing the results of comparing more than 30 programming paradigms. Available at: <https://www.info.ucl.ac.be/~pvr/paradigmsDIAGRAMeng108.pdf>
15. Entsiklopediya yazykov programmirovaniya [Encyclopedia of programming languages]. Available at: <http://progopedia.ru/>
16. Peter Wegner. 1990. Concepts and paradigms of object-oriented programming. SIGPLAN OOPS Mess. 1. 1990. Pp. 7-87. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/10.1145/>
17. Gorodnyaya L.V., Kirpotina I.A. O probleme dostovernosti dostupnoy v Internetе istoricheskoy faktografii [On the problem of authenticity of historical factography available on the Internet] // TRUDY SORUCOM = SORUCOM PROJECTS. 2017. Pp. 46-55. Available at: <https://www.sorucum.org/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucum-2017/1648>
18. Tomilin A.N. Informatsionnyye sistemy i nauchnyye telekommunikatsii // Vestnik RFFI = RFBR Bulletin. 1998. № 4.
19. Gorodnyaya L.V., Kirpotina I.A. Elektronnoye izdaniye kak mekhanizm samoobucheniya [Electronic publication as a self-learning mechanism] // «Новые информационные технологии в университетском образовании» = Tr. Int. scientific and practical conf. "New information technologies in university education". Tomsk. 2000. Pp. 101-102.
20. John von Neumann. First Draft of a Report on the EDVAC. University of Pennsylvania 1945.
21. Fuksman A.L. Tekhnicheskiye aspekty sozdaniya programmnykh sistem [Technical aspects of creating software systems] / M.: Statistika = M.: Statistics. 1979. 180 p.
22. Babayev I.O., Novikova F.A., Petrushina T.I. YAzyk DEKART vkhodnoy yazyk sistemy SPORA [The DEKART language is the input language of the SPORA system. M.: Finance and statistics]. 1981. issue 1. Pp. 35-73.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ерженин Роман Валерьевич

к.э.н., генеральный директор ООО «Научно-практический центр ГОСУЧЕТ»,

e-mail: erzhenin@gmail.com

143441, Московская область, Красногорский р-н,
69 км МКАД, п/о Путилково, ООК ЗАО «Гринвуд», стр. 19.

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема повышения качества проектирования крупномасштабных информационных систем государственного управления (КИСГУ). По мнению автора выбор приемлемых параметров функционирования КИСГУ на этапах его макропроектирования сдерживается не столько дефицитом эффективных методов моделирования, сколько отсутствием удобных инструментов, позволяющих приобретать, накапливать и использовать разнородные знания для принятия решений при построении адекватных моделей сложной информационной системы (ИС). В качестве методологической основы интеллектуальной поддержки моделирования и оценки эффективности ИС предлагается использовать комплексную DEA-модель оценки, построенную на принципах структурно-функциональной и территориальной стратификации информации о функционировании сложной КИСГУ. Обзор существующих подходов к оценке сложных ИС и анализ различных инструментальных средств, реализованных на принципах DEA-моделей, позволил сделать вывод о невозможности их использования для целей оценки систем класса КИСГУ. Для поддержки процедуры экспертирования автор предлагает разработать новое web-приложение с использованием Framework Yii2. Для этого в статье описана программная архитектура экспертно-ориентированной системы поддержки принятия решений (СППР) и приведены результаты ее апробации. В качестве информационного обеспечения использовались открытые машиночитаемые данные, содержащие информацию о характеристиках функционирования информационной системы управления государственным бюджетом (ИСУГБ). Полученные результаты оценки ИСУГБ подтверждают гипотезу автора о возможности усиления интеллекта эксперта на этапах проектирования за счет использования специальных инструментальных средств. Предложенный подход может использоваться при проектировании системы для выбора параметров функционирования ИСУГБ, при аудите эффективности деятельности учреждений и в качестве практического пособия для подготовки и переподготовки ИТ-специалистов профильных специальностей.

Ключевые слова: электронный бюджет; аудит эффективности; макропроектирование; моделирование; DEA-АСФ; системы поддержки принятия решений

Цитирование: Ерженин Р. В. Разработка экспертно-ориентированной системы поддержки проектирования крупномасштабной информационной системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 110-120. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.009

Введение. К одной из актуальных проблем в области разработки современных информационных систем (ИС) относят неудачи с их внедрением. Наиболее критическая ситуация складывается с крупномасштабными ИС государственного управления (КИСГУ) как за рубежом [1, 2], так и в России [3, 4].

КИСГУ по классификации организационно-технических систем являются особо-сложными ИС управления, включающие многосортные множества взаимосвязанных и взаимодействующих в пространстве и во времени элементов, формирующие интегративные свойства и функционирующие совместно для достижения поставленных целей [5].

Феномен крупномасштабных систем (КМС) в поле внимания зарубежного научного сообщества [6, 7] появился сравнительно недавно – в конце XX в. – из обобщенной практики управления крупными предприятиями и их объединениями. Индикатором границы для определения класса КМС являются эмерджентные реакции системы на управляющие воздей-

ствия, начиная с некоторых (пороговых) значений количества структурных элементов системы, расположенных на некоторой (пороговой) пространственной протяженности [8]. Управление в крупномасштабных системах имеет отличия от управления в не-крупномасштабных системах, ввиду наличия у первой свойств, не характерных для второй. Системы класса КМС отличаются структурной, функциональной, информационной сложностью, а также сложной динамикой поведения и сложностью проведения их анализа, на которые указывали в своих работах многие отечественные и зарубежные авторы [6, 7, 9, 10].

Без сомнений следует согласиться с мнением ряда исследователей, что степень успешности разработки конкретной ИС адекватно оценивается и подтверждается только в процессе её практического использования [8, 11]. При этом, успешность внедрения ИС, как показывает многолетний опыт разработки программных средств, в высокой степени зависит от выбранных подходов к ее оцениванию на этапах анализа и синтеза.

Экспертное оценивание является одним из важнейших подходов к получению адекватных оценок самых разных характеристик системы [12]. Оценивание эффективности функционирования КМС, в рамках ее проектирования, предполагает привлечение специалистов (экспертов) для решения сложных вопросов, требующих специальных познаний в сопутствующих предметных областях. Рутинные процедуры по анализу эффективности КМС занимают значительную часть в общей трудоемкости проектирования системы, поэтому чаще всего проведение полноценных экспертиз не представляется возможным ввиду ограниченного времени при ограниченных возможностях эксперта.

Если учесть все современные взгляды на этапы и процедуры проектирования КИСГУ, то можно обнаружить, что существует малоизученная проблема совмещения двух противоположных подходов при формализации требований к системе – «нисходящего» (*Top-of-Design*) и «восходящего» (*Bottom-of-Design*). Подобная сложность связана со сложностью совмещения дедуктивного и индуктивного путей описания моделей системы через сложную настройку много-итерационного обмена информацией и знаниями между заказчиками, экспертами, проектировщиками и разработчиками. В процессе подобного сложного взаимодействия различных специалистов при анализе действующей системы и создании новой модели системы выделяются такие задачи, которые не могут быть решены качественно и оперативно ввиду наличия значительного объема информации о параметрах функционирования ИС.

Следует отметить, что производительность труда в информационной сфере и в области проектирования является одним из ключевых направлений научных исследований последних десятилетий [13]. Созданные на их основе комплексные технологии, такие, к примеру, как CALS, и другие компьютеризованные подходы к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоёмкой продукции (CAD/CAE/CAM/PDM/PLM-системы) позволили:

- а) обеспечить качественное информационное сопровождение труда конструктора на всех этапах жизненного цикла изделий, в том числе и при проектировании автоматизированных информационных систем управления производством [14].
- б) сократить объёмы проектных работ, облегчить решение проблем интеграции, адаптации, специализации проектных организаций и т. п. [15]

В то же самое время, в проектировании систем класса КМС, к которым также относятся и КИСГУ, пока не используются какие-либо информационные (интеллектуальные) системы, способные повысить производительность или интеллект специалистов, занятых в проектировании систем, за счет использования специальных моделей, методов и технических приемов управления знаниями.

Между тем, в исследовании [16] предложена модель предметной области (ПрО) моделирования и оценки эффективности системы класса КИСГУ, которая содержит, в том числе, описания модели интеллектуальной системы поддержки оценки функционирования системы управления государственным бюджетом. Кроме этого, указанная модель ПрО включает ПрО описания сложной ИС и ПрО описания деятельности по сравнительной оценке сложной информационной системы. Таким образом, в данной работе предложены описания трех основных уровней сопровождения разработки и внедрения интеллектуальной эксперто-ориентированной СППР – концептуальный, информационный и программный.

В основе **концептуального сопровождения** разработки лежит сформированная на основе методологии DEA *концептуальная модель сравнительной оценки*, которая используется как базовая модель для формирования *онтологии поддержки принятия решений* и для создания *репозитария принимаемых решений*.

В основе **информационного сопровождения** разработки находится структура *информационного обеспечения*, включающая как данные с различных форм отчетности, так и машиночитаемые данные, содержащие информацию о результатах функционирования ИС.

На основе **концептуальных требований** к эксперто-ориентированной СППР в данном исследовании предложены основные характеристики используемой программной архитектуры, позволяющие создавать специальные инструментальные средства и использовать их для сравнительной оценки эффективности функционирования КИСГУ.

Системы поддержки принятия решений на основе методологии DEA. Используемая в концептуальной модели оценки КИСГУ методология сравнительной оценки эффективности DEA основана на построении так называемой границы эффективности в многомерном пространстве входных и выходных переменных, описывающих объекты, эффективность которых требуется определить. В основе DEA лежит метод линейного программирования, формализованное описание сравнительной оценки при использовании CCR-модели представлено в работе [17].

Оценка информационных систем с использованием методологии DEA проводилась различными исследователями [18, 19, 20], однако рассмотренные подходы в указанных публикациях не могут быть использованы для оценки систем класса КМС ввиду значительных различий, как в характеристиках систем, так и в экономико-математических моделях, определяющих механизмы получения и интерпретации результатов их сравнительной оценки.

К некоммерческим (бесплатными) зарубежным программным DEA-продуктам, используемых для сравнительной эффективности различных объектов, относятся:

- DEA Excel Solver – www.deafrontier.net/deasoftware.html;
- DEA Solver Online - www.dea.fernuni-hagen.de;
- DEAP - www.uq.edu.au/economics/cepa/deap.php;
- EMS: Efficiency Measurement System - www.holger-scheel.de/ems;
- Open Source DEA – www.opensourcdea.org;
- OpenDEA – www.sourceforge.net/projects/opendea.

В то же время за рубежом разработано и коммерческое программное обеспечение, где цена за лицензию находится в пределах 1000 долларов США [22, 23], к такому ПО относятся:

- DEA-SolverPro от SAITECH - www.deafrontier.net;
- Frontier Analyst от Banxia Software www.saitechinc.com/products/prod-dsp.asp;
- PIM DEA Soft www.deazone.com/en/software.

К одной из наиболее известных российских разработок следует отнести интерактивный программный комплекс «EffiVision» («ЭффиВижн» - www.dea-21.ru), который исполь-

зовался для анализа деятельности регионов РФ по заказу Счетной Палаты РФ, банков страны и других сложных объектов [23].

Детальный анализ разработанных в различных странах DEA-СППР проводился как зарубежными исследователями [21, 24, 25], так и отечественными [26], в результате авторами были сделаны следующие заключения:

- программы, как правило, предназначены для работы в среде операционной системы MS Windows, среди рассматриваемого ПО есть и web-приложения, а также поддерживающие PC DOS, Unix и Microsoft Excel;
- некоторые программы реализуют много моделей метода DEA (классические CCR/CRS и BCC/VRS [27, 28], но есть и такие, которые предлагают лишь несколько моделей;
- пользовательские интерфейсы могут варьироваться от сложных графических интерфейсов (GUI) к простым элементам управления командной строки;
- в качестве языков программирования используются Visual Basic, Java, Fortran, JavaScript и др.
- в существующих программных продуктах используются системы управления базами данных – Oracle, PostgreSQL, MySQL, данные могут храниться также и в таблицах Excel, в базе данных формата Microsoft Access (mdb) и в текстовых файлах.

В результате комплексного анализа существующих DEA-инструментов было установлено, что большинство разработанных систем предназначены для ограниченной области исследований и узкого академического использования, что не позволяет использовать их для проведения оценки по предложенной концептуальной модели сравнительной оценки ИСУГБ. Другая часть систем использует устаревшие платформы и интерфейсы, которые имеют ограниченные возможности СУБД и не в состоянии оперативно обрабатывать объем данных о параметрах функционирования ИСУГБ.

Таким образом, возникла необходимость в создании отдельного программного обеспечения, поддерживающие концептуальные требования к экспертно-ориентированной СППР, обозначенные в работе [16].

Программная архитектура экспертно-ориентированной СППР. Разработка новой СППР была направлена на создание современного web-приложения, доступ к которому мог получить любой эксперт в любой точке мира.

При реализации системы были использованы следующие современные технологии:

- кроссплатформенное ПО, поддерживающее различные операционные системы Apache-HTTP-сервер;
- основной серверный язык программирования - скриптовый язык общего назначения, применяемый для разработки web-приложений PHP;
- Framework Yii2 (далее - Yii2) – высокопроизводительный компонентный PHP фреймворк, предназначенный для быстрой разработки современных web-приложений с реализацией паттерна MVC (model-view-controller);
- реляционная СУБД для хранения данных – MySQL.
- Ключевые библиотеки, используемые в приложении (загрузчики классов Composer):
- yii2soft/yii2-gii (расширение) – веб-генератор кода Gii. Используется в приложениях на Yii2. для быстрого создания моделей, форм, модулей, CRUD по заданной схеме базы данных;
- yii2soft/yii2-debug (расширение) – отладчик для приложений Yii2 и набор автономных страниц для отображения более подробной информации об отладке;

- yiiisoft/yii2-bootstrap – расширение включает поддержку структуры разметки и компонентов Bootstrap 3 (также известной как «Twitter Bootstrap»). Bootstrap – отличная гибкая среда, которая может значительно ускорить процесс разработки на стороне клиента;
- phpnt/yii2-chartjs – обертка для ChartJs и Yii2 – популярный инструмент, предназначенный для создания графиков и диаграмм, который представляет возможность использовать библиотеку построения графиков в парадигме объектно-ориентированного программирования Yii2;
- kartik-v/yii2-widget-select2 – виджет Select2 и расширенная оболочка Yii2 для плагина Select2 jQuery, поддерживающие поиск, наборы данных из БД и прокрутку результатов. Виджет специально разработан для Bootstrap 3 и предлагает несколько улучшений, недоступных в исходном плагине Yii2. Виджет допускает постепенную деградацию до обычного выбора HTML или ввода текста, если браузер не поддерживает JQuery;
- kartik-v/yii2-mpdf – расширение yii2-mpdf (компонент-оболочка Yii2) для библиотеки mPDF, которая представляет возможность создавать файлы PDF из HTML в кодировке UTF-8. Эта библиотека основана на FPDF и HTML2FPDF, ключевыми функциями библиотеки являются возможность генерировать PDF-файлы «на лету» из HTML-содержимого, обрабатывая разные языки.

Для поддержания актуальной информации об организациях в ИС предусмотрен импорт данных из внешнего источника (портал данных об учреждениях – www.bus.gov.ru). Импорт запускается администратором системы, общее время загрузки данных составляет порядка двух часов. За это время компонент обрабатывает данные о 200 тысячах организаций, которые представлены в XML формате. Данные валидируются и далее заносятся в базу данных.

Для группировки организаций и оценки их деятельности пользователи взаимодействуют с «Мастером оценки», реализация которого была осуществлена на основе концептуальной модели оценки: (1) «Структуризация по однотипным учреждениям» и (2) «Структуризация по подведомственным учреждениям». В первой пользователю предлагается выбрать организацию, по характеристикам которой будет сформирован перечень учреждений для проведения оценки. Во второй модели этот список формируется по выбранной организации-учредителю и виду деятельности учреждения. Следующим шагом Мастера является ввод значений ресурса и результата, по которым в дальнейшем строится график и определяется неэффективность для каждой организации. Полученные данные сохраняются, их также можно редактировать в дальнейшем при изменениях в работе организаций. Пользователю доступен экспорт данных в PDF.

Результаты оценки ИСУГБ. В качестве апробации экспорто – ориентированной СППР были использованы такие подсистемы информационной системы управления государственным бюджетом, как (1) система управления районным финансовым органом и (2) система управления бухгалтерским (бюджетным) учетом государственных учреждений регионального уровня управления.

Для первой подсистемы использовались данные о финансовых органах Краснодарского края. В качестве параметров «входа» использовались трудовые ресурсы, а параметров «выхода» – численность населения муниципального района.

Для второй подсистемы использовались данные о бухгалтериях районных больниц и лесхозов Иркутской области. В качестве параметров «входа» использовались трудовые ресурсы, а параметров «выхода» – численность учреждения.

Результаты оценки функционирования подсистемы бухгалтерского учета информационной системы управления государственным бюджетом показаны на рис. 1 и рис. 2. Результаты оценки функционирования информационной системы управления государственным бюджетом в районных финансовых органах (ФО МО) отображены на рис. 3.

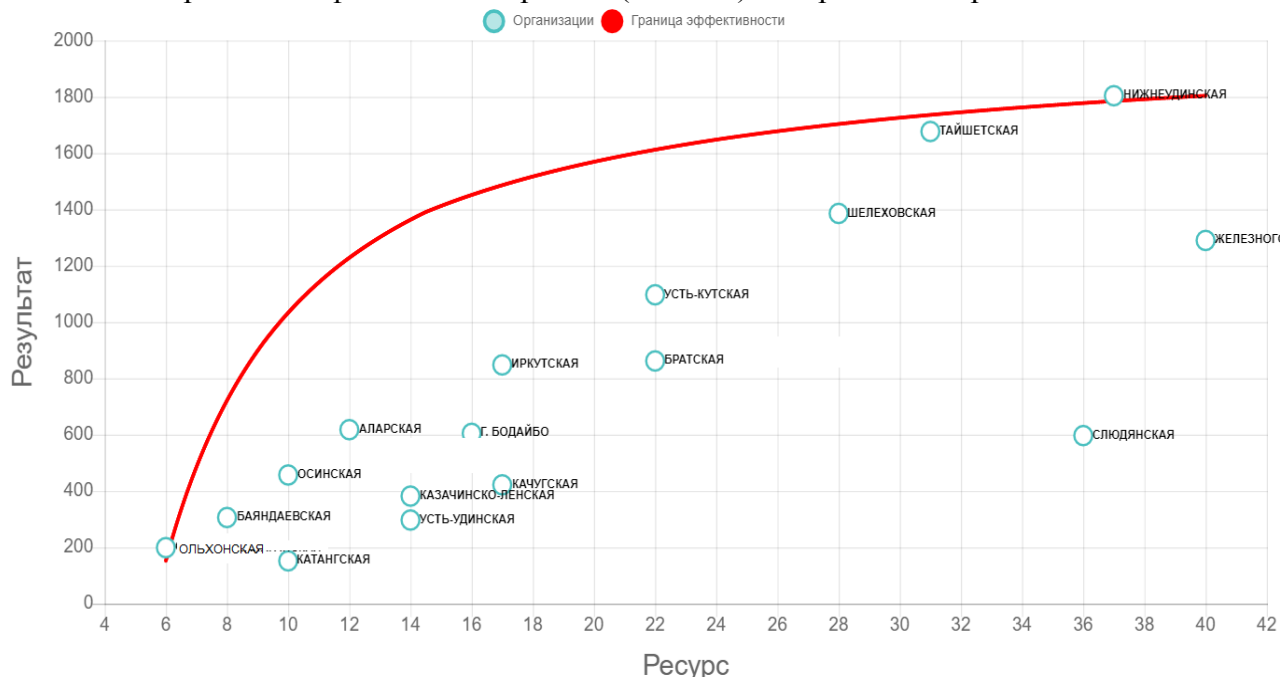


Рис. 1. Результаты оценки ИС бухгалтерского учета районных больниц, подведомственных Министерству здравоохранения Иркутской области

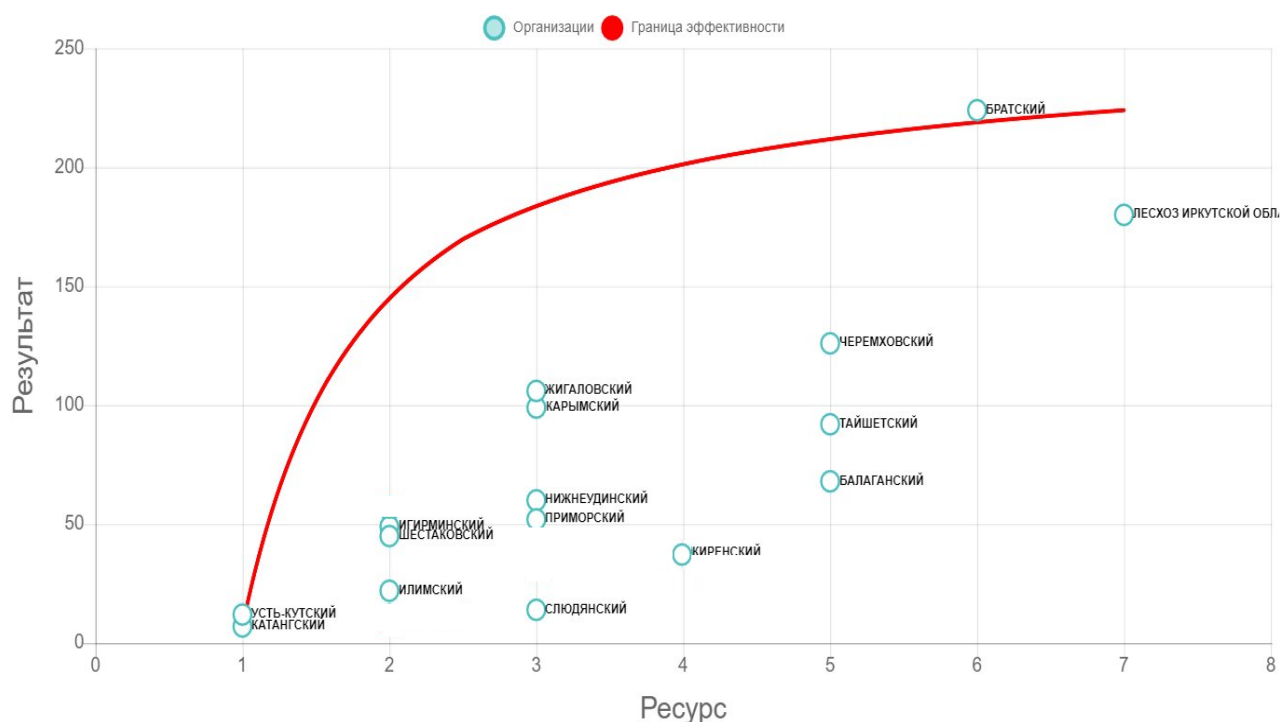


Рис. 2. Результаты оценки ИС бухгалтерского учета лесхозов, подведомственных Министерству лесного комплекса Иркутской области

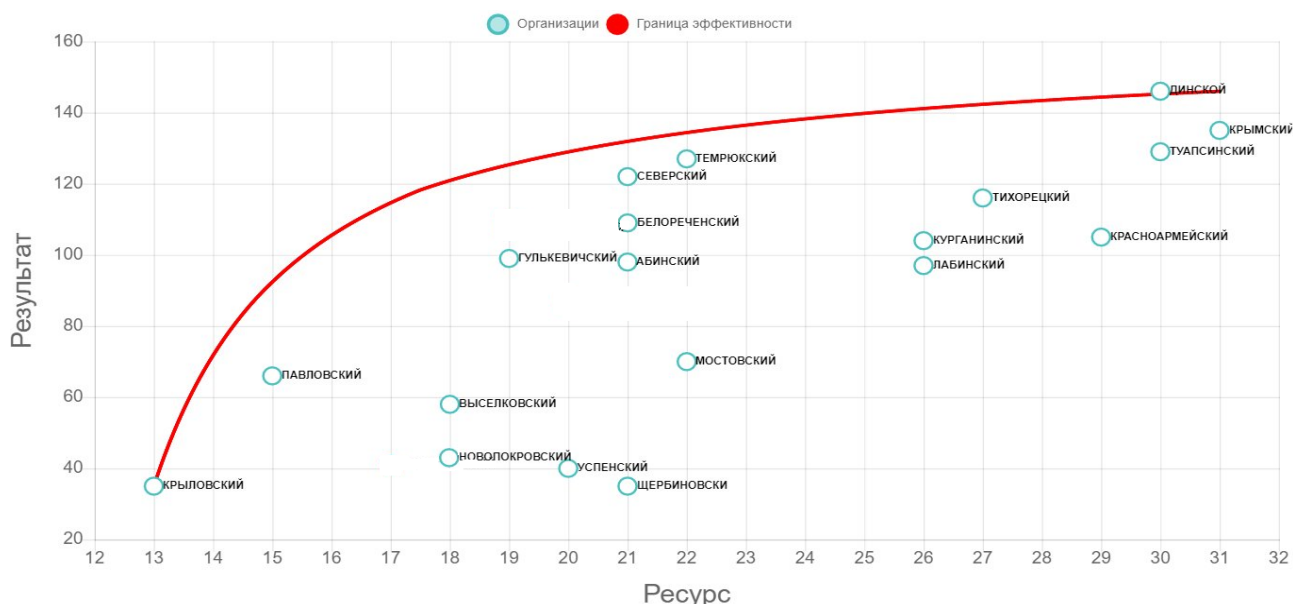


Рис. 3. Результаты оценки ИС ФО МО Краснодарского края

Заключение. В исследовании предложена программная реализация DEA-модели оценки, базирующаяся на принципах структурно-функциональной и территориальной стратификации информации о механизмах управления ресурсами и результатами крупномасштабной информационной системы – ИСУГБ.

Разработанная на основе современной архитектуры web-приложений эксперто-ориентированная СППР позволяет повысить качество экспертной оценки за счет быстродействия в обработке значительного (по мерке человеческих возможностей) объема данных; более эффективно использовать знания специалистов и более надежно фиксировать их в базе знаний системы; более обоснованно принимать решения, связанные с оптимальным функционированием и оптимизацией системы; более наглядно представлять полученные в результате компьютерного анализа результаты.

Представленные визуальные результаты использования СППР позволяют ЛПР не только оценивать неэффективность функционирования подсистем ИСУГБ, но и, одновременно, достаточно точно определять наилучшие показатели организации финансовой деятельности и использовать их в качестве заданных параметров для выбора форм функционирования ИСУГБ. Таким образом, удобный ввод и визуализация информации в виде полученных графиков позволяют наладить информационное взаимодействие между заказчиками, экспертами, проектировщиками и разработчиками ИС без использования специальных знаний в области оценки сложных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. S. Group, «HAZE» (2015) The Standish Group International Inc.
2. Winter Robert, Rohner Peter & Kiselev Caroline (2019) Mission Impossible? Exploring the Limits of Managing Large IT Projects and Ways to Cross the Line // Proceedings of the 52th Hawaii International Conference on System Sciences.
3. Ерженин Р. В. Оценка результатов реализации проекта по созданию ГИИС «Электронный бюджет». Инновации и инвестиции. 2019. № 6. С. 107-113.
4. Бертяков А. В. ИТ-бюджеты федеральных органов власти: знание явное и скрытое. М.: Счетная палата Российской Федерации. ФКУ «ЦЭАИТ СП». 2020.

5. Реут Д. В. Управление крупномасштабными системами. Теоретико-методологические проблемы. Дис. д-ра экон. наук. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Москва. 2013.
6. Šiljak D.D. Large Scale Dynamical Systems: Stability and Structure. North Holland. Amsterdam. 1978.
7. Tomovic R. Control of large systems. Simulation of Control Systems, ed. by I. Troch North Holland. Amsterdam. 1972. Pp. 3–6.
8. Соснин П. И. Архитектурное моделирование автоматизированных систем: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ. 2008.
9. Brooks Frederick P., Jr. (2000) The mythical man-month: essays on software engineering. Anniversary Edition. СПб.: «Символ-Плюс».
10. Чистов Д. В., Мельников П. П., Золотарюк А. В., Ничепорук Н. Б. Проектирование информационных систем: учебник и практикум для среднего профессионального образования. Москва: Издательство Юрайт. 2016.
11. Швецов А. Н. Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Дис. д-ра техн. наук. Санкт-Петербург. 2004.
12. Зиндер Е.З. Введение в экспертное оценивание информационных систем и СУБД. 1998. №04-05.
13. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования: учеб. пособие. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012.
14. Судов Е.В., Левин А.И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России// НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». Москва. 2002.
15. Ross Douglas T. (1961) Computer-aided design. Communications of the ACM. 4 (5): 235.
16. Ерженин Р.В., Массель Л.В. Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления // Онтология проектирования. 2020. Т. 10. №4(38). С. 463-476.
17. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis: a comprehensive text with models, applications, references, and DEA-solver software. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000.
18. Полуэктова Н.Р. Подход к управлению сервисами информационной системы предприятия на основе анализа оболочек данных // Проблемы экономики. Харьков. 2014. № 3. С. 273-278.
19. Рыбакова И.А., Орлов С.П. Комплексная оценка эффективности использования организациями CRM-систем // Наука и Мир. 2017. Т. 1. № 1 (41). С. 51-53.
20. Кривоножко В.Е., Рожнов А.В., Лычев А.В. Построение гибридных интеллектуальных информационных сред и компонентов экспертных систем на основе обобщённой модели анализа среды функционирования // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2013. № 6. С. 003-012.
21. Barr R.S. DEA software tools and technology. in: Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J. (eds) Handbook on Data Envelopment Analysis. International series in operations research & management science. 2004. Vol 71. Springer. Boston. MA.
22. Гончарук А.Г., Алкубелат А.З.С. Автоматизация процесса управления эффективностью бизнеса. Науковий вісник міжнародного гуманітарного університету. 2014. № 6. С. 15-20.

23. Кривоножко В.Е., Сафин М.М., Уткин О.Б., Лычев А.В. Программный комплекс «EffiVision» для анализа деятельности сложных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2005. №3. С. 85-95.
 24. Nyhan R. Software Review: Frontier Analyst. ORMS Today 25. 1998. № 2.
 25. Herrero I., Pascoe S. Estimation of technical efficiency: a review of some of the stochastic frontier and DEA-software, computers in higher education economics review 15. 2002. № 1.
 26. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Обзор программного обеспечения, реализующего метод Data Envelopment Analysis // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 359-360.
 27. Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. European Journal of Operational Research. 1978. Vol. 2. Pp. 429–444.
 28. Charnes A., Cooper W. W., Seiford L. M. A multiplicative model for efficiency analysis. Socio-Economic Planning Sciences. 1982. № 16(5). Pp. 223–224.
-

UDK 004.891.2

DEVELOPMENT OF AN EXPERT-ORIENTED SYSTEM OF SUPPORT FOR DESIGNING LARGE-SCALE INFORMATION SYSTEM

Roman V. Erzhenin

PhD in economics, email: rerzhenin@gmail.com

General Director of "NAUCHNO-PRACTICHESKI CENTER GOSUCHET" LTD
143441, Moscow region, Krasnogorsk district, 69 km of MKAD, p/o Putilkovo,
office and public complex of ZAO Greenwood, str. 19

Annotation. The article deals with the actual problem of improving the design quality of large-scale information systems of public administration (KISGU). According to the author, the choice of acceptable parameters for the functioning of KISGU at the stages of its macro-design is constrained not so much by the lack of effective modeling methods as by the lack of convenient tools that allow one to acquire, accumulate and use heterogeneous knowledge for decision-making when building adequate models of a complex information system (IS). As a methodological basis for intellectual support for modeling and assessing the effectiveness of IS, it is proposed to use a complex DEA-model of assessment, built on the principles of structural, functional and territorial stratification of information on the functioning of a complex KISGU. A review of existing approaches to assessing complex IS and an analysis of various tools implemented on the principles of DEA-models made it possible to conclude that it is impossible to use them for assessing systems of the KISGU class. To support the examination procedure, the author proposes to develop a new web application using the Yii2 Framework. For this, the article describes the software architecture of an expert-oriented decision support system (DSS) and presents the results of its testing. As information support, we used open machine-readable data containing information on the characteristics of the functioning of the state budget management information system (ISUGB). The obtained results of the ISUGB assessment confirm the author's hypothesis about the possibility of enhancing the intelligence of an expert at the design stages through the use of special tools. The proposed approach can be used in the design of the system to select the parameters of the functioning of the ISUGB, in the audit of the effectiveness of the activities of institutions and as a practical guide for the training and retraining of IT specialists of specialized specialties.

Key words: electronic budget; performance audit; macro design; modeling; DEA; decision support systems

REFERENCES

1. T. S. Group «HAZE» (2015) The Standish Group International Inc.
2. Winter Robert, Rohner Peter & Kiselev Caroline (2019) Mission Impossible? Exploring the Limits of Managing Large IT Projects and Ways to Cross the Line. Proceedings of the 52th Hawaii International Conference on System Sciences. 2015.
3. Erzhenin R.V. (2019). Ocenka rezul'tatov realizacii proekta po sozdaniyu GIIS «Elektronnyy byudzhety» [Evaluation of the results of the implementation of the project for the creation of GIIS "Electronic budget"]. Innovation and investment. № 6. Pp. 107-113 (in Russian).
4. Bertyakov A. V. IT-byudzhety federal'nyh organov vlasti: znanie yavnoe i skrytoe [IT budgets of federal authorities: explicit and hidden knowledge. Moscow: Accounts Chamber of the Russian Federation]. FKU "CEAIT SP". 2020. (in Russian).
5. Reut D.V. Upravlenie krupnomasshtabnymi sistemami. Teoretiko-metodologicheskie problemy. Dis. d-ra ekon. nauk. [Management of large-scale systems. Theoretical and methodological problems]. Moscow: Moscow State Technical University N.E. Bauman. 2013. (in Russian).
6. Šiljak D.D. Large Scale Dynamical Systems: Stability and Structure. North Holland. Amsterdam. 1978.
7. Tomovic R. Control of large systems. Simulation of Control Systems. North Holland. Amsterdam. 1972. Pp. 3–6.
8. Sosnin P.I. Arhitekturnoe modelirovanie avtomatizirovannyh sistem: uchebnoe posobie [Architectural modeling of automated systems: a tutorial]. Ulyanovsk: UlSTU .2008. (in Russian).
9. Brooks Frederick P., Jr. The mythical man-month: essays on software engineering. Anniversary Edition. St. Petersburg: "Symbol-Plus". 2000.
10. Chistov D. V., Melnikov P. P., Zolotaryuk A. V., Nicheporuk N. B. Proektirovanie informacionnyh sistem: uchebnik i praktikum dlya srednego professional'nogo obrazovaniya [Designing information systems: textbook and workshop for secondary vocational education]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt = Yurayt Publishing House. 2016 (in Russian).
11. Shvetsov A.N. Modeli i metody postroeniya korporativnyh intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij. Dis. d-ra tekhn. Nauk [Models and methods of building corporate intelligent decision support systems]. St. Petersburg. 2004. (in Russian).
12. Zinder E.Z. Vvedenie v ekspertnoe ocenivanie informacionnyh sistem i SUBD [Introduction to expert assessment of information systems and DBMS]. 1998. DBMS. № 04-05 (in Russian).
13. Evgenev G.B. Intellektual'nye sistemy proektirovaniya: ucheb. posobie. 2-e izd., dop [Intelligent design systems: textbook. manual] Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. 2012. (in Russian).
14. Sudov E.V., Levin A.I. Konceptiya razvitiya CALS-tekhnologij v promyshlennosti Rossii [Concept for the development of CALS technologies in the Russian industry]. Scientific Research Center of CALS-Technologies "Applied Logistics". Moscow. 2002. (in Russian).
15. Ross Douglas T. Computer-aided design. Communications of the ACM. 1961. № 4 (5). Pp. 235.

16. Erzhenin R.V., Massel L.V. Ontologicheskij podhod k predstavleniyu znanij o metodologii modelirovaniya slozhnoj sistemy upravleniya [Ontological approach to the representation of knowledge about the methodology of modeling a complex control system] // *Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of design*. 2020. Vol 10. № 4 (38). Pp. 463-476 (in Russian).
17. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. *Data Envelopment Analysis: A comprehensive text with models, applications, references, and DEA-solver software*. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000.
18. Poluektova N.R. Podhod k upravleniyu servisami informacionnoj sistemy predpriyatiya na osnove analiza obolochek dannyh [An approach to managing the services of an enterprise information system based on the analysis of data envelopes]. *Problems of Economics = Economic problems*. Kharkov. 2014. № 3. Pp. 273-278 (in Russian).
19. Rybakova I.A., Orlov S.P. Kompleksnaya ocenka effektivnosti ispol'zovaniya organizatsiyami CRM-sistem [Comprehensive assessment of the effectiveness of organizations using CRM systems] // *Nauka i Mir = Science and Peace*. 2017. Vol 1. № 1 (41). Pp. 51-53 (in Russian).
20. Krivonozhko V.E., Rozhnov A.V., Lychev A.V. Postroenie gibridnyh intellektual'nyh informacionnyh sred i komponentov ekspertnyh sistem na osnove obobshchyonnoj modeli analiza sredy funkcionirovaniya [Construction of hybrid intelligent information environments and components of expert systems based on a generalized model for analyzing the functioning environment] // *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye = Neurocomputers: development, application*. 2013. № 6. Pp. 003-012 (in Russian).
21. Barr R.S. DEA software tools and technology. Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J. (eds) *Handbook on Data Envelopment Analysis*. International Series in Operations Research & Management Science. 2004. Vol 71. Springer. Boston. MA.
22. Goncharuk A.G., Alkubelat A.Z.S. Avtomatizatsiya processa upravleniya effektivnost'yu biznesa [Automation of the business performance management process. Science newsletter of the international humanitarian university]. 2014. № 6. Pp. 15-20 (in Russian).
23. Krivonozhko V.E., Safin M.M., Utkin O.B., Lychev A.V. Programmnyj kompleks «EffiVision» dlya analiza deyatel'nosti slozhnyh sistem [EffiVision software package for analyzing complex systems] // *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy = Information technology and computing systems*. 2005. № 3. Pp. 85-95 (in Russian).
24. Nyhan R. Software Review: Frontier Analyst. *ORMS Today* 25. 1998. № 2.
25. Herrero I., Pascoe S. Estimation of technical efficiency: a review of some of the stochastic frontier and DEA-software, *computers in higher education economics review* 15. 2002. № 1.
26. Morgunov E. P., Morgunova O. N. (2018) Obzor programmnoho obespecheniya, realizuyushchego metod Data Envelopment Analysis [Overview of software that implements the Data Envelopment Analysis method] // *Reshetnevskiy chteniya = Reshetnev readings*. 2018. Vol. 2. Pp. 359-360 (in Russian).
27. Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2. Pp. 429–444.
28. Charnes A., Cooper W. W., Seiford L. M. A multiplicative model for efficiency analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*. 1982. № 16(5). Pp. 223–224.

УДК 004.89

СРЕДСТВА ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ КОДА НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИЙ

Дородных Никита Олегович

к.т.н., с.н.с., e-mail: tualatin32@mail.ru,

Юрин Александр Юрьевич

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

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

Коршунов Сергей Андреевич, Сопп Дмитрий Юрьевич,

Шпаченко Дмитрий Сергеевич

e-mail: info@centrasib.ru

ООО ЦентраСиб,

664003, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 277/5, 26

Аннотация. Логические и ассоциативные правила по-прежнему являются наиболее распространенным способом представления экспертных знаний и поддержки принятия решений, несмотря на популярность семантических технологий. Эффективное использование правил при принятии решений в случае неточной или неопределенной информации требует разработки специализированных лингвистических (языковых) и программных средств, как для их наглядного отображения, так и генерации программных кодов. В данной работе рассматривается FuzzyRVML, как расширение одного из языков визуального моделирования правил – Rule Visual Modeling Language, предназначенное для моделирования логических правил, содержащих элементы нечеткости. FuzzyRVML поддерживает нечеткий тип данных, понятия лингвистической переменной, терма и коэффициента уверенности. Представлены описания основных элементов и конструкций FuzzyRVML, а также иллюстративный пример, содержащий генерацию кода на FuzzyCLIPS. Программным средством поддержки предлагаемой нотации является Personal Knowledge Base Designer, на основе которого произведены ее оценка и реализация.

Ключевые слова: нечеткость, нечеткая база знаний, нечеткие правила, логические правила, генерация кода, RVML, FuzzyCLIPS.

Цитирование: Дородных Н.О., Юрин А. Ю., Коршунов С.А., Сопп Д.Ю., Шпаченко Д.С. Средства визуального моделирования и генерации кода нечетких продукций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 121-131. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.010

Введение. В области искусственного интеллекта накоплен большой опыт и широкий спектр различных методов и инструментов решения задач представления и обработки знаний. Несмотря на популярность семантических технологий и, в частности, онтологий при решении данных задач, логические и ассоциативные правила остаются наиболее распространенным и популярным способом описания бизнес-логики и принятия решений [1]. Привлекательность данной модели представления знаний обусловлена ее простотой и понятностью для экспертов, высокой модульностью, простотой внесения изменений и прозрачностью вывода. Многие языки программирования и стандарты реализуют этот формализм, например, CLIPS (C Language Integrated Production System), JESS (Java Expert System Shell), SWRL (Semantic Web Rule Language), Drools, RIF (Rule Interchange Format) и др. При этом использование средств поддержки визуального программирования могло бы значительно повысить эффективность их применения.

Одним из элементов визуального программирования является использование специализированных графических обозначений и нотаций, которые в контексте инженерии знаний обеспечивают моделирование логических и причинно-следственных связей. Примером по-

добных нотаций является VIPR (VIsual Imperative Programming) [2]. Несмотря на использование аппарата графов, специализированные конструкции VIPR достаточно тяжело воспринимаются экспертами и системными аналитиками (рис. 1,1), при этом упрощенный их вариант [3] обеднен визуальной семантикой. В данном аспекте более перспективны расширения или профили популярных языков моделирования, примерами таких расширений являются URML (UML-Based Rule Modeling Language) [4] и RVML (Rule Visual Modeling Language) [5], основанные на UML (Рис.1).

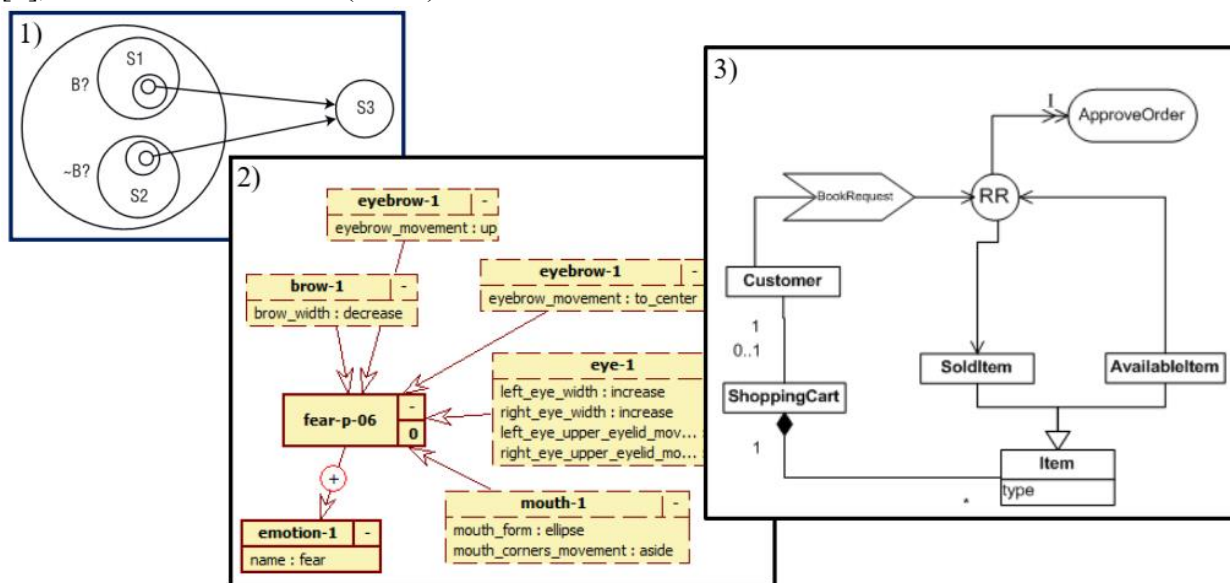


Рис. 1. Примеры нотаций для моделирования логических правил:

1) VIPR; 2) RVML; 3) URML.

Необходимо отметить, что рассмотренные нотации и их расширения не учитывают факторы нечеткости и неопределенности, характеризующие большинство реальных практических задач.

В данной работе мы предлагаем лингвистическое и программное средства визуального моделирования и генерации кода нечетких продукций. Лингвистическое (языковое) средство представлено расширением одного из визуальных языков моделирования логических правил – Rule Visual Modeling Language (RVML) [5]. Предложенное расширение (далее, FuzzyRVML) может быть применено для моделирования логических правил с элементами нечеткости, а также генерации кодов на языке представления нечетких знаний – FuzzyCLIPS. Программное средство представлено модулями (плагинами) для системы прототипирования продукционных баз знаний – Personal Knowledge Base Designer (PKBD) [6]. Предлагаемые модули обеспечивают отображение элементов FuzzyRVML и их трансформацию в FuzzyCLIPS.

1. Состояние вопроса.

1.1. Моделирование продукций. Логические и ассоциативные правила остаются основным методом формализации и кодификации бизнес-логики и знаний. На основе классификации [7] и ее последующей модификации [5] можно выделить следующие основные группы подходов, направленных на автоматизацию создания продукций:

- Текстовый подход, обеспечивающий прямое манипулирование языковыми конструкциями. Подход ориентирован на программистов и реализован в виде специализированных редакторов.
- Табличный подход основан на создании таблиц решений и их переводе в программные коды. Используются как стандартный формализм таблиц решений, так и его специализации, такие как, XTT2 (eXtended Tabular Trees).

- Графический подход, обеспечивающий создание визуальных элементов, соответствующих компонентам логических правил, с последующим их переводом в программные коды. Этот подход является наиболее перспективным, поскольку минимизирует ошибки ручного кодирования, а также позволяет более полно привлечь к процессу разработки непрограммируемых пользователей, обладающих знаниями нотаций визуального моделирования.

В свою очередь, в рамках графического подхода можно выделить следующие направления:

- Использование предметно- или проблемно-ориентированных нотаций, предназначенных для описания определенной области или задачи, например деревьев событий или отказов, которые используются при анализе отказов и рисков. Для преобразования этих моделей используется специальное программное обеспечение.
- Использование универсальных семантических графовых структур, таких как концепт карты (concept maps), карты знаний (mind maps), диаграммы «сущность-связь» (ER diagrams) и т.д. Однако отсутствие общепринятой трактовки отношений между понятиями при переводе таких моделей в логические правила затрудняет широкое использование данного подхода при создании баз знаний и экспертных систем.
- Использование расширений или специализаций популярных нотаций, которые могут обеспечить моделирование логических и причинно-следственных связей. В этой связи перспективными являются нотации, являющиеся расширениями или профилями хорошо известных языков, таких как UML (Unified Modeling Language). Одним из таких расширений, имеющим прикладное применение и программную поддержку, является RVML [6].

1.2. Визуальное моделирование нечетких правил. Следует отметить, что визуальное моделирование нечеткости и неопределенности довольно слабо представлено специализированными (проблемно- или предметно-ориентированными) лингвистическими и программными средствами. Наиболее распространенный способ – это использование графиков математических функций и специализированных математических пакетов для описания лингвистических переменных и их термов. Тем не менее, элементы и конструкции для отображения нечеткости были введены в некоторые нотации, таким образом, были разработаны нечеткие когнитивные карты [8], нечеткие ER-модели [9], нечеткие UML-модели [10] и др. Однако данные нотации не используются для моделирования логических или ассоциативных правил, поэтому предлагается расширить RVML в части поддержки лингвистических (нечетких) переменных и коэффициентов уверенности.

1.3. Rule Visual Modeling Language. RVML [5] – это визуальный язык, предназначенный для моделирования баз знаний, содержащих логические правила, и генерации программных кодов на языках программирования, реализующих этот формализм. RVML основан на UML и может рассматриваться как его профиль расширения с использованием терминологии диаграмм классов, поэтому в качестве базовых элементов используются понятия «класс» и «ассоциация». Этот язык позволяет представить логические правила в обобщенном виде, абстрагируясь от особенностей конкретных языков программирования. В то же время он содержит средства для определения приоритетов правил и значений слотов «по умолчанию».

Основные особенности RVML:

- Отдельные графические элементы для всех компонентов правил без каких-либо стереотипов или типизированных классов, как в UML (рис. 2).
- Четкая визуальная индикация действий, продуцируемых правилами (добавление, удаление, изменение, остановка).

- Может рассматриваться как профиль расширения UML, использующий терминологию диаграмм классов: понятия «класс» и «ассоциация» являются основой для его элементов.
- Абстрагирование от различных конкретных языков представления знаний: логические правила представляются в обобщенном виде.
- Может использоваться для синтеза программных кодов на CLIPS, Drools и др.

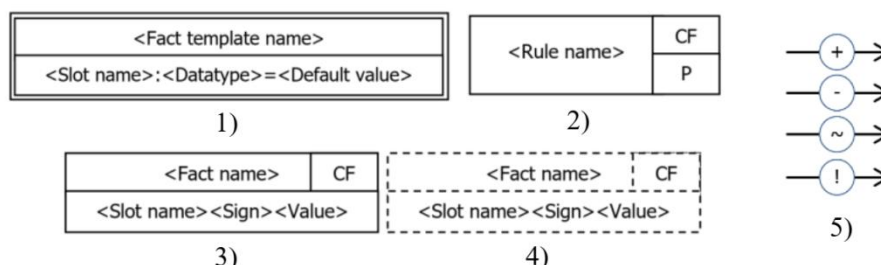


Рис. 2. Основные элементы RVML: 1) шаблон факта; 2) узловой элемент правила; 3) факт; 4) условие; 5) связи элементов с указанием действий.

Поддержка RVML реализована в специализированном программном обеспечении, в частности, в системах Knowledge Base Development System (KBDS) [11] и PKBD [6].

2. Предлагаемые средства поддержки использования нечетких продукций.

2.1. Лингвистическое средство. В качестве лингвистического средства для моделирования нечетких продукций предлагается расширение языка RVML. Основной особенностью нового расширения, называемого FuzzyRVML, является использование лингвистических (нечетких) переменных и коэффициентов уверенности для учета нечеткости и неопределенности в рассуждениях. В этом случае значение лингвистической переменной определяется с помощью так называемых нечетких множеств [12]. Нечеткое множество определяется через некоторую базовую шкалу (набор базовых значений) и функцию принадлежности $\mu(x)$. Функция принадлежности – это кривая, которая определяет, как каждая точка в диапазоне соотносится со значением принадлежности (или степенью принадлежности) в интервале $[0, 1]$. Таким образом, функция принадлежности определяет субъективную степень уверенности эксперта в том, что конкретное значение базовой шкалы соответствует определенному нечеткому множеству. Существует два способа задания функции принадлежности: табличный и аналитический. Определены следующие типы описания функции принадлежности для аналитического метода: треугольная; трапецевидная; S-образная; Z-образная; U-образная и др.

Визуально, это расширение реализуется путем добавления в RVML нового типа данных: «Fuzzy», а также отдельных графических элементов для функций принадлежности и термов (рис. 3). Нечеткие элементы отображаются точечными линиями, как полуопределенные элементы.

Основные особенности FuzzyRVML:

- Основан на RVML и является его расширением.
- Содержит новые элементы:
 - новый тип данных (Fuzzy);
 - лингвистическая (нечеткая) переменная (FuzzyVar) и набор нечетких термов как возможные значения лингвистической переменной;
 - коэффициент уверенности (Certainty Factor).
- Может быть использован для генерации кода на FuzzyCLIPS.

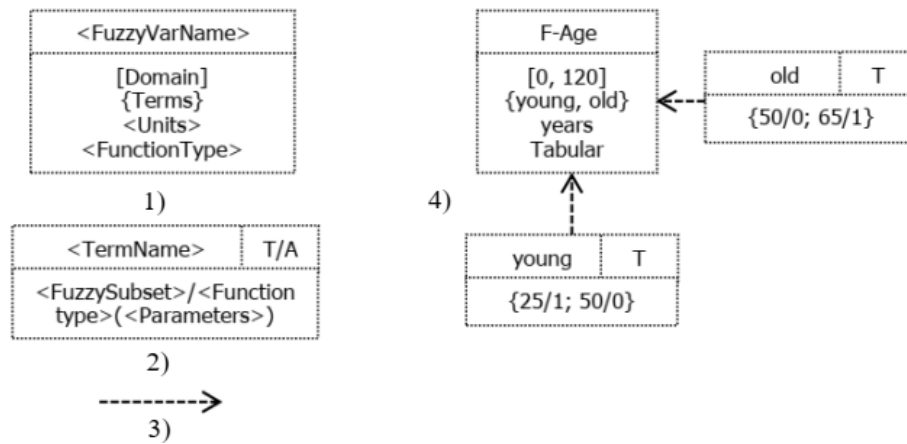


Рис. 3. Основные элементы FuzzyRVML:

- 1) лингвистическая (нечеткая) переменная; 2) терм; 3) связь типа «зависимость»;
4) представление связи между нечеткой переменной и ее термами.

FuzzyRVML интегрируется с RVML и их элементы используются совместно, в частности, на рис. 4 приведены примеры описания шаблона факта с лингвистической (нечеткой) переменной, а также описания факта с нечетким термом.

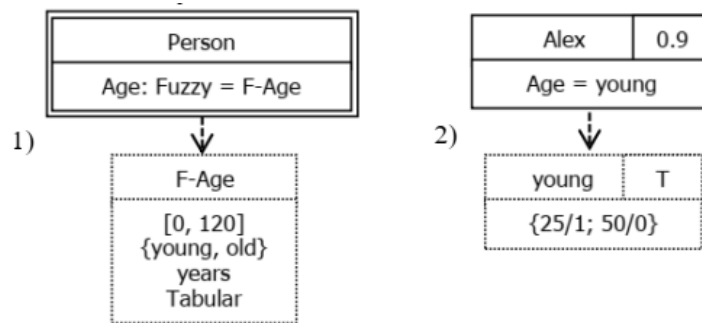


Рис. 4. Примеры интеграции элементов RVML и FuzzyRVML:

- 1) шаблон факта с лингвистической (нечеткой) переменной; 2) факт с термом.

2.2. Программное средство. Поддержка FuzzyRVML реализована в программной системе PKBD [6], которая предназначена для прототипирования экспертных систем и баз знаний, использующих логические правила.

PKBD имеет модульную архитектуру, которая обеспечивает возможность добавления модулей в виде динамических библиотек для генерации программных кодов и интеграции с системами концептуального моделирования и CASE-средствами. В настоящее время в состав PKBD входят модули интеграции по данным с CLIPS, Drools, PHP, IBM Rational Rose, StarUML, XMind, CmapTools и Microsoft Excel.

Для поддержки FuzzyRVML в PKBD были добавлены следующие возможности:

- Описания лингвистических (нечетких) переменных. Для поддержки этой возможности были обновлены некоторые диалоговые окна (мастера) PKBD, в частности: мастера добавления и редактирования фактов, шаблонов фактов и правил.
- Визуализации нечетких элементов. Для поддержки этой возможности была обновлена встроенная подсистема визуализации RVML – Tiny RVML Editor [5].
- Генерации программных кодов на FuzzyCLIPS. Для поддержки этой возможности создана новая динамическая библиотека (fzcs.dll). Основное назначение библиотеки – это однозначное отображение конструкций FuzzyRVML в программные коды. Приме-

ры соответствий между элементами FuzzyRVM и FuzzyCLIPS представлены в табл. 1.

Таблица 1. Примеры соответствий для элементов FuzzyRVM и FuzzyCLIPS

Примеры элементов FuzzyRVM	Соответствующие элементы FuzzyCLIPS
	<pre>(deftemplate F-AGE 0 120 ((YOUNG (25 1) (50 0)) (OLD (50 0) (65 1))))</pre>
	<pre>(deftemplate Person (slot age (default "F-AGE")))</pre>
	<pre>(Alex (age "YOUNG")) CF 0.9</pre>
Коэффициент уверенности в правилах	<pre>(defrule <RuleName> (declare (CF <CertaintyFactorValue>)) ...</pre>

2.3. Пример применения. Рассмотрим пример применения предлагаемых средств при разработке базы знаний для оценки риска наводнения (данное задание использовалась в учебном процессе ИрННТУ) [13].

В результате решения задач идентификации и концептуализации были определены основные понятия предметной области: «Atmospheric condensation», «River», «Risk», «Flood hazard» и «Conclusion». Фрагмент полученной модели предметной области в виде диаграммы классов UML показан на рис. 5. Модель UML была импортирована в PKBD с преобразованием основных понятий и отношений в шаблоны фактов и правил. Далее были определены лингвистические (нечеткие) переменные для описания понятий «Atmospheric condensation» и «River», в частности, свойств «grade» и «water level».

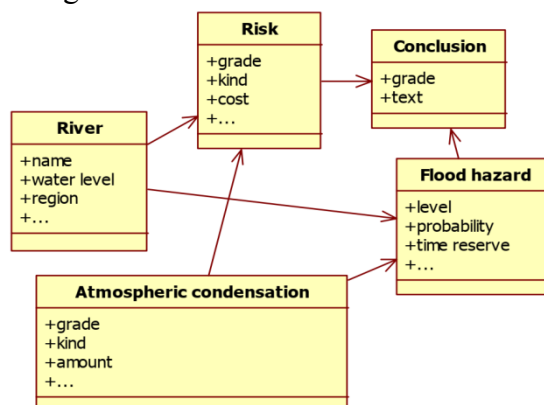


Рис. 5. Фрагмент модели предметной области для задачи оценки опасности наводнений в виде диаграммы классов UML.

Для определения значений свойства «grade» понятия «Atmospheric condensation» использовались данные о среднем количестве осадков в городе Иркутске в течение года [14], в частности: диапазон возможных значений [0, 120] мм; возможные термины: «ag-low», «ag-

average», «ag-high». Значения термов нечеткой переменной задавались в табличном виде (табл. 2).

Таблица 2. Описание нечеткой переменной для свойства «grade»

Терм	Значение в интервале [0, 120], мм	Значение функции принадлежности в интервале [0, 1]
ag-low	0	1
	20	0.5
	40	0
ag-average	0	0
	20	0.5
	40	1
	60	0.5
	80	0
ag-high	20	0
	40	0.5
	60	1

Подобным образом были определены значения свойства «water level» понятия «River» с использованием данных об уровне реки Ангара в районе первого метеопоста в городе Иркутске [15]: диапазон возможных значений [0, 204]см.; возможные термины: «rwl-low», «rwl-average», «rwl-high».

Примеры форм пользовательского интерфейса PKBD с описанием лингвистической (нечеткой) переменной и элементами FuzzyRVM приведены на рис. 6 и рис. 7.

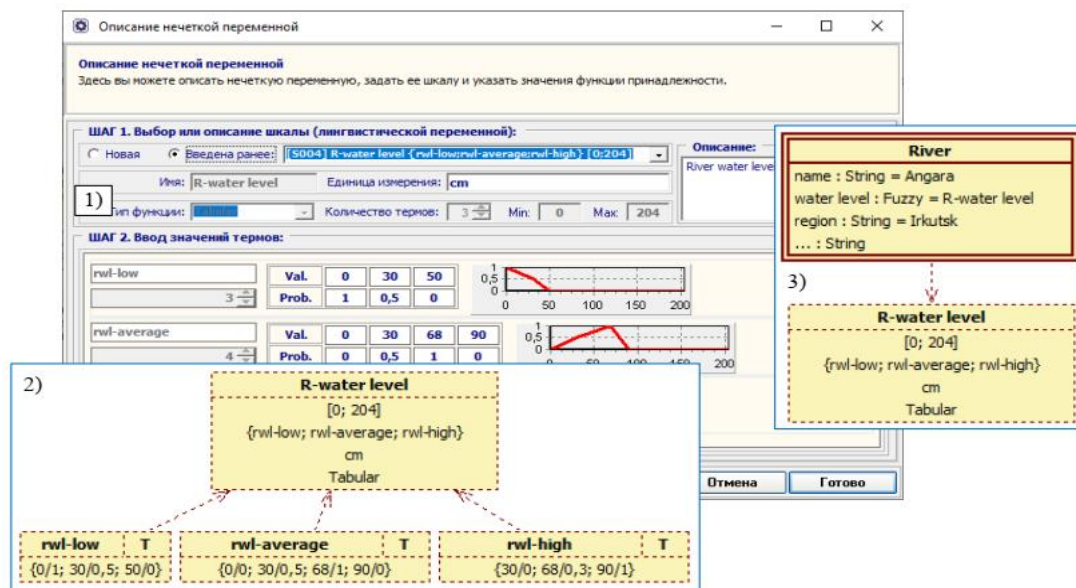


Рис. 6. Примеры форм пользовательского интерфейса PKBD:

- 1) форма описания лингвистической (нечеткой) переменной;
- 2) представление лингвистической (нечеткой) переменной и ее термов в FuzzyRVM;
- 3) интегрированное представление элементов RVM и FuzzyRVM при описании шаблона фактов с лингвистической (нечеткой) переменной.

На рис. 7, 1 приведен пример шаблона правила, который отражает явные связи между шаблонами фактов и может использоваться при создании конкретных правил. Коэффициенты уверенности для шаблонов правил не задаются. В свою очередь, конкретные правила определяют отношения между фактами с конкретными значениями слота, поэтому для них коэффициенты уверенности задаются и зависят от значений определенных фактов. Кроме того, на рис. 7 показаны примеры факта со значением слота в виде термина нечеткой пере-

менной; конкретное правило, содержащее факты с терминами нечетких переменных; и сгенерированный исходный код на FuzzyCLIPS.

Заключение. Логические правила по-прежнему являются наиболее распространенным способом представления экспертных знаний, несмотря на популярность семантических технологий. Эффективное использование этого формализма требует разработки специализированных средств для поддержки визуального и порождающего программирования. Это особенно актуально при решении реальных практических задач, связанных с нечеткой или неопределенной информацией.

В статье было предложено расширение RVML под названием FuzzyRVML, предназначенное для моделирования знаний в форме логических правил с нечеткостью и неопределенностью. FuzzyRVML поддерживает нечеткий тип данных, понятия лингвистической (нечеткой) переменной и коэффициента уверенности. В качестве средства реализации использовано программное обеспечение – PKBD [6].

Предварительная оценка предложенных средств показала их пригодность для описания нечеткости в базах знаний. FuzzyRVML может использоваться для генерации программных кодов на FuzzyCLIPS, обеспечивая быстрое прототипирование баз знаний и экспертных систем с поддержкой нечеткости.

Прямое сравнение с другими программными системами моделирования нечеткости, в частности, Fuzzy Logic Designer (входящим в состав MATLAB) затруднено: с одной стороны, Fuzzy Logic Designer обладает большей функциональностью, чем PKBD с FuzzyRVML и поддерживает множество способов описания лингвистических переменных и визуализации результатов вывода, с другой – он не позволяет экспортировать созданные базы знаний и генерировать программные коды для их интеграции в другие приложения, в то время как FuzzyRVML и PKBD разработаны специально для решения этой задачи.

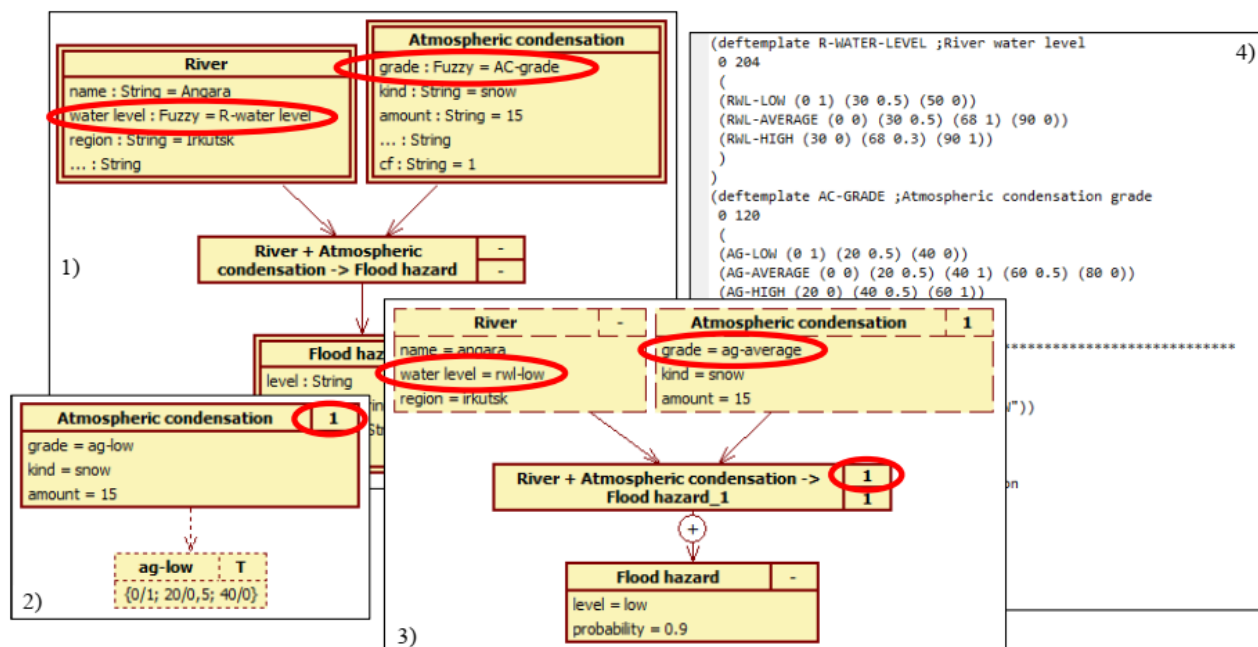


Рис. 7. Примеры RVML-схем с элементами FuzzyRVML:

- 1) шаблон правила с лингвистическими (нечеткими) переменными;
- 2) факт со значением слота в виде термина нечеткой переменной и коэффициента уверенности;
- 3) конкретное правило, содержащее факты с терминами нечеткой переменной и коэффициентом уверенности;
- 4) сгенерированный программный код на FuzzyCLIPS.

В настоящее время в PKBD реализован только табличный способ описания значений термов лингвистических (нечетких) переменных, что связано с ориентацией на генерацию программных кодов для FuzzyCLIPS. В дальнейшем планируется добавить поддержку предлагаемого расширения в KBDS [11] и применить FuzzyRVML при решении задачи диагностики уникальных технических систем [16].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00927) и в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (номер гос регистрации 121030500071-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagner W. P. Trends in expert system development: A longitudinal content analysis of over thirty years of expert system case studies // *Expert Systems with Applications*. 2017. V.76. Pp. 85–96.
2. Кознов Д.В. Основы визуального моделирования. М: БИНОМ. 2012. 246 с.
3. Павлов А.И., Столбов А.Б. Прототип системы поддержки проектирования агентов для имитационных моделей сложных систем // *Программные продукты и системы*. 2016. № 3. С. 79-84.
4. Lukichev S., Giurca A., Wagner G., Gasevic D., Ribaric M. Using UML-based rules for web services modeling // *Proceedings IEEE 23rd International Conference on Data Engineering Workshop*. 2007. Pp .290–297.
5. Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Средства поддержки моделирования логических правил в нотации RVML // *Программные продукты и системы*. 2018. №4. С. 667–672.
6. Берман А.Ф., Грищенко М.А., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Проблемно-ориентированный редактор продукционных баз знаний // *Программные продукты и системы*. 2015. №2. С.13-19.
7. Гаврилова Т.А., Гулякина Н.А. Визуальные методы работы со знаниями: попытка обзора // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2008. № 1. С. 15-21.
8. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. vol.24. Pp. 65–75.
9. Zhang F., Ma Z.M., Yan L. Representation and reasoning of fuzzy ER model with description logic // *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2008. Pp.1358–1365.
10. Sicilia M.A., Garcia E., Gutierrez J.A. Integrating fuzziness in object oriented modeling language: towards a fuzzy-UML // *Proceedings of International Conference on Fuzzy Sets Theory and its Applications*. 2002. Pp. 66–67.
11. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Web-сервис для автоматизированного формирования продукционных баз знаний на основе концептуальных моделей // *Программные продукты и системы*. 2014. № 4. С. 103-107.
12. Dubois D., Prade H., Yager R. Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems (Amsterdam: Elsevier). 2014. 928 p.
13. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Формирование баз знаний продукционного типа на основе UML-моделей // *Информатика и кибернетика*. 2016. №3(5). С.44-50.
14. Климат Иркутска. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат_Иркутска (дата обращения: 2021-03-13).

15. Allrivers: Уровень воды онлайн. Режим доступа: <https://allrivers.info/gauge/angara-irkutsk> (дата обращения: 2021-03-13).
 16. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 5-15.
-

UDK 004.89

MEANS OF VISUAL MODELING AND CODE GENERATION FOR FUZZY RULES

Nikita O. Dorodnykh

Ph.D., e-mail: tualatin32@mail.ru,

Alexander Yu. Yurin

Ph.D., Head. Laboratory of Information and telecommunication technologies for investigation of technogenic safety, e-mail: iskander@icc.ru

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

134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia,

Sergey A. Korshunov, Dmitriy Yu. Sopp, Dmitriy S. Shpachenko

e-mail: info@centrasib.ru,

CentrSib LLC,

664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 277/5, 26

Annotation. Logical and associative rules are still the most common way to represent expert knowledge and support of decision-making. The use of rules in the case of inaccurate or uncertain information requires the development of specialized linguistic (language) means and software, providing their visualization and generation of source codes. In this paper, we propose a FuzzyRVML - an extension of a Rule Visual Modeling Language, designed for modeling logical rules containing elements of fuzziness. FuzzyRVML supports the fuzzy data type, the concepts of linguistic variable, term, and certainty factor. Descriptions of the main elements and constructs of FuzzyRVML are presented, as well as an illustrative example containing code generation in FuzzyCLIPS. Personal Knowledge Base Designer was used to support the notation proposed, as well for its implementation and evaluation.

Keywords: fuzziness, fuzzy knowledge base, fuzzy rules, logical rules, code generation, rvml, FuzzyCLIPS

REFERENCES

1. Wagner W. P. Trends in expert system development: A longitudinal content analysis of over thirty years of expert system case studies // Expert Systems with Applications. 2017. vol.76. Pp . 85–96.
2. Koznov D.V. Osnovy vizual'nogo modelirovaniya [Foundations of visual modeling]. Moscow: BINOM. 2012. 246 p. (in Russian).
3. Pavlov A.I., Stolbov A.B. Prototip sistemy podderzhki proektirovaniya agentov dlya imitacionnykh modelej slozhnykh sistem [A prototype of an agents design support system for complex system simulation models]. Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems. 2016. № 3. Pp. 79-84. (in Russian).
4. Lukichev S., Giurca A., Wagner G., Gasevic D., Ribaric M. Using UML-based rules for web services modeling // Proceedings IEEE 23rd International Conference on Data Engineering Workshop. 2007. Pp .290–297.

5. Dorodnykh N.O., Korshunov S.A., Yurin A.Yu. Sredstva podderzhki modelirovaniya logicheskikh pravil v notacii RVML [Support tools for modeling logical rules in the RVML notation]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2018. № 4. Pp. 667–672. (in Russian).
6. Berman A.F., Grischenko M.A., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Problemno-orientirovannyj redaktor produkcionnyh baz znaniy [A problem-oriented editor for design of rule-based knowledge bases]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2015. № 2. Pp. 13–19. (in Russian).
7. Gavrilova T.A., Gulyakina N.A. Vizual'nye metody raboty so znaniyami: popytka obzora [Visual Knowledge Processing Techniques: a Brief Review]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial Intelligence and Decision Making*. 2008. № 1. Pp. 15–21. (in Russian).
8. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. vol. 24. Pp.65–75.
9. Zhang F., Ma Z.M., Yan L. Representation and reasoning of fuzzy ER model with description logic // *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2008. Pp.1358–1365.
10. Sicilia M.A., Garcia E., Gutierrez J.A. Integrating fuzziness in object oriented modeling language: towards a fuzzy-UML // *Proceedings of International Conference on Fuzzy Sets Theory and its Applications*. 2002. Pp. 66–67.
11. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Web-servis dlya avtomatizirovannogo formirovaniya produkcionnyh baz znaniy na osnove konceptual'nyh modelej [A web-service for knowledge base generation on the basis of conceptual models]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2014. № 4. Pp. 103-107. (in Russian).
12. Dubois D., Prade H., Yager R. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems* (Amsterdam: Elsevier). 2014. 928 p.
13. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Formirovanie baz znaniy produkcionnogo tipa na osnove UML-modelej [Building the rule knowledge bases on the basis of UML models]. *Informatika i kibernetika = Informatics and Cybernetics*. 2016. № 3(5). Pp. 44-50. (in Russian).
14. Climate of Irkutsk. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат_Иркутска. Accessed 17.03.2021.
15. Allrivers: Water Level Online. Available at: <https://allrivers.info/gauge/angara-irkutsk>, accessed 17.03.2021.
16. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu., Pavlov A.I. Principy informacionnoj tekhnologii resheniya mezhdisciplinarnykh zadach obespecheniya tekhnogennoj bezopasnosti na osnove samoorganizacii [Principles of information technology for solving interdisciplinary problems of technogenic safety provision on the basis of self-organization]// *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2019. № 2 (14). Pp. 5-15. (in Russian).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЯМИ РЕСУРСОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Костромин Роман Олегович

м.н.с., e-mail: kostromin@icc.ru,

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

Аннотация. Статья посвящена проблемам автоматизации конфигурирования ресурсов распределенной вычислительной среды. Среда может использоваться как для запуска научных приложений, так и для задач исследования функционирования цифровых двойников инфраструктурных объектов. Для такой среды характерно динамическое изменение состава ее ресурсов, их характеристик и требований к ним. Ресурсы среды могут включать классические вычислительные машины, серверы, виртуальные машины и микрокомпьютеры. Необходимы универсальные средства автоматизации настройки таких ресурсов. В статье выполнен сравнительный анализ средств управления конфигурациями ресурсов среды (Chef, Ansible, Puppet, SaltStack), которые позволяют автоматизировать процесс настройки узлов. Благодаря такой автоматизации сокращается время их подготовки и повышается надежность вычислений за счет уменьшения отказов программного и аппаратного обеспечения, связанных с человеческим фактором в процессе настройки в ручном режиме. Рассмотренные средства являются основой для дальнейшего развития инструментального комплекса для построения среды, обеспечивающей условия функционирования цифровых двойников природосберегающего оборудования. Исходя из результатов сравнительного анализа и требований, предъявляемых к инструментальным комплексам, выбрана система Ansible для внедрения в цепочку автоматизации процессов непрерывной интеграции прикладного и системного программного обеспечения приложений. Практические эксперименты показали преимущества использования Ansible в сравнении с другими системами аналогичного назначения.

Ключевые слова: инструментальные средства, управление ресурсами, распределенная вычислительная среда, виртуализированные ресурсы, автоматизация управления конфигурациями, цифровой двойник

Цитирование: Костромин Р. О. Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 131-145. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.011

Введение. В настоящее время разработка программного обеспечения (ПО) является сложным и многоэтапным процессом [1]. Как правило, эти процессы включают этапы тестирования, отладки и доставки программ конечным пользователям. Разработка автоматизированной цепочки эффективной доставки программного обеспечения в целом или его отдельных компонентов (модулей) по-прежнему является актуальной проблемой. На практике, значимым подходом для решения данной проблемы является непрерывная интеграция (Continuous Integration, CI) программного обеспечения [2].

Средства CI позволяют организовать автоматизированную цепочку от получения обновленного программного кода из репозитория до развертывания готового научного приложения на стороне пользователя. В рамках CI пользователи получают программный продукт как сервис. Они регулярно разрабатывают новые или модифицируют существующие версии приложений, отлаживают их и тестируют.

Отметим, что средства CI при доставке и тестировании могут использовать только уже существующую вычислительную инфраструктуру. Это справедливо как для физических, так и виртуализированных ресурсов. Таким образом, необходимы дополнительные инструментальные средства для автоматизации создания среды и управления конфигурациями ее узлов.

Разработчики программного обеспечения вынуждены сопровождать как разрабатываемое приложение, так и вычислительную инфраструктуру, необходимую для его отладки и тестирования в процессе CI [3]. Как результат, значительное время при подготовке приложения к выпуску занимает настройка такой инфраструктуры.

Ручное управление инфраструктурой замедляет процессы разработки и сопровождения программного обеспечения. Использование собственных скриптов автоматизации усложняет ее развитие и обслуживание. В частности, это относится к средствам Parallel SSH для параллельного выполнения скриптов [4]. Вышеперечисленные проблемы возникают как в коммерческой сфере разработки ПО, так и в научной сфере. При этом автоматизация конфигурирования инфраструктуры для отладки и тестирования ПО по-прежнему является вызовом [5]. В частности, остается необходимость подготовки и хранения разных версий образов виртуальных машин (ВМ) для разных операционных систем (ОС), версий этих ОС, и версий ПО. В этом случае, дисковое пространство быстро исчерпывается. Кроме того, это усложняет сопровождение инфраструктуры.

Автоматизация процессов создания ресурсов, их автоматизированная настройка, поставка на них модулей ПО может быть применена практически во всех сферах разработки ПО [6]. Однако особое значение это имеет при организации среды функционирования цифровых двойников (ЦД) [7].

Под ЦД понимается виртуальная программная сущность, которая отражает наиболее важные компоненты жизненного цикла исследуемого объекта или системы. В качестве исходных данных для функционирования ЦД используются как реальные показатели работы объекта, так и ретроспективные. ЦД может быть представлен в виде взаимосвязанных имитационных моделей, приложений и сервисов [8].

На практике ЦД все шире внедряются в различных сферах человеческой деятельности на различных этапах создания и использования сложных объектов. Например, такой сферой является поддержка принятия решений при управлении социально-экономическими территориями и расположенными на них инфраструктурными объектами. При этом особое внимание уделяется использованию природосберегающего оборудования [7-8], ему соответствует оборудование, которое в процессе своей работы использует экологически чистые технологии и возобновляемые источники энергии. Например тепловые насосы, ветряные электростанции, солнечные панели и т.д.

Программно-аппаратный комплекс функционирования ЦД как правило состоит из оборудования, которое осуществляет мониторинг текущих показателей работы ЦД и ПО, обеспечивающего агрегацию получаемых данных, моделирование работы исследуемого объекта и визуализацию. Моделирование связано с многократными запусками многовариантных расчетов, поэтому невозможно без применения высокопроизводительных вычислительных ресурсов.

С одной стороны, разработчикам ЦД необходимо управлять конфигурациями оснащенных датчиками микрокомпьютеров, которые осуществляют сбор и предварительную обработку показателей работы оборудования инфраструктурных объектов [9]. С другой стороны – управлять узлами в распределенной вычислительной среде, на которых осуществляется многократный запуск многовариантных расчетов в рамках имитационного моделирования. Поэтому характеристики ПО для обеспечения функционирования ЦД природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов требуют применения специализированных инструментальных средств.

Таким образом, можно сформулировать следующие технические и функциональные требования к средствам управления конфигурациями:

- поддержка управления широким спектром популярных ОС,

- возможность полного контроля настройки узлов вычислительной инфраструктуры на каждом шаге,
- простота установки с минимальной подготовкой настраиваемых узлов,
- свободное распространение,
- инициализация изменений в управляемых узлах сервером (в рамках цепочки CI),
- управление узлами посредством протокола SSH для управления маломощными периферийными устройствами, используемыми в рамках туманных вычислений.

В статье рассматриваются распространенные средства управления конфигурациями узлов вычислительной среды. Обсуждаются их важные свойства и общая схема управления конфигурациями.

Статья структурирована следующим образом. В разделе 1 выполнен обзор свойств систем управления конфигурациями, выделены две признанные перспективными системы, их характеристики сравниваются в разделе 2. Сравнительный анализ различных способов управления конфигурациями узлов в экспериментальной среде представлен в разделе 3. В заключении представлены выводы по материалам статьи.

1. Обзор средств управления конфигурациями. В настоящее время известен широкий спектр программных средств для управления конфигурациями (System Configuration Management, SCM) [10]. Они предназначены для автоматизации процессов создания и развертывания вычислительной инфраструктуры с последующей доставкой приложений в ее узлы.

Кроме того, такие системы позволяют улучшить как управляемость процессов настройки и сопровождения узлов инфраструктуры, так и их надежность. Однако, подготовка и запуск VM не поддерживаются в рамках SCM. Данный процесс реализуется средствами гипервизоров или специальными надстройками [11].

Предполагается, что средства SCM запускаются на «чистых» ОС, хотя и допускается возможность изменения в работающих системах. Они осуществляют настройку и подготовку узлов к работе. Таким образом, разработчик программного обеспечения должен сформировать требования к конфигурации узла. В процессе работы узлов, доступно отслеживание и корректировка их конфигураций в соответствии с требованиями. Общая схема управления конфигурациями представлена на рис. 1.

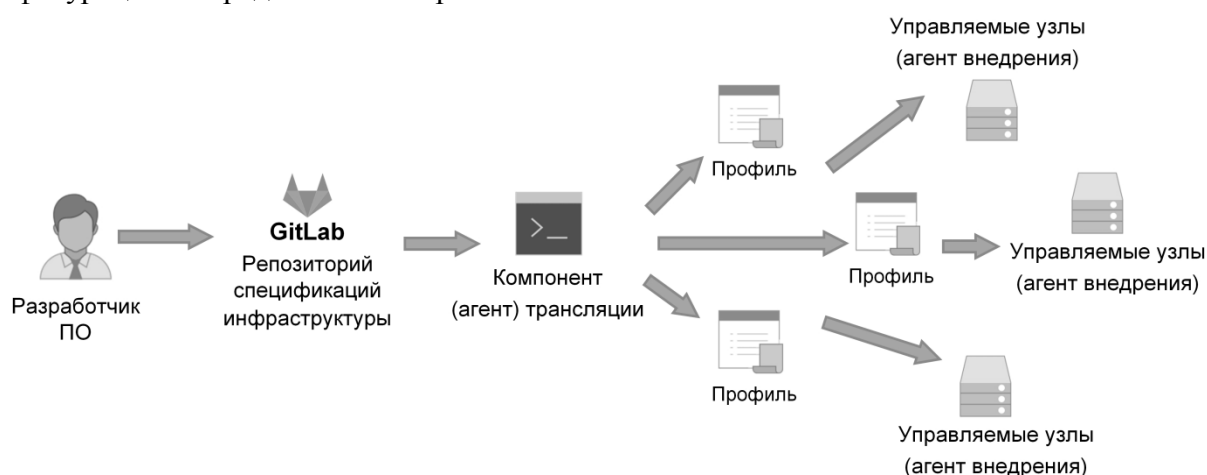


Рис. 1. Схема управления конфигурациями

При помощи выполнения специального программного кода (скриптов), средства SCM позволяют привести вычислительную инфраструктуру в целевое состояние автоматически [12]. Такой код удобно разрабатывать, модифицировать и поддерживать с помощью систем контроля версий, таких как Git [13] и Mercurial [14]. Разработчик программного обеспечения

создает и сохраняет в репозитории спецификацию инфраструктуры. Затем компонент (агент) трансляции самостоятельно или по сигналу администратора передает спецификацию (профиль) на управляемые узлы. В узлах данные профили представляются в виде набора исполняемых команд с помощью компонентов (агентов) внедрения.

Наиболее популярными системами управления конфигурациями являются Puppet [15], Chef [16], Ansible [17], и SaltStack [18]. Их ключевые характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики систем управления конфигурациями.

Система	Ansible	Chef	Puppet	SaltStack	MAS-SCM
Архитектура	Без-агентная	Клиент-серверная	Клиент-серверная	Без-агентная	Мультиагентная
Мультиплатформенность	+	+	+	+	+
Протокол доставки конфигураций	SSH	RabbitMQ	Mcollective	ZeroMQ	SSH / Jade ACL
Способ доставки конфигураций	Push	Pull (Push only in the corporate version)	Push, Pull	Pull	Push, Pull (Agent request)
Пошаговая установка	+	+	-	-	+
База данных	-	PostgreSQL	PuppetDB	-	MariaDB
Язык разработки	Python	Ruby	C++ & Clojure	Python	Java

Среди них язык разработки системы, архитектура системы и поддерживаемая ОС. В рамках выполнения распределенных пакетов прикладных программ важным требованием является поддержка управления ОС семейств Windows и Linux. В статье проприетарные системы и те, разработка которых приостановлена или прекращена, не рассматриваются.

В клиент - серверной архитектуре, агент - это программное обеспечение на стороне узла, которое управляет его конфигурацией в рамках SCM. Без-агентная архитектура позволяет управлять узлом без установки дополнительного программного обеспечения через протокол SSH. Наличие специального (проприетарного) агента в средствах SCM ограничивает типы ОС, конфигурациями которых можно управлять. Среди рассматриваемых систем только Ansible является системой с полностью без-агентной архитектурой. При этом, SaltStack тоже позволяет использовать без-агентный режим. Однако, он работает значительно медленнее в таком режиме в сравнении с использованием проприетарного протокола. В целом, каждая система имеет агентов для поддержки большинства популярных ОС.

Каждая из рассматриваемых систем активно развивается. На их официальных сайтах, размещена полная документация, описывающая все процессы, начиная от установки систем и до их применения при разработке программного обеспечения. Вокруг этих систем сформировано международное сообщество пользователей и энтузиастов, что позитивно сказывается на их развитии.

Все четыре системы предоставляют веб-интерфейс для управления конфигурациями. Его наличие в данных системах не является обязательным требованием. Однако он может использоваться для построения отчетов и наглядного отображения конфигурации инфраструктуры при ее мониторинге. Все системы имеют средства подключения к внешним средствам мониторинга. SaltStack использует собственные средства подобного назначения.

Рассмотрим подробнее особенности работы рассматриваемых систем.

Базы данных. При развертывании систем Chef и Puppet используются системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL и PuppetDB соответственно. Эти СУБД обеспечивают централизованное хранение конфигураций. Производительность и масштабируемость каждой из систем напрямую зависит от используемой СУБД. Кроме того, сервер базы данных требует дополнительного сопровождения.

Корпоративная версия Ansible Tower использует PostgreSQL. Дополнительно она запускает установку MongoDB для построения высоконадежных архитектур.

Доставка конфигураций. Каждая из рассматриваемых систем использует свой собственный способ доставки (транспортировки) конфигураций из репозитория в узел. В то же время, только Ansible использует SSH (Powershell в Windows) для доставки конфигураций. Теоретически это позволяет управлять любым устройством, поддерживающим SSH, с помощью Ansible.

Управляющий узел. Ansible обеспечивает поддержку широкого диапазона ОС на управляющем узле. Теоретически, поддерживаются также любые ОС, имеющие поддержку Python 2.6. SaltStack работает как на Linux, так и на BSD. Управляющие узлы Puppet и Chef работают только на ОС с ядром Linux. Среди них RHEL, SLES, и последние версии Ubuntu.

Пошаговая установка. Только в Ansible и Chef используется пошаговый подход (step-by-step) к настройке узлов. В рамках SCM под пошаговым выполнением понимается последовательное выполнение всех действий, описанных в конфигурационном файле. Данный подход называется императивной конфигурацией. В Puppet и SaltStack используется декларативная конфигурация. Это значит, что конечное состояние узла описывается в конфигурационном файле. При этом система сама выбирает наилучший путь для достижения этого состояния. Декларативная конфигурация является предпочтительной для однотипных серверов. В то же время, императивная конфигурация обеспечивает полный контроль за процессом изменения состояния узла.

Способ доставки изменений в конфигурации от управляющего узла на управляемые узлы. Рассматриваются следующие два способа доставки: Push и Pull. В случае Push, сервер сам отслеживает изменения и при необходимости инициализирует обновление у клиентов. В случае Pull, клиентские агенты периодически опрашивают сервер об обновлениях.

Оперативный учет изменений в конфигурациях является важной характеристикой при построении экспериментальной и рабочей вычислительных инфраструктур. В рамках Push, оперативность достигается в доставке конфигураций на узлы. Только Puppet и Ansible поддерживают Push. Chef в данном случае не рассматривается, так как использование Push доступно только в платной версии. В связи с этим, только системы Puppet и Ansible рассматриваются далее в деталях. Обе эти системы имеют средства интеграции с Docker, Kubernetes, и Jenkins, которые активно применяются в рамках CI.

2. Сравнение Puppet и Ansible. *Особенности управления узлами в Puppet и Ansible.* Первым этапом при настройке Ansible является выбор управляющего узла. Таким узлом может быть любой узел, доступный в репозитории пакетов дистрибутива. В рамках этого этапа необходимо установить Ansible и указать перечень IP-адресов управляемых узлов. При этом нет необходимости в настройке клиентского программного обеспечения. Единственным необходимым условием является поддержка доступа по SSH с управляющего узла на управляемые узлы. Схема управления узлами в Ansible представлена на рис. 2. Описание конфигурации узлов в Ansible представлено в виде PlayBook.

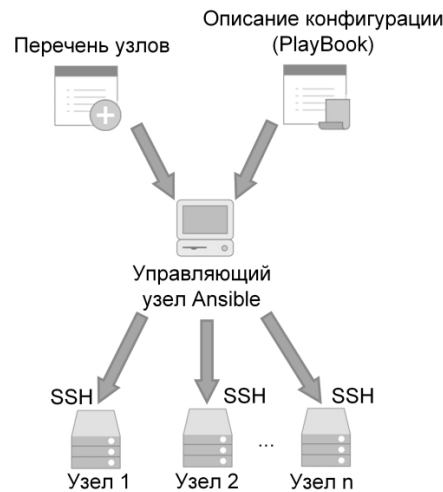


Рис. 2. Схема управления узлами в Ansible

Схема управления узлами в Puppet представлена на рис. 3. Подготовка Puppet для работы происходит сложнее. Во-первых, необходимо синхронизировать время и часовой пояс на всех узлах. Далее, необходимо установить серверное и клиентское ПО. Кроме того, необходимо выполнить следующие операции:

- настроить конфигурационный файл для каждого управляемого узла на сервере Puppet,
- открыть порт 8140,
- перевести службу PuppetServer в рабочий режим,
- указать IP-адрес сервера и сгенерировать SSL-сертификат на управляемых узлах.

Необходимость генерации SSL-сертификата обуславливается тем, что для связи используется протокол HTTPS.

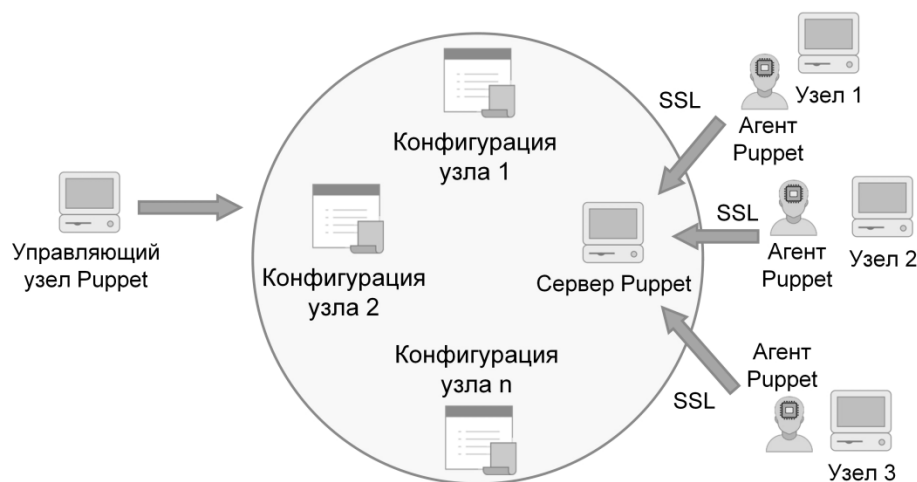


Рис. 3. Схема управления узлами в Puppet

Описание конфигураций в Ansible. Рис. 4 демонстрирует пример фрагмента кода Ansible PlayBook на языке YAML из официального репозитория Ansible examples [19]. В данном примере, установка веб-сервера Tomcat в Centos производится на управляемые узлы. На первом этапе, осуществляется установка Java JDK 1.7. После этого выполняются создание и настройка пользователя tomcat. В частности, ему добавляются права супер-пользователя. Далее, при загрузке исходного кода Tomcat из репозитория выполняются его распаковка, настройка и установка. Код на языке YAML хорошо читаем, что упрощает процесс освоения Ansible.

```

1. ---
2. - name: Install Java 1.7
3.   yum: name=java-1.7.0-openjdk state=present
4. - name: add group "tomcat"
5.   group: name=tomcat
6. - name: add user "tomcat"
7.   user: name=tomcat group=tomcat home=/usr/share/tomcat createhome=no
8.   become: True
9.   become_method: sudo
10. - name: Download Tomcat
11.   get_url: url=http://archive.apache.org/dist/tomcat/tomcat-
12.             7/v7.0.61/bin/apache-tomcat-7.0.61.tar.gz dest=/opt/apache-tomcat-
13.             7.0.61.tar.gz
14. - name: Extract archive
15.   command: chdir=/usr/share /bin/tar xvf /opt/apache-tomcat-
16.             7.0.61.tar.gz -C /opt/ creates=/opt/apache-tomcat-7.0.61
17. - name: Symlink install directory
18.   file: src=/opt/apache-tomcat-7.0.61 path=/usr/share/tomcat
19.         state=link
20. - name: Change ownership of Tomcat installation
21.   file: path=/usr/share/tomcat/ owner=tomcat group=tomcat
22.         state=directory recurse=yes
23. ...
24. - name: Install Tomcat init script
25.   copy: src=tomcat-initscript.sh dest=/etc/init.d/tomcat mode=0755
26. - name: Start Tomcat
27.   service: name=tomcat state=started enabled=yes
28. - name: deploy iptables rules
29.   template: src=iptables-save dest=/etc/sysconfig/iptables

```

Рис. 4. Фрагмент кода Ansible PlayBook на языке YAML из официального репозитория «Ansible examples».

Описание конфигураций в Puppet. Описание конфигураций (манифест Puppet) создается на предметно-ориентированном Ruby-подобном языке в Puppet. Рис. 5 демонстрирует пример из репозитория PuppetLabs MySQL Puppet Module, в котором рассматриваются установка и настройка MySQL [20].

В табл. 2 представлены ключевые преимущества и недостатки систем Puppet и Ansible.

Таблица 2. Преимущества и недостатки систем Puppet и Ansible.

	Puppet	Ansible
Преимущества	Хорошо известный, стабильно развивающийся продукт. Имеет удобный графический интерфейс пользователя. Все основные ОС поддерживаются в Puppet.	Высокая производительность. Без-агентная установка и развертывание. Низкие накладные расходы. Использование Python для разработки этой системы. Простота в освоении.
Недостатки	Низкая производительность работы системы, написанной на Ruby (по сравнению с системами, написанными на Python). Необходимость в изучении языка Puppet для описания конфигураций.	Это относительно новая система. Поддержка Windows осуществляется только через PowerShell.

```

1. # @summary
2. #     Installs and configures the MySQL client.
3. #
4. # @example Install the MySQL client
5. #     class {'::mysql::client':
6. #         package_name => 'mysql-client',
7. #         package_ensure => 'present',
8. #         bindings_enable => true,
9. #     }
10. #
11. # @param bindings_enable
12. #     Whether to automatically install all bindings. Valid values are
13. #     `true`, `false`. Default to `false`.
14. # @param install_options
15. #     Array of install options for managed package resources. You must
16. #     pass the appropriate options for the package manager.
17. # @param package_ensure
18. #     Whether the MySQL package should be present, absent, or a spe-
19. #     cific version. Valid values are 'present', 'absent', or 'x.y.z'.
20. # @param package_manage
21. #     Whether to manage the MySQL client package. Defaults to `true`.
22. # @param package_name
23. #     The name of the MySQL client package to install.
24. #
25. class mysql::client (
26.     $bindings_enable = $mysql::params::bindings_enable,
27.     $install_options = undef,
28.     $package_ensure = $mysql::params::client_package_ensure,
29.     $package_manage = $mysql::params::client_package_manage,
30.     $package_name = $mysql::params::client_package_name,
31. ) inherits mysql::params {
32.     include '::mysql::client::install'
33.     if $bindings_enable {
34.         class { 'mysql::bindings':
35.             i. java_enable => true,
36.             ii. perl_enable => true,
37.             iii. php_enable => true,
38.             iv. python_enable => true,
39.             v. ruby_enable => true,
40.         }
41.     }
42. }
43. # Anchor pattern workaround to avoid resources of
44. # mysql::client::install to
45. # "float off" outside mysql::client
46. anchor { 'mysql::client::start': }
47.     => Class['mysql::client::install']
48.     => anchor { 'mysql::client::end': }
49. }

```

Рис. 5. Описание конфигураций на предметно-ориентированном Ruby-подобном языке в Puppet.

В целом, каждая из систем обладает своими преимуществами и недостатками. Исходя из требований, сформулированных во введении, принято решение внедрить в цепочку CI систему Ansible. Это обусловлено следующими ключевыми факторами:

- Поддержка управления большинством популярных ОС.
- Использование без-агентного подхода, что упрощает подготовку системы к работе.
- Использование императивной конфигурации узлов, обеспечивающей полный контроль за установкой программного обеспечения на каждом этапе.
- Бесплатное распространение по лицензии GPLv3+.

- Использование Push для доставки конфигураций.
- Управление узлами посредством протокола SSH, что позволяет управлять практически любым устройством, поддерживающим данный протокол.

3. Сравнительный анализ. В рамках сравнительного анализа оценивается время, затрачиваемое на подготовку 10 узлов экспериментальной вычислительной среды, обеспечивающей проведение имитационного моделирования для ЦД. 10 ВМ запущены на 10 узлах среды с помощью специальной гипервизорной надстройки, разработанной в дополнение к OpenStack [11]. ВМ запущены с использованием их образов, подготовленных заранее.

Экспериментальная среда создана на базе ресурсов Иркутского суперкомпьютерного центра. На пяти узлах установлена Centos 7, на остальных узлах используется Ubuntu 18.04. В каждой ОС обеспечен беспарольный ключевой доступ по протоколу SSH.

Все ВМ должны быть готовы для разворачивания экземпляров исполнительной системы. При этом, Web-сервер Apache, PHP версии 7.2, СУБД Maria DB версии 10, и прочее системное программное обеспечение необходимы для работы исполнительной системы.

Для конфигурирования узлов необходимо выполнить следующие действия:

- Установка необходимого системного программного обеспечения на ресурсы и конфигурирование среды.
- Запуск мультиагентной платформы.
- Запуск агентов на ресурсах и их регистрация.
- Распределение вычислительных работ.
- Развертывание исполняемых файлов на ресурсах агентов.
- Запуск системной части исполнительной системы.
- Запуск модулей.
- Сбор и анализ результатов выполнения модулей.

Есть несколько путей подготовки экспериментальной вычислительной среды без использования Ansible:

- Подготовка полностью настроенных образов ВМ для всех возможных случаев.
- Установка и настройка каждой запущенной ВМ вручную.
- Автоматизация установки с помощью параллельного выполнения команд (скриптов) с применением Parallel SSH.

Хранение настроенных образов ВМ для всех возможных случаев является нецелесообразным, так как требования к версиям системного и прикладного программного обеспечения могут часто изменяться. Кроме того, свободное дисковое пространство очень быстро заканчивается при таком хранении.

На рис. 6. представлена гистограмма, отражающая время конфигурирования одного узла в ручном режиме и с помощью Ansible. Из рисунка видно, что настройка одного узла вручную занимает больше времени на каждом из этапов, чем с использованием средств, базирующихся на применении Ansible.

В целом, автоматизация ручной установки с помощью Parallel SSH позволяет сократить время настройки узлов. При этом необходимо разрабатывать несколько версий таких скриптов для каждой ОС и ее версий. Число таких скриптов растет очень быстро, т.к. для каждого отдельного случая необходимо подготовить соответствующий скрипт, который приведет узел в рабочее состояние. Очевидно, что использование Parallel SSH является непереносимым при большом числе разнородных конфигураций узлов в экспериментальной среде. Кроме того, использование Parallel SSH может привести к дополнительным ошибкам в разработке, сопровождении и отладке большого числа скриптов.

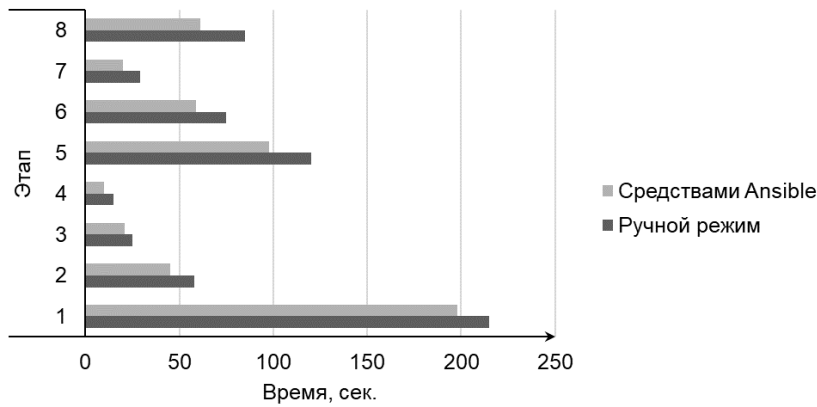


Рис. 6. Время конфигурирования одного узла.

Гистограмма на рис. 7 демонстрирует значительное уменьшение времени автоматической настройки узлов по сравнению с ручной настройкой, даже с применением Parallel SSH. При этом, небольшое время настройки узлов с помощью скриптов нивелируется сложностью сопровождения и разворачивания собственных скриптов. В Ansible такие проблемы отсутствуют.

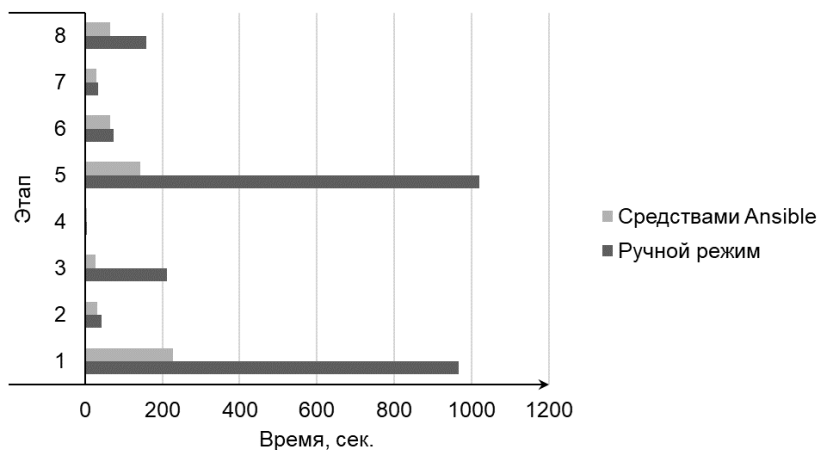


Рис. 7. Время конфигурирования десяти узлов.

Использование средств Ansible позволило существенно сократить время конфигурирования узлов для обеспечения работы ЦД. В случае Ansible мы затрачиваем приблизительно 582 секунды против 2624 секунд в ручном режиме. Таким образом, используя Ansible, мы сокращаем накладные расходы в 4 раза по сравнению с ручным режимом настройки узлов.

Заключение. В статье выполнен сравнительный анализ средств управления конфигурациями вычислительных сред. Такие средства предназначены для автоматизации настройки узлов среды. В результате автоматизации время, затрачиваемое на настройку, существенно сокращается. Дополнительно надежность узлов повышается за счет уменьшения ошибок в настройке, связанных с человеческим фактором.

Достоинства SCM особенно очевидны при их внедрении в рамках CI. При этом требуемое число ВМ запускается с помощью средств виртуализации. Дальнейшая настройка ВМ выполняется автоматически средствами SCM.

Рассмотренные средства являются основой для дальнейшего создания и развития инструментального комплекса для построения среды, обеспечивающей условия функционирования ЦД природосберегающего оборудования. В целом, подход к автоматизации организа-

ции среды функционирования ЦД на базе средств SCM является новым. Дополнительная интеграция поддержки мультиагентных технологий позволит повысить научную и практическую значимость применения данных средств [21]. В частности, это касается улучшения показателей качества конфигурирования узлов среды на примере задач эффективного распределения исполняемых модулей ЦД между разнородными вычислительными ресурсами [22]. Встраивание мультиагентной системы в такие системы, как Ansible, позволяет реализовать их недостающие функциональные возможности.

Результаты экспериментального анализа подготовки экспериментальной вычислительной среды продемонстрировали преимущества системы Ansible и позволяют обоснованно выбрать эту систему в качестве базового средства для автоматизации управления конфигурациями ресурсов. Автоматизация обеспечивает улучшение качества разработки, тестирования и распространения исполняемых модулей цифровых двойников и других научных приложений.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00097), а также Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области (проект № 20-47-380002-р_а). Исследования, связанные с моделированием вычислительной среды, выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121032400051-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim G., Debois P., Willis J., Humble J. The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations. IT Revolution Press. 2016. 480 с.
2. Shahin M., Babar M.A., Zhu L. Continuous integration, delivery and deployment: a systematic review on approaches, tools, challenges and practices // IEEE Access. 2017. Т. 5. С. 3909–3943. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2685629.
3. Morris K. Infrastructure as Code. O'Reilly Media. 2016. 362 с.
4. Parallel-SSH. Режим доступа: <https://parallel-ssh.org> (дата обращения: 09.04.2021).
5. Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Tchernykh A. Continuous Integration in Distributed Applied Software Packages // Proceedings of the 42th International Convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2019). IEEE. 2019. С. 1775–1780. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757002.
6. Феоктистов А.Г., Сидоров И.А., Горский С.А. Автоматизация разработки и применения распределенных пакетов прикладных программ // Проблемы информатики. 2017. № 4. С. 61–78.
7. Медведев А.В. Цифровые двойники территорий для поддержки принятия решений в сфере регионального социально-экономического развития // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-1. С. 61–66. DOI: 10.17513/snt.38072.
8. Krawczyk J.B., Lifran R., Tidball M. Use of coupled incentives to improve adoption of environmentally friendly technologies // Journal of Environmental Economics and Management. 2005. Т. 49. № 2. С. 311–329. DOI: 10.1016/j.jee.2004.04.007.
9. Sidorov I., Kostromin R., Feoktistov A. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment // Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments. CEUR-WS Proceedings. 2020. Т. 2638. С. 252–264. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.23.
10. Quigley J.M., Robertson K.L. Configuration Management: Theory, Practice, and Application. Auerbach Publications. 2015. 438 с.

11. Feoktistov A., Sidorov I., Sergeev V., Kostromin R., Bogdanova V. Virtualization of Heterogeneous HPC-clusters Based on OpenStack Platform // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6. № 2. С. 37–48.
12. Delaet T., Joosen W., Vanbrabant B. A survey of system configuration tools // Proceedings of the 24th International Conference on Large installation system administration. USENIX Association. USA. 2010. С 1–8.
13. GitHub. Режим доступа: <https://github.com> (дата обращения: 09.04.2021).
14. Mercurial. Режим доступа: <https://www.mercurial-scm.org> (дата обращения: 09.04.2021).
15. Puppet. Режим доступа: <https://puppet.com/> (дата обращения: 09.04.2021).
16. Chef. Режим доступа: <https://www.chef.io/products/chef-infra> (дата обращения: 09.04.2021).
17. Ansible. Режим доступа: <https://www.ansible.com> (дата обращения: 09.04.2021).
18. SaltStack. 2021. Режим доступа: <https://www.saltstack.com> (дата обращения: 09.04.2021).
19. Ansible PlayBook examples repository. Режим доступа: <https://github.com/ansible/ansible-examples/blob/master/tomcat-standalone/roles/tomcat/tasks/main.yml> (дата обращения 09.04.2021).
20. Puppetlabs manifest examples repository. Режим доступа: <https://github.com/puppetlabs/puppetlabs-mysql> (дата обращения 09.04.2021).
21. Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Габдуллина Э.Р. Методологические основы моделирования и интеллектуального управления промышленным комплексом как сложным динамическим многоагентным объектом // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-2. С. 288–293. DOI: 10.17513/snt.38376.
22. Черных А.Н., Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А., Сидоров И.А., Костромин Р.О., Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Аветисян А.И. Смягчение неопределенности при разработке и применении научных приложений в интегрированной вычислительной среде // Труды ИСП РАН. 2021. Т. 33. № 1. С. 151–172. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-11.

UDK 004.942

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESOURCE CONFIGURATION MANAGEMENT SYSTEMS FOR THE COMPUTING ENVIRONMENT OF DIGITAL TWINS FUNCTIONING

Roman O. Kostromin

junior researcher, e-mail: kostromin@icc.ru,

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

Annotation. The paper discusses the problem of preparing a computing environment for large-scale scientific experiments in the process of continuous integration of applied and system software. The environment is used both for launching scientific applications and for studying the functioning of digital twins of infrastructure objects. Such an environment is characterized by dynamic changes in the composition of resources, their characteristics, and requirements for them. Environment resources include computers,

servers, virtual machines, and microcomputers. We need universal tools to automate the configuration of such resources. A comparative analysis of software configuration management tools (such as Chef, Ansible, Puppet, and SaltStack) of computational nodes in a heterogeneous environment is being performed. These tools are intended for automating the configuration of different nodes. Such automation reduces the setup time of nodes and increases the reliability of computations by minimizing the number of software and hardware failures, associated with the human factor in the manual configuration process. The considered tools are the basis for the further development of the instrumental complex for building an environment that provides the conditions for the functioning of digital twins of nature protection equipment. Based on the results of the comparative analysis and requirements of this framework, the Ansible framework was selected for further integration into the chain of continuous integration of applied and system software. Practical experiments have shown the advantages of using Ansible in comparison with other systems of a similar purpose.

Keywords. software tools, resource management, distributed computing environment, virtualized resources, configuration management automation, digital twin

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Foundation of Basic Research (project no. 19-07-00097) and by the Russian Foundation of Basic Research and Government of Irkutsk Region (project no. 20-47-380002). The study related to modeling the computing environment was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 121032400051-9.

REFERENCES

1. Kim G., Debois P., Willis J., Humble J. *The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations*. IT Revolution Press. 2016. 480 c.
2. Shahin M., Babar M.A., Zhu L. Continuous integration, delivery and deployment: a systematic review on approaches, tools, challenges and practices // *IEEE Access*. 2017. T. 5. C. 3909–3943. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2685629.
3. Morris K. *Infrastructure as Code*. O'Reilly Media. 2016. 362 c.
4. Parallel-SSH. Режим доступа: <https://parallel-ssh.org> (дата обращения 09.04.2021).
5. Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Tchernykh A. Continuous Integration in Distributed Applied Software Packages // *Proceedings of the 42th International Convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2019)*. IEEE. 2019. C. 1775–1780. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757002.
6. Feoktistov A.G., Sidorov I.A., Gorsky S.A. Avtomatizatsiya razrabotki i primene-niya raspredelennykh paketov prikladnykh programm [Automation of development and application of distributed applied software packages] // *Problemy informatiki = Problems of Informatics*. 2017. № 4. P. 61–78.
7. Medvedev A.V. Tsifrovyye dvoyniki territoriy dlya podderzhki prinyatiya resheniy v sfere regional'nogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya [Digital twins of territories to support decision-making in the field of regional socio-economic development] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern high technologies*. 2020. No. 6-1. P. 61–66. DOI: 10.17513/snt.38072.
8. Krawczyk J.B., Lifran R., Tidball M. Use of coupled incentives to improve adoption of environmentally friendly technologies // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2005. Vol. 49, No. 2. P. 311–329. DOI: 10.1016/j.jeem.2004.04.007.
9. Sidorov I., Kostromin R., Feoktistov A. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environ-*

- ments. CEUR-WS Proceedings. 2020. Vol. 2638. P. 252–264. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.23.
10. Quigley J.M., Robertson K.L. Configuration Management: Theory, Practice, and Application. Auerbach Publications, 2015. 438 p.
 11. Feoktistov A., Sidorov I., Sergeev V., Kostromin R., Bogdanova V. Virtualization of Heterogeneous HPC-clusters Based on OpenStack Platform // South Ural State University Bulletin: Computational Mathematics and Software Engineering series. 2017. Vol. 6, No. 2. P. 37–48.
 12. Delaet T., Joosen W., Vanbrabant B. A survey of system configuration tools // Proceedings of the 24th International Conference on Large installation system administration. USENIX Association, USA. 2010. P. 1–8.
 13. GitHub. Режим доступа: <https://github.com> (дата обращения 09.04.2021).
 14. Mercurial. Режим доступа: <https://www.mercurial-scm.org> (дата обращения 09.04.2021).
 15. Puppet. Режим доступа: <https://puppet.com> (дата обращения 09.04.2021).
 16. Chef. Режим доступа: <https://www.chef.io/products/chef-infra> (дата обращения 09.04.2021).
 17. Ansible. Режим доступа: <https://www.ansible.com> (дата обращения 09.04.2021).
 18. SaltStack. Режим доступа: <https://www.saltstack.com> (дата обращения 09.04.2021).
 19. Ansible PlayBook examples repository. Режим доступа: <https://github.com/ansible/ansible-examples/blob/master/tomcat-standalone/roles/tomcat/tasks/main.yml> (дата обращения 09.04.2021).
 20. Puppetlabs manifest examples repository. Режим доступа: <https://github.com/puppetlabs/puppetlabs-mysql> (дата обращения 09.04.2021).
 21. Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R. Metodologicheskiye osnovy modelirovaniya i intellektual'nogo upravleniya promyshlennym kompleksom kak slozhnym dinamicheskim mnogoagentnym ob'yektom [Methodological foundations of modeling and intelligent management of an industrial complex as a complex dynamic multi-agent object] // Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern high technologies. 2020. № 11-2. P. 288–293. DOI: 10.17513/snt.38376.
 22. Tchernykh A., Bychkov I., Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Kostromin R., Edelev A., Zorkalzev V., Avetisyan A. Smyagcheniye neopredelennosti pri razrabotke i primenenii nauchnykh prilozheniy v integrirovannoy vychislitel'noy srede [Mitigating Uncertainty in Developing and Applying Scientific Applications in an Integrated Computing Environment] // Trudy ISP RAN = Proceedings of ISP RAS. 2021. Vol. 33. № 1. P. 151–172. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-11.