ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ



Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 2 (26)



ISSN 2413 – 0133 Индекс E79114*

EDITORIAL BOARD

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Ablameyko S.V. Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ

Arshinskiy L.V. Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС Вегеstneva О.G. Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ

Воикhanovsky A.V.Bychkov I.V.Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМОBychkov I.V.Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАНWoern H.Верн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (КІТ)Voevodin V.V.Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ

Wolfengagen V.E.Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИGornov A.Y.Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАНGribova V.V.Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН

Groumpos P. Грумпос П., Греция, University of Patras

Zorina Т.G. Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН

Kalimoldaev M.N. Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ

Кагрепко А.Р. Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана Коmendantova N.Р. Кигеіснік V.V. Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог

Lis R. Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology

Massel L.V. Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Moskvichev V.V.Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАНOvtcharova J.Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (КІТ)Popov G.T.Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет

Sidorov D.N. Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН Smirnov S.V. Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН

Stennikov V.A.Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАНStylios C.Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of EpirusTaratukhin V.V.Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster

Кhamisov O.V. Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Hodashinsky I.A. Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР

Сhubarov L.B. Чубаров Л.Б., д.т.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН

Yusupova N.I. Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

EXECUTIVE EDITORIAL ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Chief Editor Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Executive Editor	Выпускающий редан	ктор	
Bakhvalova Z.A.		Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СОРАН
Editor Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer Pesterev D.V.	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

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 − 73539.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМСО РАН СС ВУ

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.

Дата выхода 20.06.2022 г. Тираж 100 экз. © Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная. (6+)

2

_						
Co	٦п	ρr	ገሥ	a	Нι	ΛP

Математическое моделирование

	Черкашин А.К. Метатеоретическое семиотическое моделирование в науке и технике	5
	Нгуен Ван Винь, Репецкий О.В. Математическое моделирование и его применение в преднамеренной расстройке параметров и оптимизации ресурсных характеристик турбомашин	24
	Тукмаков Д.А. Исследование влияния параметров математической модели на расчеты стационарной двухмерной конвективной диффузии осаждающейся твердой дисперсной примеси.	31
	Иваньо Я.М., Петрова С.А., Цыренжапова В.В. Модели роста с насыщением в задаче параметрического программирования применительно к аграрному производству	42
	Сороковиков П.С., Горнов А.Ю. Пакет программ МЕОРТ для решения невыпуклых задач параметрической идентификации	53
И	нформационные и математические технологии в энергетике	
	Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами	61
	Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Киберфизическая безопасность прогностических алгоритмов в групповых регуляторах установок распределенной генерации	69
	Карамов Д.Н., Муфтахов И.Р., Потапов В.В., Сыромятников А.А., Шушпанов И.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах	85
	Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы	97
	Кулагина Л.В., Штым К.А., Кириллова И.В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы	104
	Бредихин А.И., Мельников А.В. Подход к построению углеродной карты Ханты-Мансийского автономного округа на основе оценки биомассы с помощью данных дистанционного зондирования Земли.	115
M	етоды и приложения искусственного интеллекта	
	Ворожцова Т.Н. Онтологический анализ взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем	127
	Аршинский Л.В., Скоробогатова М.В. Онтологическое моделирование аппаратов на динамической воздушной подушке	139
	Баканов М.В., Данеев А.В., Сизых В.Н. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы управления автономным мобильным роботом.	147
	Лаптев Н.В., Кравченко А.А., Гергет О.М. Разработка библиотеки планирования и управления лвижениями коллаборативного робота Kuka iiwa.	161

	Content
Math modeling	
Cherkashin A.K. Metatheoretical semiotic modeling in science and technology	5
Nguyen Van Vinh, Repetckii O.V. Mathematical modeling and its application in intentional mistuning of parameters and optimization of life characteristics of turbomachines	24
Tukmakov D.A. Investigation of the influence of the parameters of the mathematical model of two-dimensional stationary convective diffusion on the calculations of the concentration of depositing solid particles in the channel	31
Ivanyo Y.M, Petrova S.A., Tsyrenzhapova V.V. Growth models with saturation in the problem of parametric programming as applied to agricultural production Sorokovikov P.S., Gornov A.Yu. MEOPT software package for solving nonconvex problems of parametric identification	42 53
Information and mathematical technologies in energy	
Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Simulation of induced voltages generated by a traction 25 kV network on a pipeline equipped with insulating flanges	61
Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Cyber-physical security of predictive algorithms in group controllers of distributed generation plants	69
Karamov D.N., Muftahov I.R., Potapov V.V., Syromyatnikov A.A., Shushpanov I.N. Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems	85
Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. The Mix and Significance of Energy Security Metrics as Depending on the Objectives of a Projection and the Time Frame Covered by it	97
Kulagina L.V., Shtym K.A., Kirillova I.V. Development the Technology for the Production of Thermal Energy Using Biomass	104
Bredikhin A.I., Melnikov A.V. An approach to the creation of a carbon density map of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug based on the assessment of biomass using Earth remote sensing data	115
Methods and applications of artificial intelligence	
Vorozhtsova T.N. Ontological analysis of the interrelationships of energy and socio-ecological systems	127
Arshinskiy L.V., Skorobogatova M.V. Ontological modeling of vehicles of dynamic air cushion	139
Bakanov M.V., Daneev A.V., Sizykh V.N. Algorithmic support of an adaptive control system for an autonomous mobile robot	147
Laptev N.V., Kravchenko A.A., Gerget O.M. Development of a library for planning and controlling the movements of the collaborative robot Kuka iiwa	161

УДК 003:81-13:51-7

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.001

Метатеоретическое семиотическое моделирование в науке и технике

Черкашин Александр Константинович

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Россия, Иркутск, *akcherk@irnok.net*

Аннотация. Разрабатываются математические модели интертеории знаковых систем в терминах векторного расслоения признаковых пространств методами дифференциальной геометрии в составе общей теории комплексов, используя системно-семиотические представления лингвистических знаний. Исследовано проявление метатеоретических (МТ) законов от уравнений формирования отдельных знаков к анализу и синтезу научных текстов и системных теорий. Предложенное универсальное уравнение позволяет сравнивать различные объекты и явления и использовать его в качестве аппарата для количественного и качественного анализа. Интертеория семиотики изучает свойства линейного порядка в форме чистого знания о законах, абстрагированных от контекста. В аксиомах семиотики постулируется существование разных форм знаковых систем расслоения с линейно-упорядоченной структурой: признакового пространства расслоения, базы расслоения, расслоенного векторного пространства и комплекса связности слоев-знаков. Используя процедуры векторизации и их обобщения, производятся знаковые системы разной сложности, проводится аналогия структуры текста с картографическими и техническими схемами. Знаковые изменения происходят средствами геометрических преобразований в различных системах координат с сохранением узнаваемости. Свойства простых знаков распространяются на свойства знаковых систем и МТ-модели географической и технической реальности. Триадическая форма организации МТзнаний позволяет считать означаемый объект обобщенной суммой предмета (концепта) исследования и означающих знаков, что логически связывается с моделью трансцедентальной аргументации. Структуры порядка моделируются единичным отрезком [0,1], что позволяет перенести известные свойства действительных и гипердействительных чисел на сложные знаковые системы (комплексы) семиотики, лингвистики и других наук о сложных явлениях и представить научные тексты естественного языка в терминах формального метаязыка преобразований и отношений алгебраических систем. В итоге знаками (схемами) является все то, что воспроизводит и сохраняет линейный порядок, т.е. ограничено, индексировано, фрактально-иерархически организовано, гомотопически подобно и т.д.

Ключевые слова: метатеория и интертеория знаковых систем, многообразия знаковых систем, общая теория сложных систем, расслоенное признаковое пространство, математическое моделирование, географические и технические схемы

Цитирование: Черкашин А.К. Метатеоретическое семиотическое моделирование в науке и технике / А.К.Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 2(26). - С. 05-23. - DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.001.

Введение. В современной теоретической лингвистике одновременно сосуществуют и независимо развиваются противоречащие друг другу теории языка, различающиеся по разным вопросам: о роли языка в мышлении, о модульности языка, структуре его выражения, природе языковых значений и др. [1]. Эти вопросы и наличие множества естественных, искусственных и формальных языков и разнообразия иных знаковых систем делают необходимым проведение междисциплинарных исследований с использованием методов высокого уровня — семиотики, системологии, философии и математики — в познании природы языка и законов коммуникации [2, 3, 4, 5, 6], а с другой стороны, служат основанием для выявления новых метатеоретических (МТ) знаний теоретической информатики для применения в других областях науки [7, 8] в процессе внедрения методов математической технологии решения сложных задач. К такой технологии, например, относят автоматизированное проектирование инженерных конструкций средствами математического моделирования с использованием ЭВМ параллельного действия [9].

МТ-мышление локализовано на границе между логикой языка специальных содержательных системных теорий и математических формализмов метанауки и позволяет переводить формальные языки выражения знаний в естественно-языковые модели истинного содержания. Выражения метатеории соответствуют уровню искусственных и формальных языков (метаязыков) философско-методологических оснований науки о языке в его широком понимании как знаковых систем разного рода, включая тематические модели языка представления географических описаний и языка карт [10], способных служить наглядной иллюстрацией МТ-принципов анализа и синтеза данных и знаний [11]. Принимать это во внимание полезно, как в случае сопоставления языка с шахматами или дорожными знаками [12], так и в варианте сравнения с другими естественными и искусственными конструкциями.

Необходимо исходить из понимания, что язык — не просто инструмент для отражения реальности, но он «творит» реальность, является конструктором реальности [13]. Проблема соотношения языка и реальности связана с системными представлениями и формированием семиотики как общей теории знаков и знаковых систем, а также семиотического моделирования. Выделяются разные семиотические описания (эко-, био- социо-, геосемиотика), включая техносемиотику, проявляющуюся в рисунках, схемах, чертежах, макетах технических конструкций [14]. Семиотический подход применяется в различных областях знаний, например, в информатике это тексты на естественном языке, искусственные языки, алгоритмы обработки информации, создание картографических изображений, специальных схем и планов, причем отмечается недостаточное использование семиотики в технических областях [15]. Д. А. Поспеловым дано определение семиотической модели и моделирования, детализированное в работах Г. С. Осипова [16].

В лингвистике, как в географии или технике, существенна оппозиция общего и индивидуального в познании, что выражается в различении в науке номотетической (генерализующей) методологии установления объективных законов на основе обобщения сведений о разных, например, физических процессах, и идеографической методологии, задачей которой является описание индивидуальных, уникальных географических, исторических и технических явлений [17]. Описание индивидуального достигается путем сравнения его с общими ценностями вневременного и сверхиндивидуального характера (инвариантами, образцами, эталонами, стандартами). Аналогичное направление в лингвистике родственно индивидуализированному взгляду на язык (В. фон Гумбольдт, А.А. Потебня, Л.В. Щерба, А.А. Шахматов, Р.О. Якобсон, Н.В. Крушевский, Р. Дж. Коллингвуд и др.).

Один из основоположников лингвистики как науки В. фон Гумбольдт развил учение о языке как непрерывном творческом процессе и о «внутренней форме языка» как выражения индивидуального миросозерцания народа. Он стремился конкретизировать и развивать трансцедентальное учение И. Канта на материале общественной истории, которая – результат деятельности духовной силы, лежащей за пределами познания, непонятной с причинно-следственной точки зрения и проявляющейся через творческие способности и личные усилия отдельных индивидов [18]. Его младший брат Александр фон Гумбольдт – один из основателей географии как самостоятельной науки – представлял свои научные труды в форме, имеющей высокое литературное достоинство, поскольку, по его мнению, сведение результатов наблюдений в ряды одних общих выводов лишает их «дыхания жизни». Ему принадлежит положение: «Для разумного созерцания, природа есть единство во множестве, соединение разнообразного по форме и составу, есть понятие о совокупности естественных явлений и естественных сил, как о живом целом» [19, с. 3] – природном комплексе в современном понимании.

Н.Крушевский [20] писал о необходимости создания «более общей науки», которую он определил, как своего рода «феноменологию языка». Цель трансцендентальной (ТЦ) феноме-

нологии - построение универсальной науки, относящейся к «всеобъемлющему единству сущего», которая имела бы строгое аналитическое основание и служила обоснованием другим наукам [21]. Идеалы аналитической философии требуют ясности, точности и логической строгости мышления, в котором и интеллектуальная система ТЦ-аргументации И.Канта стала бы одним из основных приемов рассуждения и доказательства. Строгость изложения знаний подразумевает широкое использование в лингвистике методов математического моделирования, системного подхода, применения в рассуждениях различных графиков, схем, чертежей и формул [22, 23].

Ставится задача на основе существующих логико-философских и системносемиотических представлений разработать макет «более общей науки», содержательно реализующей формальные модели дифференциальной геометрии и топологии в терминах векторного расслоения признаковых пространств знаковых систем как графических комплексов в составе общей теории комплексирования. Необходимо проследить проявление метатеоретических (МТ) закономерностей от формирования отдельных знаков к анализу и синтезу текстовых конструкций и системной теории специального содержания с использованием семиотических моделей.

1. Основные понятия. Знаки являются обязательными атрибутами различных областей культуры и видов деятельности в природе и обществе, т.е. сквозным образом проявляются в интердисциплинарном исследовании знаковых систем. Знаки рисуются, в частности, картографируются или изображаются в рукописных текстах. Особенность знакопостроения, на что мало обращают внимание, — наличие координатного пространства, в котором знаки и системы знаков дискретно или непрерывно воспроизводятся разными средствами, порождая структуру и организацию пространства. Примерами являются буквы школьных прописей на разлиновке тетрадного листа, знак скрипичного ключа на нотном стане, написание цифр почтового индекса на индексной сетке, личная подпись в соответствующем месте документа, расположение фигур на шахматной доске, изолинии высот, линии рек, дорог, границ контуров топоосновы карты с географическими координатами, размещение текста на страницах трехмерного пространства книги или атласа карт. Личная подпись обладает базовыми свойствами знака: узнаваема, не имеет аналога, не зависит от масштаба, постоянно воспроизводится в разных местах и в разные моменты времени.

Другая особенность графического знака — линейность построения: знак начинается в одной точке и безотрывно продолжается в линейном порядке в локально заданном направлении. При необходимости простые знаки смыкаются (сшиваются) с другими знаками, образуя знаковые системы. Наглядно это проявляется в «языке карты» [10] — лингвистической интерпретации картографических знаковых систем сквозного отображения Земли и Космоса. Основы семиотической теории разработал Ч.Пирс — математик с опытом работы геодезиста [24].

Система S – это множества элементов $v \in V$ и связей $u \in U = V \times V$, образующих целостность $S = V \times U$. В генеративной грамматике H.Хомского [25] правильные тексты языка, представляют систему $S = V \times U$, где V - конечные множества алфавитов, U – конечное множество правил грамматики. Схематично система изображается в виде графа из вершин (элементов) V и ребер (связей) U (рис.1).

В математической лингвистике с использованием ориентированных графов разработан формальный аппарат для описания синтаксической структуры правильных предложений [26]. Например, в графе для каждого слова (вершины) указываются слова, которые ему подчинены — формируется дерево синтаксического подчинения (рис.1а), или строится граф линейно упорядоченных составляющих предложения (рис.1б). Корнем правильного дерева подчинения обычно служит сказуемое (рис.1а). В верхней части графов показаны глубинные синтаксические структуры предложения, несущие основное семантическое содержание в форме триплета

<субъект, предикат, объект> модели для представления данных и метаданных. В структуре предложений обычно прослеживается триангуляция текста по коммутативной схеме (см. далее рис.3), что отдаленно напоминает геодезическую триангуляцию местности по опорным пунктам (высотам рельефа).

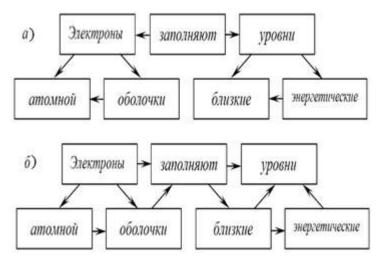


Рис.1. Ориентированные графы синтаксической структуры предложения «Электроны атомной оболочки заполняют близкие энергетические уровни»: а) — дерево синтаксического подчинения; б) — система линейно упорядоченных составляющих (пояснения в тексте). Стрелки указывают на отношения и порядок следования слов

Считается [22], что один и тот же объект должен изучаться с разных системных сторон (аспектов, срезов). Д. Ферс [27] рассматривал лингвистику как системную дисциплину, но отрицал существование единой суперсистемы, справедливо признавая язык полисистемным образованием. Он выделял специальные системы, такие, как поле локативности или падежная система. Допускается типология систем по разным основаниям; для каждого рода систем создается своя понятийно-терминологическая база и определяется набор аксиом связи понятий — формируется системная интертеория [28]. Интертеория сквозным образом описывает объекты и явления в природе и обществе как системы особого рода, например, как знаковые системы естественного и искусственного происхождения.

Распространены два инструмента изображения знаков, карт, схем и чертежей – векторный и растровый. Векторное начертание знака осуществляется переходом от точки к точке. Векторизация и упорядочение знаков в знаковые системы, слов в предложении, предложений в тексте – явления одного порядка. По этой причине векторный системный анализ в его количественном и качественном выражении заслуживает особого внимания. В лингвистике понятием «вектор» отражаются связи, влияния, сравнения, движения и изменения в системах языка, что в простейшей форме использовалось в трудах У. Булла, Г. Гийома, Л.М. Скрелиной, З.Я. Тураевой и др. [22]. В модели У. Булла [29] рассматривается вектор бесконечно длящегося времени, в котором всякое явление имеет начало и конец. У Г.Гийома [30, 31] стрелки используются в схемах механизмов развертывания речевой деятельности и отображения изменений в системе систем языка. Он приходит к выводу, что «надлежащее применение математики к науке о языке потребовало бы полной ее переработки в виде предматематики...», что позволит «ухватить живой механизм языковых операций» [30, с. 156]. «Предматематика» - это и есть МТ-уровень обобщения знаний в контексте теоретической информатики и реализации математических технологий.

2. Математическая модель. Вектор-стрелка — это отрезок направленной линии, имеющий начало и конец (вершину), связывающий эти позиции в систему типа ориентированного графа (см. рис.1) или векторного поля, что позволяет при исследовании языка привлекать методы расслоения дифференциальной геометрии и топологии. Вектор r — математический объект, характеризуемый величиной r = |r| и направлением α (рис.2).

Рассматривается пространство \mathbb{R}^n дифференциальных признаков объектов в системе X независимых координат $X=\{X_i\},\ i=1,2,3,...,n$ («пучка» различительных признаков), в которой каждая точка $x\in X$ координируется последовательным набором значений координат $x=\{x_i\},\ x_i\in X_i$ или радиус-вектором $x=(x_i)$ с началом в начале координат r=0, движение которого с изменением длины x=|x| и направления α вектора порождает знаки любого вида и их последовательности (рис.2). Прямое произведение координат $T=X_1\times X_2\times ...\ X_n$ задает пространство значений координат $x=\{x_i\}$ (множество мест) в пространстве признаков $T\subset \mathbb{R}^n$. В информатике векторная модель (Vector Space Model) представлена векторами коллекции документов из общего векторного пространства термов для решения задач информационного поиска и семантической классификации текстов. Модель сопоставляет каждому документу частотный спектр слов $x=\{x_i\}$ и соответствующий радиус-вектор в лексическом пространстве; по сходству векторов определяются релевантные документы [32, 33]. Разрабатываются методы векторизации текстовых данных для создания современных разговорных агентов взаимодействия пользователей с компьютером на естественном языке [34].

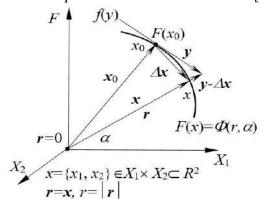


Рис. 2. Схема изображения линии $F(x) = \Phi(r, \alpha)$ в прямоугольных $x = (x_1, x_2) \in X_1 \times X_2$ и полярных (r, α) координатах движением вектора $x_0 \rightarrow x$. Линия f(y) - касательная к кривой F(x) в точке $F(x_0)$ (пояснения в тексте)

Направление и скорость движения вектора x задается разностью векторов начального x_0 и конечного x положения: $\Delta x = x - x_0$. При $\Delta x \to 0$ вектор Δx приближается к касательному вектору y, описывающему одномоментный процесс начертания. Таким образом, порядок изображения знака задает вектор y действия (силы), т.е. за каждым знаком стоит векторное поле размещения точек, огибающая которых F(x) воспринимается как знак или система знаков.

В общем случае вычерчиваемые вектором линии или поверхности F(x) – это многоместный предикат, предложение как функция входящих в него переменных $x = \{x_i\}$, семиотическая модель реальности. В локальных координатах $y = \{y_i\}$, $y_i = x_i - x_{0i}$ в разных точках касания $[x_0, F(x_0)]$ функция F(x) удовлетворяет универсальному уравнению касательной [29] (см. рис. 2)

$$f(y) = \sum_{i=1}^{n} a_i y_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i, a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i}, f(y) = F(x) - F(x_0),$$

$$\tag{1}$$

где $a=\{a_i\}$ — переменные компоненты ковектора градиента функции поверхности F(x), определяющие условный вес (цену) относительных признаков $y=\{y_i\}$ и направление движения тангенциального вектора y производства знака. Функция $F(x_0)$ рассматривается как входная характеристика (терминал) системы связи $F(x)=F(x_0)+f(y)$, например, начальная позиция изображения (состояние), входной сигнал для преобразования, среда реализации семиотического или иного конструктивного процесса. Парное сравнение $a_{ij}=a_i/a_j$ соответствует норме замещения одной величины y_i на другую y_j при условии, что функция f(y) не изменится. Функция f(y) выполняет роль метрической оценочной функции, в частности, равна среднему значению произведений a_iy_i :

$$f(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} a_i y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i = v, v_i = v = const$$

В теории механизмов [2] рассматривается линейная схема многоступенчатых зубчатых передач. Несколько n сцепленных зубчатых колеса радиуса y_i передают усилия, вращаясь с угловой скоростью (частотой вращения) a_i каждый. В данном случае соотношение $a_{ij} = a_i/a_j$ означает передаточное отношение соседней или удаленной пары колес. Для обеспечения синхронности движения линейная скорость точек окружности колеса $v_i = a_i y_i$ должна быть постоянной $v_i = v$. Отсюда среднее значение f(y) = v не должно изменяться, а передаточное значение a_{ij} соответствовать норме замещения колес в механизме для получения неизменного эффекта. Аналогично буквы и слова в тексте выстраиваются в линейную схему, встречаются с частотой (вероятностью) a_i и следуют друг за другом с переходной вероятностью a_{ij} (нормой замещения). Величина y_i характеризует i-й знак, например, положением буквы на клавиатуре или слова в словаре так, чтобы в идеальном случае оценка текста f(y) была постоянной, чтобы знаки рациональным образом «цеплялись» друг за друга (см. рис. 1б).

Решения уравнения (1) соответствует бесконечному множеству знаков со свойствами симметрии, сохраняющей связи типа (1). Согласно (1) знаки-символы определяются масштабом проявления tf(y)=f(ty) признаков, симметричны относительно аффинного смещения, растяжения, вращения, благодаря чему всякий знак может быть видоизменен без утраты формы и узнаваемости.

На рис. 3 представлены кривые разных функций (финслеровых метрик) решения уравнения (1): а) евклидовое расстояние; б) производственная степенная; в) линейная функции:

a)
$$f(y) = \pm \sqrt{y_1^2 + y_2^2}$$
; 6) $f(y) = cy_1^{\alpha_1} y_2^{\alpha_2}$; B) $f(y) = \beta_1 y_1 + \beta_2 y_2$, (2)

где α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , c – константы интегрирования (1). Линии соответствуют сечениям (слоениям) функций f(y)=const на разных уровнях и выглядят как изолинии типа изогипс высот рельефа. Наглядно прослеживаются центральная и осевая симметрия знаков. Просто формулы знаков записываются в полярных координатах (r, α) , например, для (2a) $r(\alpha)$ =const, для (2b) - α = const. Сложный знак «полярной розы» задается формулой $r(\alpha)$ = $c\sin(4\alpha)$. Спираль $r(\alpha)$ = $c\alpha$ определяет линейный порядок, например, «напечатанный» 45 различными знаками Фестского диска.

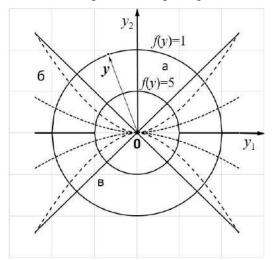


Рис. 3. Кривые изображения символов согласно уравнению (1) вектором y в прямоугольной системе локальных координат $y=(y_1,y_2)$ по формулам (2-а,б, в). Показана сетка координат признакового пространства

В технической науке важную роль играют аналогичные теоретические схемы (фигуры, конфигурации), выражающие графически своеобразный «внутренний скелет» объектов теории и ориентированные на применение математического аппарата или проведение мысленного эксперимента для моделирования и проектирования возможных ситуаций. Они отражают семиотическое видение мира под определённым углом зрения (срезом, слоем) данной теории и служат средствами для идеализированного представления объектов для выработки технических решений [35]. Такие схемы-чертежи (рис. 3), в частности, изображают

способы соединения двух звеньев механизмов (композиции) в кинематическую пару передачи усилий – определяют «семантические» условия связи в каждой паре [36].

Для дальнейшей формализации подобных представлений применяются понятия и соотношения дифференциальной геометрии, в частности, теории расслоения на многообразиях. Многообразия $M\sim F(x)$ — это рельефные поверхности, которые локально сходны с эвклидовым линейным пространством (см. рис. 2), т.е. в достаточно широкой окрестности Δx точки касания x_0 в касательной плоскости f(y) и на многообразии F(x) действуют одни и те же законы, благодаря чему свойства многообразия однозначно передаются множеством касательных плоскостей, как это получается при топографическом картографировании земной поверхности: поверхность сферы превращается в атлас карт. Подобные модельные представления составляют основу МТ-мышления [11].

Расслоением $s=(X,\pi,B)$ называется отображение π пространства X на пространство B: $\pi:X\to B$. Пространство X называется пространством (множеством, объектом) расслоения, а B - базой расслоения, состоящей из набора элементов b_i этой базы. Обратное отображение $\sigma=\pi^{-1}$ такое, что $\sigma:B\to X$ сечет пространство X и превращает его в расслоенное векторное пространство $Y=\{Y_j\}$ независимых слоев Y_j . Для любого элемента базы расслоения $B=\{b_j\}$ прообраз $Y_j=\sigma(b_j)$ называется слоем расслоения σ над элементом $b_j\in B$. Тривиальным расслоением называется расслоенное пространство, которое может быть представлено прямым произведением $Y\times B$, т.е. как система слоев Y_j , организуемых на базе элементов B. Отображение $Y\times B\to B$ есть сечение $Y_j=\sigma(b_j)$, что выделяет из множества Y слой Y_j . Всякая система $S=V\times U$ может рассматриваться как своего рода расслоение объектов и явлений по разным основаниям на элементы V и их связи U. Чтение текста или карты есть их расслоение на соответствующих базах.

Расслоение разбивает множество на непересекающиеся подмножества Y_j , каждый из которых связан с конкретным элементом базы расслоения b_j , причем считается $b_j \in Y_j$. Непересекающиеся части слоев, связанные с b_j , составляют ядро слоя. Расслоение (стратификация, дифференциация) напоминает процедуры типизации и классификации объектов по элементам базы (образцам). Основными видами классификации языков являются генетическая, типологическая, географическая (ареальная), социальная, стилистическая, основанные на различных принципах. Каждому слою соответствует локальная система координат (СК) разного вида, в которой формируются и используются знаки. Примером являются конфигурации знаков дорожного движения: прямоугольные информационные и сервисные (прямоугольная СК); круглые запрещающие и предписывающие (полярная СК); треугольные предупреждающие (барицентрическая СК). Получается, что не только изменение формы знака, но и преобразование системы координат имеет значение в семиотическом моделировании.

Иллюстрацией пространства расслоения *X* является текст, который расслаивается на разных базах типа алфавита (по буквам) или словаря (по словам). Расслоенными пространствами в данном случаем будет множество результатов идентификации одинаковых букв разных положений или группы слов, близких в некотором отношении, например, множество лексем, объединяющих разные словоформы одного слова. Т. Фитч [37, с.1], ссылаясь на известную притчу, уподобляет лингвистов людям, которые в темном сарае ощупывают разные части тела слона и выносят отличающиеся суждения, что локально (послойно) обрисовывают животное, а для получения целостного представления необходима интеграция частных взглядов.

Наглядной реализаций методологии расслоения можно считать интегральную метатеорию К. Уилбера, состоящую из парадигматической и мета-парадигматической частей и формально выраженную в виде схем языка перспектив [38]. Утверждается, что все существующее можно представить в виде «холонов», аналогов слоев – целых, частей других целых, активных единиц с разными тенденциями развития, обладающих эмерджентными качествами, которые

нельзя вывести из свойств элементов, на основе которых возникают холоны подобно тому, как слова формируются из букв, тексты из слов, ткани из клеток, органы из тканей и т.д.

В технической теории выделяются несколько теоретических слоёв, ориентированных на различные реализации технической системы, и заданы правила соответствия функциональных, поточных и структурных схем-слоев, их эквивалентные преобразования друг в друга, а также правила преобразования абстрактных объектов в рамках каждого такого слоя теоретических схем [35].

Гладкие многообразия M являются базой касательных расслоений $\pi: X \to M$ с формированием на точках $b_i \sim x_{0i} = \{x_{0ii}\}$, $x_{0i} \in M$ расслоенного пространства $TM = \{TM_i\} \subset X$, состоящего из касательных плоскостей TM_i , среди которых выделяется типовой слой TM_0 сравнения [39]. Размерность расслоенного пространства TM из n координат $x=\{x_i\}$ (i=1,2,...,n) равна удвоенной размерности пространства многообразия M с увеличенной степенью свободы 2n представления знаний $TM=TM_0\times M$. Расслоение-произведение $TM_0\times M\to M$ на многообразии M выделяет множество слоев $TM = \{TM_i\} \subset X$, касательных в точках $x_{0i} \in M$. Поскольку точка x_{0i} принадлежит также конкретному слою $x_{0i} \in TM_i$, она индивидуализирует этот слой и формирует систему локальных координат $y = \{y_i\}$ создания конфигурации f(y) согласно универсальному уравнению (1). В этом смысле все функции f(y), удовлетворяющие (1), эквивалентны (слои функционально тождественны). Декартовое произведение $TM_0 \times M$ формально означает приложение сходных законов TM_0 к многообразию M различных ситуаций x_{0i} . В силу этого существует отображение слоев $TM_i \rightarrow TM_k$, позволяющих заменять слой на слой, как слова в предложении, – перемещать слои $x_{0i} \to x_{0k}$ по многообразию M, функционально связывать разные слои $TM_i \leftrightarrow TM_k$ в последовательности линейных композиций-комплексов (коммуникаций), начиная с типового слоя $TM_0 \leftrightarrow TM_1$. Этим обеспечивается системная интеграция слоев, когда расслоенное пространство в точности «есть единство во множестве» по А.Гумбольдту.

Другая иллюстрация — движение фигуры по шахматной доске из клетки в клетку, начиная с исходной позиции TM_0 с сохранением или изменением силы и ценности фигуры f(y) в зависимости от общей композиции относительно центрального положения $x_{0j} \in TM_j$. Все слои разные, но в глубинном смысле это одно и то же (тождество противоположностей). По Н.Хомскому [25] всякая грамматика определяется конечными множествами начальных цепочек TM_j знаков Σ и «формул-команд» Γ вида $TM_j \to TM_k$, означающих «подставить TM_k вместо TM_j », «заменить TM_j на TM_k ». Грамматикой (Γ , Γ) определяется деривация — конечная последовательность $TM_0 \to ... \to TM_j \to ... \to TM_k$, начиная с исходного TM_0 , определяемая формулами Γ . В итоге порождаются грамматически правильные последовательности морфем конкретного языка. Это напоминает алгоритмическую работу машины Тьюринга.

Посредством расслоения пространства X на точках многообразия $M \subset X$ формируется расслоенное пространство $TM = TM_0 \times M$ и как членение базового пространства $TM \subset X$, или как самостоятельное 2n-мерное пространство $TM = TM_0 \times M \to M$ различающихся слоев, гомотопически организованных многообразием M. Получается, что в случае локального сходства M и TM пространства X, M, TM подобны, что позволяет использовать их свойства для исследования и понимания особенностей иных пространств: $TM \to M$ (послойный анализ), $TM \to X$ (послойный синтез), $TM \to TM$ (деривация, комплексирование, сравнение). Для тонкого исследования проблемы применяется логика векторного анализа и уравнения связи переменных f(y) в локальных координатах $y = x - x_0$. Функция f(y) имеет смысл различных мер расстояния между точками x и x_0 , что удобно использовать для сравнения явлений и оценки изменений. Это позволяет перейти на более высокий MT-уровень обобщения знаний.

3. Метатеоретическое описание. Осуществляется МТ-переход от векторной суммы $x=x_0+y$ к сумме $X=X_0+Y$ или произведению $X=Y\times X_0$ произвольного содержания (рис.4), удовлетворяющих свойствам теории групп G отображения множеств в себя $G:X\times X\to X$, как в справедливом суждении Ф.Соссюра [12]: единственным и истинным объектом лингвистики в собственном смысле является язык, рассматриваемый в самом себе и для себя. Каждая деталь (X,Y,X_0) в подобных тройственных композициях (триплетах, трихотомиях) имеет определенный философский и математический смысл.

Согласно Пирсу [40], трихотомия - это искусство трехкратного деления. По его мнению, образовать тройку путем модификации пары без формального введения иного элемента невозможно, в то время как из триады всегда можно собрать более сложное образование из четырех и более элементов (см. рис.1). Он использовал триаду в своей семиотической модели из объекта X, знака Y, обозначающего объект, и интерпретанта X_0 .

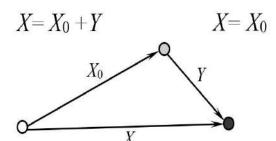


Рис. 4. Схема векторного изображения треугольных коммутативных связей $X=X_0+Y$ терминалов X_0 , слоев Y и явлений X в MT-анализе

Категория Y имеет смысл сравнения-изменения $Y=X-X_0$, $X=Y\times X_0\to X_0$, т.е. того, что надо добавить, убрать или заменить, чтобы перейти к новому качеству $X_0\to X$. Например, при смене словоформ (метаграмм) man \to men изменения определяются замещением а \to е, когда Y=е-а. Ю.А.Шрейдер [26] приводит образный пример, как в результате применения такого отношения можно получить из "мухи" "слона", т.е. через цепочку превращений, меняя на каждом шаге одну букву и получая значимые по смыслу слова, превратить слово "муха" в слово "слон", демонстрируя при этом линии отношений рефлексивности, симметричности и транзитивности преобразований, связанных с оборачиванием и объединением стрелок в рядах (см. рис. 1 и 4).

Сумма $X=X_0+Y$ обычно применяется при формулировке единичных, интенсиональных связей явлений, произведение $X=Y\times X_0$ — при множественных, экстенсиональных связей понятий; отображение $X=Y\times X_0\to X_0$ определяет переход от общей формулировки к индивидуальному вектору или слою Y с $x_0\in X_0$, $x_0\in Y$. Под символом X_0 понимается соответственно либо опорная точка $x_0\in X_0$ (терминал) касания слоем Y многообразия, либо само многообразие. Содержательный смысл соотношений в МТ-анализе воспроизводится в соответствии с решаемой системной задачей. Стрелка в схеме-графе помечена символом (рис. 4), который соответствует вектору, началу вектора или его концу (вершине графа).

Бинарная оппозиция X и X_0 недостаточна для МТ-анализа, и всегда необходим третий элемент Y, замыкающий объяснение связей. Классическая оппозиция Соссюра - Означаемое, или Обозначаемое (объект, денотат) и Означающее, или Обозначающее (знак) — выражает способность языкового знака Y выступать в качестве неполного заменителя обозначаемого X. Полнота связей обеспечивается введением в схему концепта, который содержит информацию о возможных детонатах, определяет место в некоторой знаковой системе. Треугольник Фреге выражает отношение знака $Y = X - X_0$ к своему концепту X_0 и денотату $X = X_0 + Y$, в частности, связь слова Y, понятия X_0 и обозначаемой вещи X. Аналогично естественный язык складывается из понятий искусственного X_0 и системообразующего формального языка Y (чистой формы $Y = X - X_0$).

Треугольно-триадная организация информационно-теоретических основ характерна для семиотики [6]. Обобщенная трактовка вектора-стрелки в процедурах МТ-расслоения позволяет понять причины триадичности известных семиотических соотношений, допускающих широкую интерпретацию. Например, в работе В.Матезиуса [41] противопоставляются «актуальное» и «формальное» членение предложения. Первое выясняет способ включения предложения X в контекст X_0 , второе — разлагает предложение на формальные грамматические единицы. Для включения предложения в контекст в нем по ситуации выделяется «исходная точка» (тема) X_0 , известная читающему, и «ядро высказывания» (рема) с новой информацией Y предложения. В географической интерпретации геокомплекс $X=X_0+Y$ складывается из изменчивой части Y и инварианта X_0 , знаменующего географическую среду, от особенностей которой зависят свойства местного геокомплекса X. Также типовые технические схемы Y должны быть скорректированы в соответствии с различными инженерными, социальными, экологическими и иными требованиями, что делает необходимым ввести новые элементы X_0 в состав схем, которые рассматриваются как коннотации (дополнительные сопутствующие признаки) этих схем и как ограничения их конкретной реализации.

Необходимость учета X_0 в МТ-анализе называется средовой относительностью. В познавательном смысле $Y=X-X_0$ характеризует чистое знание об объектах природы. Разница $X_0=X-Y$ на карте X при исключении тематического слоя Y соответствует картографической основе X_0 (сети координатных и рельефных линий). В картографическом процессе или литературном творчестве функция Y интерпретируется как раскрытие темы, введение в текст нового содержания. Позицию X_0 Й.Бар-Хиллел [42] называет "общими предварительными данными (фоном) информации", которая остается за пределами естественного языка X и поэтому не подлежит переводу на логический язык Y исчисления высказываний или предикатов. В таких случаях лингвисты говорят о внеязыковом контексте, который корректирует по содержанию, позволяет понять фразу Y.

Перечисленные зависимости могут быть осмыслены в терминах аналитической философии, восходящей к трансцендентальной (ТЦ) аргументации И.Канта [43, 44]. ТЦ-аналитика предназначена для вычленения первичных теоретических понятий интеллектуальной системы чистого разума $Y=X-X_0$ исключением из наблюдаемого феномена X ТЦ-аргументов (ноумена) X_0 – исследование знаний, которые имеют источник в самом рассудке (априорных структурах рассудка, формах проявления законов). Ноумен X_0 – скрытая сущность явления, постигаемая в процессе его глубокого осмысления, синтеза многообразия знаний, ТЦ-условия действия законов чистого знания. У Ф. де Соссюра речевая деятельность есть синтез собственно языка и речи – индивидуального явления. Язык выступает как «система чисто лингвистических отношений», и только он должен изучаться языковедами. Чистое знание Y в семиотической предметной области моделирования проявляется в форме теории знаковых систем.

4. Аксиомы моделирования семиотического комплекса. Исходим из полисистемной трактовки объекта, когда содержание любого объекта считается многосторонним и системно исследуется по отдельности соответствующими теоретическими средствами [28], в частности, рассматривается как система знаков, чем отличается от незнаковых, например, политических систем деятельности [7]. Теоретический уровень научно-технического знания включает три основные слоя теоретических схем: функциональные, поточные и структурные [35].

Функциональные модели отражают функции элементов — специальную роль или операцию, что они выполняют в технической системе в целом для достижения общей цели. Реализации такой схемы зависит от свойств каждого из функциональных элементов. С помощью функциональной схемы строится алгоритм функционирования системы и задается её конфигурация (внутренняя структура). Поточные схемы отражают физические процессы преобразования продукции от одной стадии технологического цикла к другой подобно тому, как это происходит в

природе при реализации динамических процессов сезонного развития или формирования стока, когда объект под воздействием внешних сил (операций) переходит от одной стадии существования к другой (смена состояний). Ведущая в технической теории структурная, или конструктивная схема технической системы описывает соединение деталей, единиц оборудования и др. в технические комплексы разного масштаба. Структурная схема фиксирует конструктивное расположение элементов и связи (структуру комплекса) данного типа технической системы. Такие схемы являются результатом идеализации технической системы; для элементов идеализированных структурных теоретических схем вводятся специальные условные изображения (знаки, символы) [35].

Объекты технической теории являются «однородными» в том смысле, что собраны из некоторого фиксированного набора блоков (алфавита) по определённым правилам «сборки», как это делается при наборе текста. Ф. Рело [см. 35] разработал техническую теорию, которая объясняет принципы создания новых механизмов, в основе которых лежит представление о кинематической паре. Несколько пар образуют звено, несколько звеньев — кинематическую цепь механизма принуждённого движения. В итоге все механизмы оказываются собранными из одного и того же набора типовых элементов, и необходимо задать лишь определённый способ их соединения из идеальных цепей, звеньев и пар элементов, что соответствуют знаковым конструктивным элементам реальных технических комплексов.

Знаковость становится сквозным фундаментальным качеством каждого объекта, когда все в мире подлежит семиотизации [45]. Системная теория знаков должна учитывать особенности изучения и использования любых объектов реальности как знаков - средств изображения и сигнализации: текстом может быть все, что угодно [3]. Например, геотехнические системы (дороги, мосты, плотины гидроэлектростанций, линии электропередач, производственные здания и промышленные комплексы). При движении в гору окружающие пейзажи постепенно меняются и считываются как текст, что отражается в ландшафтных описаниях и базах данных.

В МТ-триаде (X_0 , Y, X) (рис. 4) позиция Y символизирует очищенное от частностей теоретическое знание, которое МТ-интерпретируется в конкретной среде X_0 ($X=Y+X_0$) из многообразия возможных сред. Семиотика рассматривается Ч.Моррисом [46] как метанаука и инструмент научных исследований. Интертеория семиотики представляется как аксиоматическая дедуктивная система с исходными понятиями и предложениями, что позволяют делать выводы.

Формирование сквозной интертеории системы знаков основывается на интерпретации понятий типовой интертеории Y_0 (образца преставления знаний, эталона сравнения, языка-посредника) — общей теории систем (ОТС) [28]. Последовательности символов ОТС образуют аксиоматические формулы, которые интерпретируются в иные формулы с другой системной трактовкой. Аксиомы ОТС представлены следующей последовательностью знаков [28]:

1)
$$S \equiv C$$
, 2) $\Delta S \equiv C$, 3) $\Delta S_i \equiv D_i$. (3)

Символ \equiv в любой интерпретации соответствует отношению тождества \leftrightarrow (изоморфизма), символ S — универсальной системе (универсуму), объединяющей системы S_i разного рода, символ ΔS — универсальному изменению S, включающему все изменения ΔS_i , символ D — действию всех действий D_i систем S_i . Наконец, символ C означает качество объективного инвариантного существования, сохранения свойств при преобразованиях, например, истинности суждений в доказательствах. За это качество в традиционных культурах борются со временем — за неизменность текстов [3].

Первая аксиома ОТС (3) выражает онтологический закон объективного существования мира и равных ему по свойствам универсальных систем (слоев). Вторая аксиома постулирует наличие постоянного, ограниченного по величине послойного изменения универсальных систем. Третья аксиома тождественно связывает всякое изменение с порождающим его действием

(силой). При интерпретации символы аксиом ОТС заменяются на символы, например, интертеории знаковых систем, или их можно напрямую трактовать в семиотическом смысле.

Существующий мир знаков $S \equiv C$ включает полную систему (инвентарь, тезаурус, лексикон) знаков разной формы и происхождения как объективную реальность, сквозной системный аспект существования естественных, искусственных и формальных объектов действительности. Так, национальный корпус языка — совокупность основных неповторяющихся выражений. Для формирования основ МТ-анализа предлагается S трактовать как многоаспектную структуру расслоения — единства пространства расслоения, базы расслоения, расслоенного пространства и комплекса связности слоев-знаков (сложных символов, см. рис. 1 и 2). Универсум S включает все мыслимые и немыслимые знаки и их сочетания, но прежде всего универсальные знаки, соответствующие базе расслоения: многообразию коренных знаков и опорных точек касания слоями-знаками многообразий (см. рис. 3). Знаковые системы последовательно векторизуются или «печатаются» в признаковом пространстве.

По второй аксиоме (3) все новые знаки берутся из того же универсального ограниченного по мощности множества знаков $\Delta S \equiv C$, например, генеральной легенды атласа или клавиатуры пишущего устройства, предполагая существование разных вариантов картознаков и шрифтов в локальном слое элементарного знака (опорной точки изображения). Третья аксиома $\Delta S_i \equiv D_i$ связывает всякое изменение с порождающим его действием (силой) и в количественном выражении соответствует уравнению (1), в качественном – позиции Y (рис. 3). В языке этот постулат отражен в многочисленных пословицах – грамматически законченных предложениях, в которых в поучительной форме выражена народная мудрость, обращающая внимание на необходимость деятельности для получения результата.

Фундаментальное качество существования C сохраняется при разного рода преобразованиях. По мнению Γ . Фреге [47], оно является целью познания — для этики это постижение понятия «благо», для эстетики — понятия «красота», а для логики — понятия «истина». Содержания теорий отличаются по данным качествам (идеям), поэтому логика и эстетика не являются знаковыми теориями, но лишь похожи на теорию знаковых систем через интерпретацию понятий.

Основы семиотического моделирования интеллектуальных систем управления техническими комплексами в России заложены в работах Д. А. Поспелова и развито Г. С. Осиповым [18]. Состав семиотической модели напоминает схему (3) аксиом ОТС и представляет собой две пары $W = \langle S, \Delta S \rangle$ четверки множеств $S = \langle T, R, A, P \rangle$ и $\Delta S = \langle \Delta T, \Delta R, \Delta A, \Delta P \rangle$, где T множество элементарных символов, R – множество синтаксических правил, A – множество знаний о предметной области, P – множество прагматических правил вывода решений и ΔT , ΔR , ΔA , ΔP - правила изменения этих множеств. Тогда T – элементы, $T \times R$ - знаковые системы (язык системы), $T \times R \times A$ - их описания, $F = T \times R \times A \times P$ - их преобразования (функции, действия). Многоместный предикат (функция поверхности многообразия) F(x) соответствует описанию, а $f(y)=a\cdot y$ уравнения (1) — преобразованию $F(x_0)\to F(x)$ начальной $F(x_0)$ в конечную F(x) ситуацию. Для всех этих функций F допускаются изменения. Дж. Маккарти [48] для исчисления ситуаций предложил логический формализм для представления и рассуждения о динамических явлениях, основанный на понятиях, в данном случае выраженных в терминах расслоения: ситуация F(x) – логическая формула, что описывает полное моментальное состояние универсальной системы (многообразие); флюента $f(y) = f(x-x_0)$ – предикаты или функции, частный вид и значения которых изменяются от одной ситуации x_0 к другой; $f(y)=a\cdot y$ – переход $F(x_0)\to F(x)$ осуществляется с помощью специальной флюенты – оператором действия $a \cdot y$ с результатом изменения f(y). Полезно было бы эти соответствия связать с положениями метатеории исчисления ситуаций [49] для рассмотрения с общих позиций векторной логики (см. рис. 4).

В множество А в качестве подмножеств включаются параметры пространственновременной определенности данных H, так важных для географических исследований, и инвари-

антного качества I — аналога C в аксиоматике (3): $X \times H$ — пространственно-распределенные ξ и изменяющиеся во времени t данные $x(\xi,t)$ и $X \times I$ — линейно-упорядоченные по направлению I знания типа дорожных знаков, операций технологического процесса, частей конструкции механизма или машинописного текста. Отмечается [16], что к знаниям относятся законы и факты предметной области, не подверженные сомнениям и изменениям типа аксиом, игнорирующих пространственно-временную распределенность.

В теории знаковых систем идеальное качество относится к вопросам семиотической истинности как выражения правильного способа репрезентации объектов в форме знаков и текстов — закона морфологии знаков. Предполагается, что таким инвариантным качеством является сохранение линейного порядка C=I=[0,1] знаков: в текстах, на картах или технических схемах — их относительного положения в координатной системе признакового пространства независимо от выбора системы координат. Отображение вида $S \leftrightarrow$ I в понятиях У.Уилбера [50] соответствует формуле нахождения «адреса объекта», т.е. по существу, определяет «формулу существования объекта».

Для картографии математическая строгость соблюдения порядка взаимного размещения знаков в соответствии с реально существующим порядком территориальных объектов является абсолютным законом [51]. Это означает, что все знаки обладают проективными и гомотопическими свойствами $B \times A \to A \to [0,1]$, имеют начало и конец вектора направления D_i , дифференцируются на части B(A), складываются и перемножаются, развертываются в пространстве, расслаиваются на многообразии универсальных знаков, образуют цепи связности (комплексы), кодируются (гипер)действительным числом I из отрезка I=[0,1] [39]. Правильно сконструированный знак и система знаков имеют структуру $\Delta S \times S \leftrightarrow \Delta S \leftrightarrow \Delta$

1)
$$S \leftrightarrow I$$
; 2) $\Delta S \leftrightarrow I$; 3) $\Delta S_i \leftrightarrow D_i$. (4)

Например, речная сеть $\Delta S \times S$ на карте состоит из линии $S \leftrightarrow I$ основного русла и линий $\Delta S \leftrightarrow I$ притоков первого порядка, упорядоченных $\Delta S \leftrightarrow S$ вдоль основного русла по их устьевому местоположению S — относительному расстоянию от истока I=[0,1] (I=0 — исток, I=1 — устье главного водотока). Расслоение речной сети $\Delta S \times S \leftrightarrow S$ на линии притоков ΔS осуществляется на базе расслоения S в точках касания $S_0 \in S$ (в местах впадения притоков). По аналогии строится синтаксическая структура предложения (рис.1), с выделением глубинно-синтаксического «русла» и поверхностных «притоков» слов, или механическая система из совокупности неподвижных и подвижных звеньев [36].

Независимо построенная аксиоматика (4), отражающая основные понятия и правила семиотики, оказалась по форме и содержанию сходна с теорией географических комплексов и технических конструкций, где системы слагаются из элементов, их конфигураций и комбинаций; перевод конфигураций в композицию комплекса выражает форму сравнения (подобия) конфигураций безотносительно к их пространственно-временной определенности [28]. Общая теория географических комплексов не содержит понятия пространства и времени, что подчеркивает специфику географического знания как учения о комплексах, а их порядок связывается только с их адресным положением на множестве индексов І=[0,1]. Идеи комплексирования также иллюстрируются линейно упорядоченным движением и вращением физических тел. По формальным признакам общая теория комплексов восходит к метанаучным, математическим положениям алгебраических систем - объекту, состоящему из трёх множеств: непустого множества элементов A, множества алгебраических операций $A \times A \times ... \times A \rightarrow A$ и множества отношений $A \rightarrow ... \rightarrow A \rightarrow A$, в частности отношений порядка, особенности которого задаются эталоном сравнения I=[0,1]. Интертеория комплексов является классом алгебраических систем, что удовлетворяют некоторой системе аксиом (4). Семиотика – подкласс теории комплексов с частным слоем универсума из знаковых систем, лингвистика - подкласс семиотики текстов разных теорий языка, что не относятся к МТ-уровню познания и не касаются МТ-проблем контекстного определения значений символов.

Заключение. Семиотические лингвистические знания содержат многочисленные примеры для иллюстрации методов МТ-моделирования, направленного на формирование базовых принципов и уравнений тематического анализа научной информации средствами дифференциальной геометрии с использованием арсенала математической науки. Универсальное уравнение (1) в разной тематической интерпретации позволяет сравнивать различные объекты и явления между собой и использовать его в качестве аппарата количественных и качественных исследований. Частная задача — дать трактовку полученным формулам в терминах знаковых систем для объяснения их выявленных свойств. Интертеория семиотики создается как самостоятельное сквозное направление теории сложных систем — комплексов, изучающей свойства линейного порядка в форме чистого знания о законах, абстрагированных от средового окружения. Выявленные языковые законы требуют МТ-интерпретации знаковых систем с учетом особенностей культурной среды (контекста) их проявления как многообразия условий речевой и иной деятельности. Следует различать теоретический уровень семиотического моделирования комплексов-текстов и МТ-анализ, который позволяет объяснить закономерности, не учтенные в теории чистого знания о сложных системах.

Используя процедуры векторизации и их обобщения для формирования рядов знаков, производятся знаковые системы разной сложности. Простые знаки (конфигурации) изображаются в локальных признаковых координатах каждого слоя по схеме трассировки радиусвекторами в направлении касательных векторов действия. Знаковые изменения происходят средствами геометрических преобразований в разных системах координат с сохранением узнаваемости. Эти свойства простых знаков распространяются на свойства знаковых систем и иные семиотические модели реальности (конструкции).

В аксиомах семиотики постулируется существование разных эквивалентных форм зна-ковых систем расслоения с линейно-упорядоченной структурой: признакового пространства расслоения, базы расслоения, расслоенного векторного пространства и комплекса связности слоев-знаков (композиции сложных символов). Через МТ-знание технологически вводятся в науку математические истины. В аспекте расслоения, основой конструктивной организации текста являются свойства членимости, подобия и системной связности. МТ-подход — более высокий уровень научного познания, чем теоретический, качественно обобщающий модели и методы векторизации, и с этих позиций он выступает как вспомогательное средство конкретного описания знаковых систем. Особенно важна триадическая форма организация МТ-знаний, позволяющая считать означаемый объект суммой предмета (концепта) исследования и означающих знаков, что логически связывается с философской моделью трансцедентальной аргументации.

Структуры порядка моделируются единичным отрезком [0,1], что позволяет перенести известные свойства (гипер)действительных чисел на сложные знаковые системы (комплексы) семиотики и лингвистики и представить научные тексты естественного языка в терминах формального метаязыка преобразований и отношений алгебраических систем. В широком смысле знаками является все то, что воспроизводит и сохраняет линейный порядок, т.е. ограничено, индексировано, фрактально-иерархически организовано, гомотопически подобно и т.д.

МТ-концепция объединяет разные схемы представления и анализа данных и знаний и позволит создавать типовые модели в науке и технике, проводить конкретные проектные расчеты. Она дает возможность с единых позиций рассматривать результаты разных направлений семиотического моделирования для дополнения знаний различных областей исследования и конструирования механизмов или культурных ландшафтов в виде «текстов» со своеобразным внешним проявлением и внутренней структурой. Прослеживается полезная аналогия между естественным и картографическим языком, семиотическими, географическими и техническими

схемами и конструкциями. Векторная триадная информационная методология расслоения на многообразиях объединяет математику, философию и практику семиотического моделирования и может служить МТ-основой для дальнейших системных исследований в разных науках.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: AAAA-A21-121012190056-4).

Список источников

- 1. Кошелев А. Д. Современная теоретическая лингвистика как Вавилонская башня (о "мирном" сосуществовании множества несовместимых теорий языка) / А. Д. Кошелев // Известия РАН. Серия литературы и языка, 2013. Т. 72. № 6. С. 3–22.
- 2. Зверев Г.Н. Теоретическая информатика и ее основания / Г.Н. Зверев. М.: Физматлит, 2007. Т.1. 592 с.
- 3. Мамардашвили М.К. Символ и сознание. Метафизические рассуждения о сознании, символике и языке / М.К. Мамардашвили, А.М. Пятигорский. М.: Школа "Языки русской культуры", 1997. 224 с.
- 4. Тимофеева М.К. Язык с позиций философии, психологии, математики / М.К. Тимофеева. М.: ФЛИН-ТА. 2013. –176 с.
- 5. Kempson R., Fernando T., Asher N Philosophy of linguistics. Amsterdam, London, New York: Elsevier, 2012, 574 p.
- 6. Trifonas P.P. International Handbook of Semiotics. London, New York: Springer, 2015, 1325 p.
- 7. Черкашин А.К. Метатеоретические модели политической науки об устойчивом развитии в концепции расслоенных пространств деятельности / А.К. Черкашин // Известия Иркутского государственного университета. Серия Политология. Религиоведение, 2018. Т. 25. С. 5–23.
- 8. Черкашин А.К. Метатеоретическое моделирование правовых норм и отношений / А.К. Черкашин // Мониторинг правоприменения, 2020. №3 (36). С. 59-69.
- 9. Шокин Ю.И. Математическое моделирование и информационные технологии в Сибирском отделении РАН. Традиции и современность / Ю.И. Шокин, Л.Б. Чубаров // Вычислительные технологии, 2007. № 3(12). С. 8-23.
- 10. Лютый А.А. Язык карты: сущность, система, функции / А.А. Лютый. М.: ИГ АН СССР, 1988. 292 с.
- 11. Черкашин А.К. Геокартографическое мышление в современной науке / А.К. Черкашин // Геодезия и картография, 2020. №7. С. 27-36.
- 12. Соссюр Ф. Труды по языкознанию / Ф. Соссюр. М.: Прогресс, 1977. 695 с.
- 13. Ляшенко Д.Н. Семиотическое моделирование реальности / Д.Н. Ляшенко. Одесса: Печатный дом, 2015. 168 с
- 14. Повилейко Р.П. Архитектура машины. Художественное конструирование. Проблемы и практика / Р.П. Повилейко. Новосибирск: Западно-Сибирское кн. из-во, 1974. 143 с.
- 15. Массель Л. В. Ситуационное исчисление как развитие семиотического подхода к построению интеллектуальной системы поддержки принятия решений / Л. В. Массель, В. Р. Кузьмин // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии, 2017. Т. 15. № 4. С. 43–52.
- 16. Осипов Г. С. От ситуационного управления к прикладной семиотике / Г. С. Осипов // Новости искусственного интеллекта, 2002. № 6 (54). С. 2–12.
- 17. Кузнецов В.Г. Словарь философских терминов / В.Г. Кузнецов. М.: ИНФРА-М, 2005. 731 с.
- 18. Humboldt W. On Language: On the diversity of human language construction and its influence on the mental development of the human species. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 342 p.
- 19. Гумбольдт А. Космос. Опыт физического мироописания / А. Гумбольдт. М.: Тип. А. Семена, 1862-1863. Ч.1. 410 с.
- 20. Крушевский Н.В. Предмет, деление и метод науки о языке / Н.В. Крушевский //Хрестоматия по истории русского языкознания. М.: Высшая школа, 1973. С. 412-417.
- 21. Husserl E. Cartesian Meditations: An Introduction to Phenomenology. Springer, 2012, 174 p.
- 22. Арнольд И.В. Основы научных исследований в лингвистике / И.В. Арнольд. М.: Высш. шк., 1991. 140
- 23. Anderson M., Merrell F. On Semiotic Modeling. Berlin, New York, Mouton de Gruyter, 1991, 632 p.
- 24. Kiryushchenko V. Maps, diagrams, and signs: visual experience in Peirce's semiotics. International Handbook of Semiotics, P.P.Trifonas. London, New York, Springer, 2015, pp. 115-123.
- 25. Хомский Н. Синтаксические структуры / Н. Хомский // Новое в лингвистике. Вып. 2. М., 1962. C.412–527.

- 26. Шрейдер Ю. А. Равенство, сходство, порядок / Ю. А. Шрейдер М.: Наука, 1971. 254 с.
- 27. Firth J.R. Papers in linguistics, 1934-1951. London, Oxford university Press, 1958, 233 p.
- 28. Cherkashin A. K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society. Mathematical modelling of natural phenomena, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 4–20.
- 29. Bull W. E. Time, Tense and the Verb: A Study in Theoretical and Applied Linguistics with Particular Reference to Spanish, University of California Press, 1971, 120 p.
- 30. Гийом Г. Принципы теоретической лингвистики. М.: Прогресс, 1992. 224 с.
- 31. Guillaume G. Foundations for a science of language. Series IV, Current Issues in Linguistic Theory, vol. 31, Amsterdam, John Benjamins, 1984, xxiv+175 p.
- 32. Deerwester S., Dumais S.T., Furnas G.W., Landauer T.K., Harshman R. Indexing by latent semantic analysis . Journal of the American society for Information Science, September, 1990, pp. 391-407.
- 33. Salton G., Allan J., Buckley C. Automatic structuring and retrieval of large text files. Electronic publishing, 1992, vol. 5, no.1. pp. 1–17.
- 34. Жеребцова Ю. А. Сравнение моделей векторного представления текстов в задаче создания чат-бота / Ю. А. Жеребцова, А. В. Чижик // Вестник НГУ. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация, 2020. Т. 18. № 3. С. 16–34.
- 35. Стёпин В. С. Философия науки и техники / В. С. Стёпин, В. Г. Горохов, М. А. Розов. М.: Гардарика, 1999.-400 с.
- 36. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
- 37. Fitch W.T. The Evolution of Language. N.Y.: Cambridge University Press, 2010, 611 p.
- 38. Уилбер К. Интегральная психология: сознание, дух, психология, терапия / К. Уилбер. М.: ООО АСТ и др., 2004. 412 с.
- 39. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. № 2 (14). С. 69-87.
- 40. Peirce C.S. The essential Peirce. N. Houser & C. Kloesel, vol. 1, Bloomington: Indiana University Press, 1992, 448 p.
- 41. Матезиус В. О так называемом актуальном членении предложения / В. О. Матезиус // Пражский лингвистический кружок. М.: Прогресс, 1967. С.239-245.
- 42. Bar-Hillel Y. Language and information: Selected essays on their theory and application // Foundations of Language. 1966, vol. 2, no.2, pp. 192-199.
- 43. Bieri P., Krüger L., Horstmann R.-P. Transcendental arguments and science: essays in epistemology. Dordrecht, Boston, London, Springer, 1979, 334 p.
- 44. Stern, R. Transcendental Arguments: Problems and Prospects. Oxford, Oxford University Press, 2000, 344 p.
- 45. Лотман Ю.М. Динамическая модель семиотической системы / Ю.М. Лотман // Избранные статьи в трех томах. Т.1. Статьи по семиотике и топологии культуры. Таллин: Из-во «Александра», 1992. –UML: http://yanko.lib.ru/books/cultur/lotman-selection.htm# _Toc509600928 (дата обращения 18.04.2020).
- 46. Моррис Ч.У. Основания теории знаков / Ч.У. Моррис // Семиотика: Антология. М.: Академический проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2001. С. 45–95. –UML: https://www.google.ru/url
- 47. Фреге Г. Логико-философские труды / Г. Фреге. Новосибирск: Сиб. универс. изд-во, 2008. –283 с.
- 48. McCarthy J. Situations, actions and causal laws. Technical Report Memo 2, Stanford, Stanford University Artificial Intelligence Laboratory, CA, 1963, pp. 1-11.
- 49. Pirri F., Reiter R. Some contributions to the metatheory of the Situation Calculus . Journal of the ACM, 1999, vol. 46, no 3. pp. 325–361.
- 50. Wilber K. Integral post-metaphysics. Integral spirituality: A startling new role for religion in the modern and postmodern world. Boston&London, Integral Books, 2007, pp. 231-274.
- 51. Асланикашвили А.Ф. Метакартография: Основные проблемы / А.Ф. Асланикашвили. –Тбилиси: Мецниереба, 1974. 125 с.

Черкашин Александр Константинович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической географии Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, ORCID 0000-0002-7596-7780, WoS K-2418-2017, РИНЦ 58425, akcherk@irnok.net ,664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1.

UDC 003:81-13:51-7

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.001

Metatheoretical semiotic modeling in science and technology Aleksander K. Cherkashin

V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, Russia, Irkutsk, *akcherk@irnok.net*

Abstract. Mathematical models of the intertheory of sign systems are developed in terms of the vector fiber bundle (stratification) of feature spaces of differential geometry as part of the general complexes theory, using philosophical and system-semiotic representations of linguistic knowledge. The manifestation of metatheoretic (MT) laws from the equations of the individual signs formation to the analysis and synthesis of scientific texts and system theories is investigated. The universal equation proposed allows us to compare various objects and phenomena and use it as a device for quantitative and qualitative analysis. For each kind of sign and non-sign systems, specific conceptual and terminological base is created and a set of axioms of the connection of concepts is determined, i.e. a special system intertheory is formed. The semiotic intertheory studies the properties of linear order in the form of pure knowledge on laws abstracted from the contextual environment. The axioms of semiotics postulate the existence of different forms of sign systems of fiber bundles with a linearly ordered structure: the feature space for fibration, the base of fiber bundle, the vector space of bundle with fiber, and the connectedness of signs (symbols complex). Using the vectorization procedures and their generalization to a signs series, sign systems of different complexity are produced. An analogy of the text structure with cartographic and technical reality constructions is made. Sign changes occur with geometric transformations in various coordinate systems with the preservation of recognition capacity. The properties of simple signs extend to the properties of sign systems and MT-models of geographical and technical reality. The triadic form of the organization of MTknowledge allows us to consider the signified object as the sum of the subject (concept) of research and signifier, which is logical connected with the philosophical model of transcendental argumentation. Order structures are modeled by a unit interval [0,1], which allows us to transfer the known properties of real and hyper-real numbers to complex sign systems (complexes) on complex sign systems (complexes) of semiotics, linguistics and other sciences of complex phenomena, and to present scientific texts of natural language in terms of the formal metalanguage of transformations and relations of algebraic systems. As a result, signs (schemes) are everything that reproduces and preserves linear order, that they are bounded, indexed, fractal and hierarchical organized, homotopical similar, etc.

Keywords: metatheory and interteory of sign systems, manifolds of sign systems, general theory of complex systems, feature space of bundle with fiber, mathematical modeling, geographical and technical models

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the state task (state registration number of the topic: AAAA-A21-121012190056-4)

References

- 1. Koshelev A. D. Sovremennaya teoreticheskaya lingvistika kak Vavilonskaya bashnya (o "mirnom" sosushchestvovanii mnozhestva nesovmestimyh teorij yazyka) [Modern theoretical linguistics as the Tower of Babel (on the "peaceful" coexistence of many incompatible theories of language)]. Izvestiya RAN. Seriya literatury i yazyka, 2013. vol. 72, no. 6, pp. 3-22. (in Russian).
- 2. Zverev, G. N. Teoreticheskaya informatika i ee osnovaniya [Theoretical informatics and its foundations], Moscow, Fizmatlit, 2007, vol. 1, 592 p. (in Russian).
- 3. Mamardashvili M.K., Pyatigorsky A.M. Simvol i soznanie. Metafizicheskie rassuzhdeniya o soznanii, simvolike i yazyke [Symbol and consciousness. Metaphysical reasoning about consciousness, symbolism and language]. Moscow, Shkola "YAzyki russkoj kul'tury, 1997, 224 p. (in Russian).
- 4. Timofeeva, M. K. Yazyk s pozicij filosofii, psihologii, matematiki [Language from the standpoint of philosophy, psychology, mathematics]. Moscow, FLINTA,2013,176 p. (in Russian)
- 5. Kempson R., Fernando T., Asher N. Philosophy of linguistics. Amsterdam, London, New York, Elsevier, 2012, 574 p.
- 6. Trifonas P.P. International Handbook of Semiotics. London, New York, Springer, 2015, 1325 p
- 7. Cherkashin A. K. Metateoreticheskie modeli politicheskoj nauki ob ustojchivom razvitii v koncepcii rassloennyh prostranstv deyatel'nosti [Metatheoretical models of political science on sustainable development in the concept of stratified spaces of activity]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Politologiya.

- Religiovedenie [Bulletin of Irkutsk State University. Political Science and Religious Studies series], 2018, vol. 25, pp. 5-23 (in Russian).
- 8. Cherkashin A. K. Metateoreticheskoe modelirovanie pravovyh norm i otnoshenij [Metatheoretic modeling of legal norms and relations]. Monitoring pravoprimeneniya [Monitoring of law enforcement], 2020, vol. 36, no. 3, pp. 59-69. (in Russian).
- 9. Shokin Yu.I., Chubarov L.B. Matematicheskoe modelirovanie i informacionnye tekhnologii v Sibirskom otdelenii RAN. Tradicii i sovremennost' [Mathematical modeling and information technologies in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Traditions and modernity]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computing technologies], 2007, no, 3(12), pp. 8-23.
- 10. Lyutyy A. A. Yazyk karty: sushchnost', sistema, funkcii [The language of the map: essence, system, functions]. Moscow, IG AN SSSR, 1988, 292 p. (in Russian).
- 11. Cherkashin A. K. Geokartograficheskoe myshlenie v sovremennoj nauke [Geocartographic thinking in modern science]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]. 2020, no. 7, pp. 27-36. (in Russian).
- 12. Saussure F. Trudy po yazykoznaniyu [Proceedings on linguistics]. Moscow, Progress, 1977, 695 p. (in Russian).
- 13. Lyashenko D. N. Semioticheskoe modelirovanie real'nosti [Semiotic modeling of reality: monograph]. Odessa: Pechatnyj dom [Odessa: Printing House]. 2015, 168 p.
- 14. Povileyko R.P. Arhitektura mashiny. Hudozhestvennoe konstruirovanie. Problemy i praktika [Architecture of the machine. Artistic design. Problems and practice]. Novosibirsk: Zapadno-Sibirskoe kn. iz-vo,Novosibirsk [West Siberian Book Publishing House], 1974, 143 p.
- 15. Massel L. V., Kuzmin V. R. Situacionnoe ischislenie kak razvitie semioticheskogo podhoda k postroeniyu intellektual'noj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij [Situational calculus as the development of a semiotic approach to the construction of an intelligent decision support system]. Vestn. NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii [Vestn. NSU. Series: Information Technology], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 43-52.
- 16. Osipov G. S. Ot situacionnogo upravleniya k prikladnoj semiotike [From situational management to applied semiotics]. Novosti iskusstvennogo intellekta, 2002, no. 6 (54), pp. 2-12
- 17. Kuznetsov V. G. (ed.) Slovar' filosofskih terminov [Dictionary of philosophical terms]. Moscow, INFRA-M [Moscow, INFRA-M], 2005, 73l p. (in Russian).
- 18. Humboldt W. On Language: On the diversity of human language construction and its influence on the mental development of the human species. Cambridge, Cambridge University Press, 1999, 342 p.
- 19. Humboldt, A. Kosmos. Draft of a physical description of the world, edited and provided with an afterword by Ottmar Ette and Oliver Lubrich. Berlin, Die Andere Bibliothek, 2014, 572 p.
- 20. Kruszewski N.V. Predmet, delenie i metod nauki o yazyke [The subject matter, the division and the method of science about language]. Hrestomatiya po istorii russkogo yazykoznaniya. Vysshaya shkola [The reader on the history of Russian linguistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1973, pp. 412-417. (in Russian).
- 21. Husserl E. Cartesian Meditations: An Introduction to Phenomenology, Springer, 2012. 174 p.
- 22. Arnold I. V. Osnovy nauchnyh issledovanij v lingvistike [Fundamentals of scientific research in linguistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 140 p. (in Russian).
- 23. Anderson M., Merrell F. On Semiotic Modeling. Berlin, New York, Mouton de Gruyter, 1991, 632 p.
- 24. Kiryushchenko, V. Maps, diagrams, and signs: visual experience in Peirce's semiotics. International Handbook of Semiotics, P.P.Trifonas (ed.). London, New York, Springer, 2015, pp. 115-123.
- 25. Chomsky N. Sintaksicheskie struktury [Syntactic structures]. Novoe v lingvistike [New progress in linguistics], Moscow, 1962, vyp. 2, Issue 2, pp. 412–527. (in Russian).
- 26. Schreyder Yu. A. Ravenstvo, skhodstvo, poryadok [Equality, similarity, order]. Moscow, Nauka, 1971, 254 p. (in Russian).
- 27. Firth J.R. Papers in linguistics, 1934-1951. London: Oxford university Press, 1958, 233 p.
- 28. Cherkashin A. K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society. Mathematical modelling of natural phenomena, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 4–20.
- 29. Bull W. E. Time, Tense and the Verb: A Study in Theoretical and Applied Linguistics with Particular Reference to Spanish, University of California Press, 1971, 120 p.
- 30. Guillaume G. Principy teoreticheskoj lingvistiki [Principes de Linguistique théorique]. Moscow, Progress, 1973, 276 p.
- 31. Guillaume G. Foundations for a science of language. Series IV, Current Issues in Linguistic Theory, vol. 31, Amsterdam, John Benjamins, 1984, xxiv+175 p.
- 32. Deerwester S., Dumais S.T., Furnas G.W., Landauer T.K., Harshman R. Indexing by latent semantic analysis . Journal of the American society for Information Science, September, 1990, pp. 391-407.
- 33. Salton G., Allan J., Buckley C. Automatic structuring and retrieval of large text files. Electronic publishing, 1992, vol. 5, no.1. pp. 1–17.

- 34. Zherebtsova Yu. A., Chizhik A.V. Sravnenie modelej vektornogo predstavleniya tekstov v zadache sozdaniya chat-bota [Text vectorization methods for retrieval-based chatbot]. Vestnik NGU. Seriya: Lingvistika i mezhkul'turnaya kommunikaciya [Bulletin of the NSU. Series: Linguistics and intercultural communication], 2020, vol. 18, no. 3, pp. 16-34. (in Russian).
- 35. Stepin V. S., Gorokhov V. G., Rozov M. A. Filosofiya nauki i tekhniki. [Philosophy of Science and Technology]. Moscow, Gardarika, 1999, 400 p.
- 36. Artobolevsky I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Nauka, 1988, 640 p.
- 37. Fitch W.T. The Evolution of Language. N.Y.: Cambridge University Press, 2010, 611 p.
- 38. Wilber K. Integral'naya psikhologiya: soznaniye, dukh, psikhologiya, terapiya [Integral Psychology: Consciousness, Spirit, Psychology], Moscow, OOO AST, 2000, 320 p.
- 39. Cherkashin A.K. Innovacionnaya matematika: poisk osnovanij i ogranichenij modelirovaniya real'nosti [Innovative mathematics: the search for the foundations and limitations of modeling reality]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 2, (14). pp. 69-87.
- 40. Peirce C.S. The essential Peirce. N. Houser & C. Kloesel, vol. 1, Bloomington, Indiana University Press, 1992, 448 p.
- 41. Matezius V. O tak nazyvaemom aktual'nom chlenenii predlozheniya [On so-called actual division of the sentence]. Prazhskij lingvisticheskij kruzhok [Prague linguistic circle], Moscow, Progress, 1967, pp. 239-245. (in Russian).
- 42. Bar-Hillel Y. Language and information: Selected essays on their theory and application. Foundations of Language, 1966, vol. 2, no.2, pp. 192-199.
- 43. Bieri P., Krüger L., Horstmann R.-P. Transcendental arguments and science: essays in epistemology. Dordrecht, Boston, London, Springer, 1979, 334 p.
- 44. Stern R. Transcendental Arguments: Problems and Prospects. Oxford, Oxford University Press, 2000, 344 p.
- 45. Lotman Yu. M. Dinamicheskaya model' semioticheskoj sistemy [Dynamic model of the semiotic system]. Stat'i po semiotike i topologii kul'tury. Izbrannye stat'i v trekh tomah [Stat'i po semiotike i topologii kul'tury. Izbrannye stat'i v trekh tomah], Tallin, Iz-vo Aleksandra, 1992, vol. 1, available at: http://yanko.lib.ru/books/cultur/lotman-selection.htm#_Toc509600928 (in Russian).
- 46. Morris Ch. U. Osnovaniya teorii znakov [Foundations of the theory of signs]. Semiotika: Antologiya [Semiotics: An Anthology]. Moscow, Akademicheskij proekt, Ekaterinburg, Delovaya kniga, 2001, pp. 45-95, available at: https://www.google.ru/url (in Russian).
- 47. Frege G. Logiko-filosofskie trudy [Logical and philosophical work]. Novosibirsk, Sib. univers. izd-vo, 2008, 283 p. (in Russian).
- 48. McCarthy J. Situations, actions and causal laws. Technical Report Memo 2, Stanford, Stanford University Artificial Intelligence Laboratory, CA, 1963, pp. 1-11.
- 49. Pirri F., Reiter R. Some contributions to the metatheory of the Situation Calculus. Journal of the ACM, 1999, vol. 46, no 3, pp. 325–361.
- 50. Wilber K. Integral post-metaphysics. Integral spirituality: A startling new role for religion in the modern and postmodern world. Boston&London, Integral Books, 2007, pp. 231-274.
- 51. Aslanikashvili A. F. Metakartografiya: Osnovnye problemy. [Metacartography: the main problems]. Tbilisi: Mecniereba, 1974, 125 p. (in Russian).

Alexander K. Cherkashin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Theoretical Geography of V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, ORCID 0000-0002-7596-7780, WoS K-2418-2017, AuthorID:58425, akcherk@irnok.net, 664033, Irkutsk, st. Ulaanbaatar 1.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022; принята к публикации 10.06.2022.

The article was submitted 04/27/2022; approved after reviewing 05/23/2022; accepted for publication 06/10/2022.

УДК 519-7

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.002

Математическое моделирование и его применение в преднамеренной расстройке параметров и оптимизации ресурсных характеристик турбомашин

Нгуен Ван Винь, Репецкий Олег Владимирович

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Россия, Иркутск, vinh.july177@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена разработке и применению математических моделей для исследования влияния преднамеренной расстройки на долговечность рабочих колес энергетических турбомашин методом конечных элементов (МКЭ). Выполнено численное исследование введения преднамеренной расстройки и оптимизации ресурсных характеристик энергетических турбомашин, на основе созданных или развитых математических моделей динамической нагрузки лопаток турбомашин и оценки ресурсных характеристик. Использование полученных математических моделей и численного МКЭ в данной работе позволяет повысить эффективность и надежность новых конструкций на стадии проектирования и доводки роторных деталей рабочих колес турбомашин. Подтверждено, что на основе созданных математических моделей и комплекса программ, возможно получить необходимую точность расчетов и провести вычислительные эксперименты для оценки влияния преднамеренной расстройки параметров в идеальных циклических симметричных системах и системах с расстройкой. Для исследования влияния преднамеренной расстройки рабочих колес турбомашин применены программный комплекс ANSYS WORKBENCH и оригинальные авторские программы. Объектом исследования является академическое рабочее колесо с 10-ю лопатками, изготовленное в Бранденбургском техническом университете.

Ключевые слова: академическое рабочее колесо, долговечность, математические модели, метод конечных элементов, преднамеренная расстройка

Цитирование: Нгуен В.В. Математическое моделирование и его применение в преднамеренной расстройке параметров и оптимизации ресурсных характеристик турбомашин / В.В. Нгуен, О.В. Репецкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 24-30. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.002.

Введение. Расстройка в конструкциях облопаченных дисков турбомашин возникает при небольшом отличии между лопатками по массе, геометрии, материалу или неидентичности секторов лопаточного диска, нарушающих циклическую симметрию рабочих колес. Также причинами расстройки параметров являются неизбежные технологические допуски на их изготовление [1, 2, 3], неоднородность материала [4, 5], разная посадка в замках [6, 7], действие различных эксплуатационных факторов и повреждения при эксплуатации [8, 9, 10].

В настоящее время известно достаточно большое количество вариантов преднамеренной расстройки, каждый из которых может быть либо использован на реальных конструкциях для улучшения ресурсных характеристик, либо служить некой моделью, позволяющей обнаружить определенные закономерности влияния тех или иных изменений на статические и динамические характеристики академических и промышленных турбомашин. К числу последних можно отнести, например, внесение сосредоточенных масс в определенные точки поверхности пера лопаток с учетом чувствительности этих конструкций [11].

Некоторые предложенные в данной статье параметры преднамеренной расстройки можно использовать для реальных рабочих колес, так как они не вносят существенного изменения аэродинамики рабочих ступеней турбомашин. Такими видами являются: несущественное изменение толщины и степени закрутки лопаток, например, от нарушения технологических процессов изготовления данных конструкций; наличие забоин или трещин

изделий; сверление отверстий в пере лопатки; применение различных материалов для отдельных лопаток; скругление или обрезание углов лопатки на ее периферии; шлифование отдельных частей лопатки; неоднородность материала пера и другие изменения [12].

Значения расстройки параметров лопаток определяются по формуле [12]:

$$\Delta f_i = \frac{f_{j,i} - \overline{f}_j}{\overline{f}_j},\tag{1}$$

где $f_{j,i}$ — значение частоты j-ой формы колебания лопаток, i=1,...,N (N - число лопаток), \overline{f}_j — среднее арифметическое значение основных частот. Степень расстройки учитывается коэффициентом:

$$S_{k} = \frac{1}{\overline{f}_{j}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^{N} \left(f_{i,j} - \overline{f}_{j} \right)^{2}}.$$
 (2)

Увеличение/уменьшение амплитуд колебаний и напряжений по сравнению с идеальной конструкцией характерны для колебаний расстроенных систем. Для количественной оценки вводится максимальный коэффициент увеличения амплитуды колебаний γ . Данный коэффициент γ связывает максимальную амплитуду расстроенной системы с максимальной амплитудой настроенной системы и имеет вид:

$$\gamma = \frac{A_{pacc.(Makcumym)}}{A_{hacp.(Makcumym)}}.$$
(3)

Коэффициент увеличения амплитуды γ зависит от степени расстройки и закона распределения расстройки. Например, в работе [13] моделируется влияние различных распределений расстройки на максимальную амплитуду колебания, которая может быть величиной от 130 до 210%.

1. Применение математического моделирования в преднамеренной расстройке параметров. Математическое моделирование преднамеренной расстройки на основе МКЭ и различных программных комплексов позволяет существенно сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований, проанализировать большое количество математических моделей расстройки при существенном снижении времени проектирования и доводки новых конструкций.

Подобный анализ выполнен на примере академического рабочего колеса с 10-ю лопатками. Рис. 1 иллюстрирует конечноэлементную модель колеса в пакете программ ANSYS, состоящую из 38830 трехмерных элементов типа ТЕТ10 и 228840 степеней свободы. Математическая модель возбуждения лопатки, развитая авторами, представлена на рис. 2. Для численной оценки долговечности данной конструкции применена математическая модель на основе численного метода систематизации динамических напряжений Rain-Flow (метод «дождя») и линейной гипотезы суммирования напряжений Palmgren-Miner [14]:

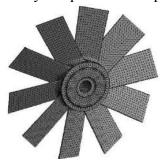


Рис. 1. Конечноэлементная модель академического рабочего колеса

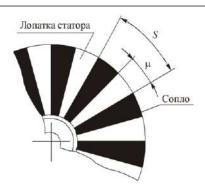


Рис. 2. Математическая модель возбуждения лопатки рабочего колеса

В табл. 1 представлен численный анализ введения преднамеренной расстройки и влияния ее на долговечность данной конструкции. Описание вариантов блочной модели и результатов по изменению толщины лопатки показаны в работе [15].

Таблица 1. Результаты расчета долговечности с различными вариантами блочных моделей

Вариант	Случай геометрического или механического изменения	Номер блочной модели	Долговечность (в циклах)	$\Delta \overline{N}$ (%)
1	Радиус скругления R5-R1	2	$1,7065\cdot10^6$	+19,4
2	Радиус скругления R5-R3	2	$1,4577 \cdot 10^6$	+2,0
3	Радиус скругления R5-R7	3	$1,4205\cdot 10^6$	-0,6
4	Толщина H ₁ = 1.1*H ₀	1	$1,4327 \cdot 10^6$	+0,3
5	Толщина H ₂ =0.9*H ₀	2	$1,5601 \cdot 10^6$	+9,2
6	Срез кромки $t=30$ мм, $\alpha=8$ °	1	$1,4859 \cdot 10^6$	+4,0
7	Срез кромки $t=15$ мм, $\alpha=60$ °	2	$1,3680 \cdot 10^6$	-4,2
8	4 отверстия с левой стороны	1	$1,4859 \cdot 10^6$	+4,0
9	4 отверстия с правой стороны	3	1,5528·10 ⁶	+8,7
10	Материал: Сталь - Титан	1	$1,6722\cdot10^6$	+17,0
11	Материал: Сталь - Титан	2	1,6611·10 ⁶	+16,27
12	Материал: Сталь - Титан	3	$1,5552 \cdot 10^6$	+8,86

Анализ таблицы 1 показывает, что при изменении радиуса перехода лопатки в диск при R=1мм долговечность академического колеса с преднамеренной расстройкой увеличивается на 19,4%. Случай среза выходной кромки лопатки t=15мм дает уменьшение долговечности академического колеса в сравнении с исходным колесом на 4,2%. Использование данных численных результатов позволяет повысить эффективность и надежность новых конструкций на стадии проектирования и доводки элементов рабочих колес турбомашин с минимальными экономическими и временными затратами.

2. Оптимизация введения преднамеренной расстройки. Вышеприведенные исследования выполнены на основе случайного применения преднамеренной расстройки, что не позволяет спрогнозировать выходные результаты. В данной статье описан оригинальный численно-экспериментальный подход, позволяющий оптимизировать введение расстройки параметров.

Несмотря на то, что случайная расстройка уже оказалась полезной для значительного сокращения вынужденного отклика, были предприняты усилия для дальнейшего улучшения результатов. На основании требования о стабилизации рабочего колеса в условиях

динамической нагрузки для второй формы колебаний и максимальной скорости вращения 100 (1/c) выполнена оптимизация схемы преднамеренной расстройки путем изменения жесткости лопаток. На основе формулы (1) значения расстройки параметров лопаток академического рабочего колеса для второй формы колебаний представлены в табл. 2.

	1 44 0 4 1 1 1 1		Territor per	Pom		Pos mom	#1011 <u>A</u> #311	aropon 4	opinibi ito	
Номер лопатк и	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f (Гц), эксп.	919,69	920,08	921,48	920,08	920,63	921,33	922,58	922,03	922,34	921,17
$\Delta f_{(\%)}$	-0,158	-0,115	0,037	-0,115	-0,055	0,021	0,156	0,097	0,130	0,003

Таблица 2. Значения расстройки параметров лопаток для второй формы колебаний

Результат оптимизации преднамеренной расстройки получен на основе численноэкспериментальных исследований частот колебаний академического рабочего колеса (см. табл. 2), путем определения отклонения частот собственных колебаний лопаток на основе анализа среднего отклонения экспериментальных частот колебаний и корректировки исходного варианта расстройки. Рис. 3 показывает значение расстройки лопаток колеса для второй формы колебаний для оптимизации преднамеренной расстройки.

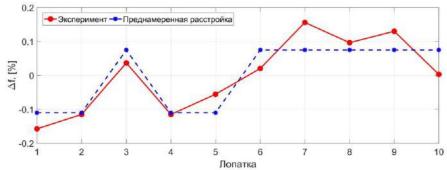


Рис. 3. Оптимизация введения преднамеренной расстройки

В результате оптимизации получаем модель с преднамеренной расстройкой, которая наилучшее возможное распределение частот между лопатками. С целью указывает минимизации производственных усилий были допущены только две механических характеристик (жесткости) лопатки, а именно $\Delta E_{i}^{^{on}} \approx 2 \cdot \Delta f_{i}^{^{on}} = -0.22\%$ +0.15% (где $\Delta E_{i}^{^{om}}$ - отклонение модуля Юнга i-й лопатки при оптимизации введения расстройки). Для того чтобы сравнить полученные результаты оптимизации необходимо рассмотреть и проанализировать две модели академического колеса. Первая модель с преднамеренной расстройкой на основе результатов вышеупомянутой оптимизации, вторая в соответствии с настроенным замыслом конструкции, которая теоретически имеет все идентичные лопатки.

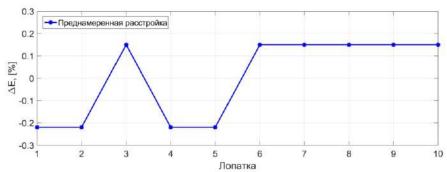


Рис. 4. Вариант оптимизации по различным значениям модуля Юнга

В реальности из-за воздействия допустимых производственных допусков, износа инструмента и т.п. невозможно избежать отклонений от лопатки к лопатке. Следовательно, реальные модели с расстройкой немного отличаются от проектных замыслов, как показано на рис. 4 с точки зрения относительных частотных распределений.

Далее приведен результат численного исследования ресурса академического рабочего колеса в случае оптимизации преднамеренной расстройки, описанной выше. Расчет долговечности с учетом преднамеренной расстройки параметров, вносимой в систему путем изменения механических характеристик лопаток показан на рис. 5.

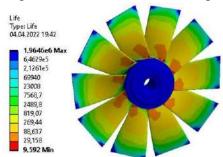


Рис. 5. Расчет долговечности рабочего колеса при оптимизации преднамеренной расстройки

Анализ результата исследования ресурса академического рабочего колеса показывает, что изменение значения модуля упругости при оптимизации преднамеренной расстройки приведет к увеличению их долговечности. Как следует из выполненного расчета, изменение модуля упругости по результатам оптимизации привело к увеличению долговечности академического рабочего колеса на 37,52% в сравнении с результатом долговечности без преднамеренной расстройки ($N=1,4286\cdot10^6$). Изменение жесткости конструкции, описанное выше, сложно применить на практике. Поэтому самый эффективный способ для регулировки собственной частоты лопатки является изменение ее геометрии для обеспечения эффекта преднамеренной расстройки, который будет проведен в дальнейших исслелованиях.

Заключение. В статье проведен анализ возможности и эффективности применения математических моделей для моделирования преднамеренной расстройки параметров. Выполнен количественный анализ влияния преднамеренной расстройки на усталостную прочность лопаточных структур. Представлены результаты численного исследования ресурса академического рабочего колеса при оптимизации введения преднамеренной расстройки. Анализ полученных результатов показывает, что оптимальное распределение модуля упругости по лопаткам приводит к увеличению долговечности академического рабочего колеса на 37,52% в сравнении с результатом долговечности от случайной расстройки.

Список источников

- 1. До М. Т. Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / До Мань Тунг: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. Иркутск, 2014. 197 с.
- 2. Beirow B., Giersch T., Kühhorn A., Nipkau J. Optimization–aided forced response analysis of a mistuned compressor blisk. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(1).
- 3. Castanier M.P., Pierre C. Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA Journal, 2002, vol. 40, no. 10.
- 4. Chan Y.J., Ewins D.J. The amplification of vibration response levels of mistuned bladed disks: its consequences and its distribution in specific situations. J Eng Gas Turb Power, 2011, vol. 133, no. 10, paper 102502, pp. 1–8.
- 5. Han Y., Murthy R., Mignolet M.P., Lentz J. Optimization of intentional mistuning patterns for the mitigation of effects of random mistuning. J Eng Gas Turb Power, 2014, vol. 136, no. 6, paper 062505, pp. 1–9.

- 6. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and Analysis of an Intentional Mistuning Experiment Reducing Flutter Susceptibility and Minimizing Forced Response of a Jet Engine Fan. ASME Paper, 2017, no. GT2017–64621.
- 7. Martel C., Sánchez-Álvarez J. J. Intentional mistuning effect in the forced response of rotors with aerodynamic damping. Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 433, pp. 212–229.
- 8. Ewins D. J. The Effects of Detuning Upon the Forced Vibrations of Bladed Disks. Journal of Sound and Vibration, 1969, vol 9, pp. 65–79.
- 9. Lim S. H., Castanier M. P., Pierre C. Intentional Mistuning Design Space Reduction Based on Vibration Energy Flow in Bladed Disks. ASME–Paper, 2004, GT2004–53873.
- 10. Martel C., Corral R., Llorens J. M. Stability Increase of Aerodynamically Unstable Rotors Using Intentional Mistuning. J Turbomach, January 2008, 130(1):011006.
- 11. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceedings of ASME, 2018, GT2018–76584.
- 12. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Vibration Analysis of an Axial Turbine Blisk with Optimized Intentional Mistuning Pattern. Journal of Sound and Vibration, 2019, vol. 442, pp. 11–27.
- 13. Choi B. K., Lentz J., Rivas–Guerra G. J., Mignolet M. PP. Optimization of Intentional Mistuning Patterns for the Reduction of the Forced Response Effects of Unintentional Mistuning: Formulation and Assessment. J. Eng. Gas Turbines Power, 2003, 125:131–140.
- 14. Репецкий О. В., Нгуен В.В. Анализ динамических характеристик облопаченных дисков турбомашин с преднамеренной расстройкой // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2020. № 62. С. 61–70.
- 15. Репецкий О. В., Нгуен В. В. Численное исследование преднамеренной расстройки при вариациях толщины лопаток энергетических турбомашин // Вестник НГИЭИ, 2021. –№ 8 (123). С. 44–56.

Нгуен Ван Винь. Аспирант кафедры «Электрооборудования и физики», Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, AuthorID: 1081813; SPIN–код: 2759–6554; ORCID: 0000–0002–0030–1503, vinh.july177@gmail.com, 664038, Россия, г. Иркутск, пос. Молодежный.

Репецкий Олег Владимирович. Доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, AuthorID: 118300, SPIN-код: 6232–8930, ORCID: 0000–0003–2560–2721, repetckii@igsha.ru, 664038, Россия, г. Иркутск, пос. Молодежный

UDC 519-7

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.002

Mathematical modeling and its application in intentional mistuning of parameters and optimization of life characteristics of turbomachines

Van Vinh Nguyen, Oleg V. Repetckii

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Russia, Irkutsk, *vinh.july177@gmail.com*

Abstract. The article is devoted to the development and application of mathematical models to study the effect of intentional mistuning on the durability of the impellers of power turbomachines by the finite element method (FEM). A numerical study of the introduction of intentional mistuning and optimization of the life characteristics of power turbomachines based on the created or developed mathematical models of the dynamic load of turbomachine blades and the assessment of life characteristics has been carried out. Using the obtained mathematical models and the numerical FEM method in this work makes it possible to increase the efficiency and reliability of new designs at the stage of designing and finishing the rotor parts of turbomachine impellers. It is confirmed that on the basis of the created mathematical models and a set of programs, it is possible to obtain the necessary accuracy of calculations and conduct computational experiments to assess the effect of deliberate mistuning of parameters in ideal cyclic symmetric systems and systems with mistuning. It is confirmed that on the basis of the created mathematical models and complex of programs, it is possible to obtain the necessary accuracy of calculations and conduct computational experiments to assess the effect of intentional mistuning in ideal cyclic symmetric systems and systems with mistuning. The ANSYS WORKBENCH software package and original author's programs were used to study the effect of intentional mistuning of the impellers of

turbomachines. The object of the study is an academic impeller with 10 blades, which is manufactured at the Brandenburg University of Technology.

Keywords: academic impeller, durability, mathematical models, finite element method, intentional mistuning

References

- 1. Do M. T. Chislennyj analiz vlijanija rasstrojki parametrov na dinamicheskie harakteristiki rabochih koles turbomashin [Numerical analysis of the effect of mistuning parameter on the dynamic characteristics of turbomachine impellers]. Ph.D. thesis, Irkutsk, 2014, 197 p.
- 2. Beirow B., Giersch T., Kühhorn A., Nipkau J. Optimization–aided forced response analysis of a mistuned compressor blisk. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(1).
- 3. Castanier M.P., Pierre C. Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA Journal, 2002, vol. 40, no. 10.
- 4. Chan Y.J., Ewins D.J. The amplification of vibration response levels of mistuned bladed disks: its consequences and its distribution in specific situations. J Eng Gas Turb Power, 2011, vol. 133, no. 10, paper 102502, pp. 1–8.
- 5. Han Y., Murthy R., Mignolet M.P., Lentz J. Optimization of intentional mistuning patterns for the mitigation of effects of random mistuning. J Eng Gas Turb Power, 2014, vol. 136, no. 6, paper 062505, pp. 1–9.
- 6. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and Analysis of an Intentional Mistuning Experiment Reducing Flutter Susceptibility and Minimizing Forced Response of a Jet Engine Fan. ASME Paper, 2017, no. GT2017–64621.
- 7. Martel C., Sánchez-Álvarez J. J. Intentional mistuning effect in the forced response of rotors with aerodynamic damping. Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 433, pp. 212–229.
- 8. Ewins D. J. The Effects of Detuning Upon the Forced Vibrations of Bladed Disks. Journal of Sound and Vibration, 1969, vol 9, pp. 65–79.
- 9. Lim S. H., Castanier M. P., Pierre C. Intentional Mistuning Design Space Reduction Based on Vibration Energy Flow in Bladed Disks. ASME–Paper, 2004, GT2004–53873.
- 10. Martel C., Corral R., Llorens J. M. Stability Increase of Aerodynamically Unstable Rotors Using Intentional Mistuning. J Turbomach, January 2008, 130(1):011006.
- 11. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceedings of ASME, 2018, GT2018–76584.
- 12. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Vibration Analysis of an Axial Turbine Blisk with Optimized Intentional Mistuning Pattern. Journal of Sound and Vibration, 2019, vol. 442, pp. 11–27.
- 13. Choi B. K., Lentz J., Rivas–Guerra G. J., Mignolet M. PP. Optimization of Intentional Mistuning Patterns for the Reduction of the Forced Response Effects of Unintentional Mistuning: Formulation and Assessment. J. Eng. Gas Turbines Power, 2003, 125:131–140.
- 14. Repeckij O. V., Nguen V.V. Analiz dinamicheskih harakteristik oblopachennyh diskov turbomashin s prednamerennoj rasstrojkoj [Dynamic characteristics analysis of bladed disk turbomachine based on intentional mistuning]. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University, Aerospace engineering, 2020, no. 62, pp. 61–70.
- 15. Repeckij O. V., Nguen V. V. Chislennoe issledovanie prednamerennoj rasstrojki pri variacijah tolshhiny lopatok jenergeticheskih turbomashin [Numerical study of intentional mistuning with variations in the thickness of the blades of power turbomachines]. Bulletin of the NGIEI, 2021, no. 8 (123), pp. 44–56.

Van Vinh Nguyen. Postgraduate student of the Department «Electrical power and physics», Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 1081813, SPIN–κοδ: 2759–6554, ORCID: 0000–0002–0030–1503, vinh.july177@gmail.com, 664038, Russia, Irkutsk, Molodezhny settlement.

Oleg V. Repetckii. Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for International Relations, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 118300, SPIN-κοδ: 6232–8930, ORCID: 0000–0003–2560–2721, repetckii@igsha.ru, 664038, Russia, Irkutsk, Molodezhny settlement.

Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 10.06.2022.

The article was submitted 05/26/2022; approved after reviewing 06/09/2022; accepted for publication 06/10/2022.

УДК 502.2,57.013,51-7

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.003

Исследование влияния параметров математической модели двухмерной стационарной конвективной диффузии на расчеты концентрации осаждающихся твердых частиц в канале

Тукмаков Дмитрий Алексеевич

Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, Россия, Казань, *tukmakovda@imm.knc.ru*

Аннотация. В работе исследуется влияние различных параметров математической модели диффузии на результаты расчетов конвективной диффузии дисперсной примеси в жидкости. Необходимость исследования и моделирования диффузионных процессов дисперсных примесей связана с экологическими проблемами углубления русла рек. Природные условия на рыбохозяйственных водоемах подвергаются отрицательному воздействию в результате проводимых гидротехнических работ. В данной работе представлены результаты теоретического исследования диффузии твердой примеси, оценивается влияние как различных подходов в моделировании, так и параметров дисперсных сред. Уравнения математической модели выведены из уравнения конвективной диффузии в двухмерном нестационарном виде. Водоток предполагается прямолинейным, постоянной глубины, с постоянной средней продольной скоростью, при этом поперечная и вертикальная осредненные скорости водотока считают равными нулю. Ось Ох направлена вдоль берега в сторону течения, ось Oz – вертикально вверх, ось Oy – поперек потока. Предполагается, что точечный источник сохраняет свою интенсивность достаточно долго, чтобы можно было решать задачу в стационарном приближении. После применения упрощений получена плоская математическая модель стационарной диффузии. Методом разделения переменных, в виде ряда Фурье, получено решение для совокупности уравнений математической модели диффузии нескольких фракций частиц. Решение реализовано в виде компьютерной программы. С ее использованием определено влияние различных параметров модели (скорости осаждения частиц, учета седиментации частиц, линейного размера частиц дисперсной примеси) на результаты расчетов диффузии дисперсной примеси в продольном и поперечном направлениях.

Ключевые слова: математическое моделирование, диффузия, неоднородные среды, дисперсная взвесь.

Цитирование: Тукмаков Д.А. Исследование влияния параметров математической модели двухмерной стационарной конвективной диффузии на расчеты концентрации осаждающихся твердых частиц в канале / Д.А.Тукмаков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 31-41. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.003.

Введение. Моделирование динамических процессов примесей в различных жидкостях и газах связано с проблемами промышленной экологии. Необходимость исследования и моделирования диффузионных процессов дисперсных примесей в водотоках возникает по причине экологических проблем углубления русла рек. Природные условия в водоемах подвергаются отрицательному воздействию в результате проводимых гидротехнических работ. Добыча песчано-гравийных смесей в руслах рек приводит к загрязнению водотоков взвешенными веществами и, соответственно, к повышению мутности, оказывающей отрицательное воздействие на водные экосистемы. В результате таких работ в биоценозах происходит снижение их продуктивности, истощаются запасы рыб, снижается их видовой состав В данной работе представлены результаты теоретического исследования диффузии твердой примеси, оценивается влияние как различных подходов в моделировании, так и параметров дисперсных сред. В монографии [1] представлены методики аналитического расчета уравнений математической физики, в том числе уравнений диффузионного типа. Монография [2] посвящена разработке методики моделирования аэродисперсных взвесей, что связано с проблемами промышленной экологии. В статье [3] предложена математическая модель количественного определения оседающей полидисперсной взвеси в отделах дыхательного тракта человека при использовании средств индивидуальной защиты органов дыхания. Работы [4-7] по-

священы теоретическому исследованию массопереноса в неоднородных средах. В статье [8] с помощью программного пакета «ANSYS Fluent» на основе метода конечных объемов численного решения уравнений Навье-Стокса определены гидродинамические характеристики системы удаления льда, демонстрируется возможность реализации системы удаления льда за счет использования насосов, предназначенных для заполнения и осущения балластных отсеков докового комплекса. Публикация [9] посвящена изучению последствий дноуглубительных работ в прибрежных водах (образование пятен мутности и распространение взвешенных веществ по акватории), а также рассчитываются значения параметров, характеризующих условия перераспределения взвешенных веществ в толще воды и на поверхности дна. Работа [10] посвящена изучению влияния скорости седиментации частиц на загрязнение проточных и стоячих водоемов. В качестве критерия загрязнения рассматривается показатель мутности воды. Получено качественное соответствие результатов моделирования данным натурных измерений. Показано влияние атмосферных параметров на пространственно-временное распределение мутности воды в стоячем водоёме. Исследование [11] посвящено моделированию концентрации взвешенных в воде веществ. Получена карта распространения максимальной мутности, позволяющая оценить области акватории с наиболее неблагоприятными гидродинамическими условиями, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами. В статье [12] рассматриваются различные методики расчета скорости осаждения частиц, изучается влияние размера частиц на скорость их осаждения. Работа [13] посвящена математическому моделированию загрязнения дисперсными примесями в процессе гидротехнических работ. Статья [14] повещена исследованию влияния параметров водотока на результаты расчета конвективной диффузии в проточном водоёме. В работе [15] получена трехмерная по пространственным координатам нестационарная математическая модель диффузии примеси в океане. В статье [16] методом конечных разностей получено численное решение уравнений в частных производных, описывающих стационарную диффузию дисперсной примеси. В работе [17] рассматривается задача моделирования переноса взвешенных веществ в водных объектах в тех случаях, когда размер ареала их распространения значительно превышает глубину акватории. Формулируется и анализируется модель горизонтального рассеяния загрязняющих субстанций. Обсуждаются вычислительные подходы к расчету переноса взвешенных веществ в водной среде. Публикация [18] посвящена исследованию процесса моделирования зон загрязнения взвесью в водной среде с помощью универсального программного комплекса «ANSYS Fluent». Приводятся данные об особенностях процесса моделирования в больших и малых водотоках. Изучается устойчивость получаемого решения в зависимости от характеристик сеточной модели. В статье [19] разработана нестационарная квазитрехмерная математическая модель для воспроизведения гидродинамических процессов распространения примеси загрязняющих веществ в озере, в которое втекает река. Уравнения математической модели интегрировались конечно-разностным методом. Результаты расчетов продемонстрировали, что на начальном этапе моделирования загрязнение, поступающее вместе со стоком реки, распространяется в глубинную область озера, а затем, когда происходит интенсивный прогрев вод притока и поверхности водоема, концентрация максимальных значений мутности наблюдается в верхних слоях озера. Исследование [20] посвящено разработке трехмерной нестационарной математической модели диффузии твердой примеси в проточной воде. Работа [21] посвящена разработке методик расчета загрязнения примесями водоемов, представлены значения коэффициента шероховатости для проточных водоемов различных типов. Монография [22] посвящена разработке общей теории и методики расчетов загрязнения водоемов растворимыми и нерастворимыми веществами.

В данной работе на основе математической модели двухмерной стационарной диффузии методом разделения переменных получено аналитическое решение, с помощью которого исследуется влияние параметров математической модели и моделируемого объекта на процесс конвективной диффузии. Целью работы являлся анализ влияния различных параметров математической модели на результаты расчетов, также исследовано влияние дисперсности частиц на процесс диффузии в продольном и поперечном направлениях.

1. Математическая модель. Уравнение трехмерной нестационарной диффузии (1) имеет вид [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{q}{H}$$
(1)

Здесь C(t,x,y,z) – концентрация; q – расход массы;u,v,w – пространственные составляющие скорости потока в пространственных направлениях; D_x,D_y,D_z – коэффициенты диффузии для соответствующих пространственных направлений. Водоток предполагается прямолинейным, постоянной глубины H, со средней (по расходу) продольной скоростью U = const, поперечная и вертикальная осредненные скорости водотока считаются равными нулю. Ось Ox направлена вдоль берега в сторону течения, ось Oy – поперек потока, ось Oz – вертикально вверх. Рассматривается малоинерционная примесь, у которой u=U, v=0, w=W, где W – скорость установившегося осаждения частиц. В предположении установившегося характера процесса – отсутствия зависимости концентрации от времени, а также в предположении отсутствия диффузии в продольном и вертикальном направлениях уравнение диффузии будет иметь вид [16]:

$$U\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{q}{H}$$
 (2)

Если пренебречь турбулентными пульсациями вертикальной составляющей скорости, то тогда расход осаждения k-й фракции многофракционной примеси можно рассчитать по формуле [16]:

$$q_k = (C_k - C_h) \cdot W_k \tag{3}$$

Распределение средних значений концентрации k-ой фракции примеси на вертикали $C_k(x,y)$ при указанных условиях описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$U\frac{\partial C_k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) - \frac{\left(C_k - C_b \right) \cdot W_k}{H} \tag{4}$$

Источников загрязнения вдоль береговой линий не наблюдается, поэтому принимаются следующие граничные условия (5):

$$C_k(0, y) = f_k(y); \left(\frac{\partial C_k}{\partial y}\right)_{y=0} = 0, \left(\frac{\partial C_k}{\partial y}\right)_{y=L} = 0$$
 (5)

Здесь C_k , C_b , q_k , f_k , L — концентрация k-ой фракции, фоновая концентрация, расход осаждения k-ой фракции примеси, функция распределения k-ой фракции в начале канала, ширина канала. В случае если фоновая концентрация равна нулю, то уравнение (4) при всех прочих допущениях может иметь вид:

$$U\frac{\partial C_k}{\partial x} = D\frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} - C_k \frac{W_k}{H}$$
 (6)

Предполагалось, что функция начального распределения также удовлетворяет уравнению (6) и при x=0:

$$\frac{d^2 f_k}{dv^2} = f_k \frac{W_k}{HD} \tag{7}$$

Решение уравнения (7) имеет вид:

$$f_k(y) = e^{-y\sqrt{\frac{D}{W_k}}} \tag{8}$$

Начальное распределение возможно описать следующей функций, где f_{k0} — концентрация k—ой фракции в источнике:

$$f_{k}(y) = \begin{cases} f_{k0}e^{-(y-y_{s})}, y \ge y_{s} \\ f_{k0}e^{(y-y_{s})}, y < y_{s} \end{cases}$$
 (9)

Направление вертикального движения взвеси обусловливается скоростью оседания данной взвеси. На характер осаждения частиц взвеси оказывают влияние их размер и форма, режим движения воды и её вязкость, зависящая от температуры и содержания солей. В данной работе расчёт скорости осаждения был произведен по двум различным формулам, приведенным в статье [20] и работе [13]. Первая формула (10) используется для расчета скорости седиментации шарообразных частиц при ламинарном режиме обтекания:

$$W = \frac{g \cdot d^2}{18 \cdot \nu} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \tag{10}$$

где g - ускорение свободного падения, ρ_s - плотность частицы, ρ - плотность жидкости, d - диаметр частиц, v - кинематическая вязкость воды. Отличие формулы (11) от формулы (10) заключается в отсутствии учета вязкости и наличии учета коэффициента сопротивления:

$$W = \sqrt{\frac{4gD\rho_s}{3C_R\rho}} \tag{11}$$

где C_R — коэффициент сопротивления (для шарообразной частицы $C_R \approx 0.45$). По методике разработки допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей [13, 21] коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{gUH}{3\ln_r C_C^2} \tag{12}$$

где g – ускорение свободного падения, м/c; U – скорость течения реки, м/c; H – глубина реки, м; n_r – коэффициент шероховатости ложа реки, определяемый по справочным данным [21], C_C – коэффициент Шези (м $^{0.5}$ /c), определяемый по формуле:

$$C_{C} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_{r}} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} (1 - \log R) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{n_{r}} - \sqrt{\frac{g}{0.13} \left(\frac{1}{n_{r}} + \sqrt{g \log R} \right)} \right)} \right]$$
 (13)

где R — гидравлический радиус потока, $R \approx H$. В статье [4] для расчета коэффициента диффузии применяется формула (14):

$$D = 0.15 \frac{UH\sqrt{g}}{C_C} \tag{14}$$

Формула коэффициента диффузии (15) (здесь L — ширина реки), учитывающая извилистость реки, большую ширину русла, выведенная с учетом эмпирических констант [14] на основе формул из статьи [16], имеет вид:

$$D = 3.65 \cdot 10^{-3} UH \sqrt{\frac{L}{H}}$$
 (15)

Формула коэффициента турбулентной диффузии [13, 14], учитывающая параметр M, зависящий от величины коэффициента Шези, записывается как

$$D = \frac{gHU}{MC_C} \tag{16}$$

При условии $10 < C_C < 60$ параметр $M = 0.7 C_C + 6$, при $C_C \ge 60$ коэффициент M = 48 = const.

Если предположить, что $C_k(x,y) = C_k(x,y)e^{\frac{-W_k}{UH}x}$ то неоднородное уравнение (6) преобразуется к однородному уравнению (6*):

$$\frac{\partial C_k}{\partial x} = \frac{D}{U} \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \tag{6*}$$

Рассмотрим метод разделения переменных [1] решения дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа применительно к уравнению (6*). Предположим, что $C_k(x,y) = X(x)Y(y)$. В таком случае уравнение (6**) будет иметь вид:

$$X'_{k}(x)Y_{k}(y) = \frac{D}{U}X_{k}(x)Y''_{k}(y)$$
 (6**)

Перепишем уравнение (6^{**}) в виде уравнения (6^{***}) :, уравнение (17) в виде (17*) и (17**):

$$\frac{X'(x)}{\frac{D}{U}X(x)} = \frac{Y''(y)}{Y(y)} = -\lambda^2$$

$$(6^{***})$$

$$\frac{dX}{dx} = -\frac{D}{U}\lambda^2 X, X = e^{-\frac{D}{U}\lambda^2 x}$$
(17)

$$\frac{d^2Y_k}{dv^2} = -\lambda^2 Y_k \tag{17*}$$

$$Y_{k}(y) = A_{k}\cos\lambda y + B_{k}\sin\lambda y \tag{17}^{**}$$

В связи с граничными условиями (5) имеем:

$$Y'(0) = Y'(L) = 0$$
 (5*)

Из граничных условий получаем следующее выражение для функции Y(y):

$$Y_k(y) = A_{ik} \cos \lambda_i y, \lambda_i = \frac{\pi i}{L}, i = 1, 2 \dots n$$
(18)

$$Y_k(y) = \sum_i A_{ik} \cos \lambda_i y \tag{18*}$$

Таким образом, решение уравнения (6)имеет вид (19)

$$C_k(x,y) = e^{-\frac{W_k}{UH}x} \left(\sum_i A_{ik} \cos \lambda_i y \ e^{-\frac{D}{U}\lambda_i^2 x} \right)$$
 (19)

Коэффициенты A_{ik} определяются следующим образом:

$$A_{ik} = \frac{2}{L} \int_0^L f_k(y) \cos \lambda_i y dy, \tag{20}$$

где для каждой фракции дисперсной примеси функции f_k определяются уравнениями (9). Математическая модель (18)-(20) реализована в виде компьютерной программы на языке программирования Fortran. Расчеты концентраций дисперсной взвеси одновременно прово-

дились для коэффициентов (10)-(16) и различных дисперсностей частиц. Программа включала в себя блок ввода физических параметров жидкости и частиц, геометрических параметров моделируемого водотока, основную программу, реализующую математическую модель, а также блок вывода результатов расчетов.

2. Результаты расчетов. По приведенным формулам был проведен расчет коэффициента турбулентной диффузии при следующих значениях параметров: g=9.8 м/c², n_r =0.033,U=0.41, H=20 начальная концентрация в источнике f_{k0} =20*10⁻³ кг/м³, k=1,...6. Плотности несущей среды и дисперсной примеси соответственно - ρ =1000 кг/м³, - ρ _s=2500 кг/м³. На рис. 1 представлена общая схема течения.

На рис. 2 изображено начальное распределение концентрации одной из фракций частиц, предполагалось, что начальное распределение концентрации для всех фракций одинаково

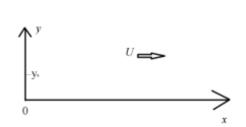


Рис. 1. Схематическое изображение течения.

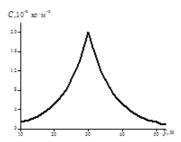


Рис. 2. Начальное распределение концентрации.

Рассмотрим сходимость ряда Фурье для нескольких частичных сумм ряда — N=4,8,16,32,64. На рис. За и рис.Зб представлены пространственные распределения концентрации (вдоль осей x и y пространственных направлений) для различных частных сумм рядов из фундаментальных функций. При увеличении количества слагаемых в частных суммах ряда Фурье уменьшается отличие между значениями предыдущего и последующего решений, как для продольного, так и для поперечного сечений.

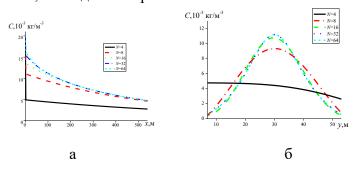


Рис. 3. а) Сходимость в продольном направлении, б) сходимость в поперечном направлении

Выбор формулы для коэффициента турбулентной диффузии оказывает существенное влияние на результаты расчетов диффузии твердой примеси (рис. 4).

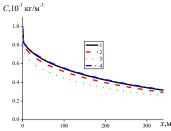


Рис. 4. Продольное распределение концентрации для различных видов расчета коэффициента турбулентной диффузии

Решения, полученные для формул коэффициента турбулентной диффузии (12) и (16) близки, меньшая величина концентрации в продольном направлении наблюдается при выборе для расчета коэффициента турбулентной диффузии формулы (14); наименьшее значение наблюдается при выборе коэффициента турбулентной диффузии по формуле (15). Влияние на результаты расчетов диффузии твердой примеси оказывает и выбор формулы расчета скорости осаждения частиц – рис. 4. При выборе формулы осаждения (10) скорость осаждения существенно превышает скорость осаждения, полученную по формуле (11). В отличие от мелкодисперсных фракций различия в скоростях осаждения частиц имеют существенное значения для крупнодисперсных фракций — (рис.5а-5в).

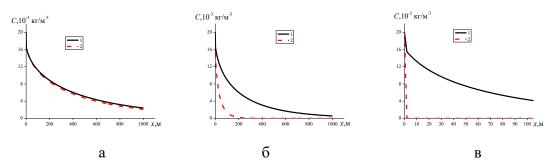


Рис. 5. Сопоставление концентрации при различных способах вычисления скоростей осаждения частиц: а) диаметр частиц d= 0.1 мм, б) диаметр частиц d= 0.4 мм, в) диаметр частиц d= 4 мм.

Сопоставление решений, полученных для моделей учитывающих и не учитывающих осаждение частиц (рис. 6), демонстрирует, что учет осаждения частиц более существенно влияет на результаты моделирования диффузии крупнодисперсной фракции.

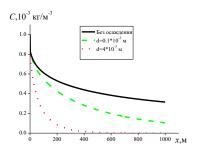


Рис. 6. Продольное распределение концентрации примеси в моделях с учетом седиментации частиц и без учета, фракция частиц с дисперсностью d=0.1 мм.



Рис. 7. Пространственное распределение концентрации частиц

При начальном распределении концентрации в виде точечного источника—рис. 2 в процессе распространения примеси вдоль проточного водоема происходит постепенное сглаживание поперечного профиля концентрации частиц (рис. 7). Из-за влияния размера частиц на скорость их осаждения концентрации мелко и крупнодисперсных фракций имеют существенные отличия, как в продольном (рис. 8а), так и в поперечном направлениях (рис. 8б). За

счет отсутствия в математической модели скорости движения среды в у-направлении, концентрация примеси убывает в продольном направлении интенсивнее.

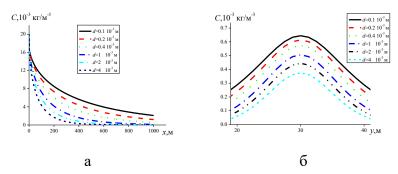


Рис. 8. а) Продольное распределение концентрации примеси для различных дисперсностей частиц, б) распределение концентрации различных фракций примеси вдоль координаты y, x=50м

Выводы. В работе представлена двухмерная стационарная математическая модель диффузии многофракционной твердой примеси в движущемся потоке. Для совокупности уравнений математической модели диффузии фракций примеси, дополненных граничными условиями, методом разделения переменных получено решение в виде ряда Фурье, реализованное в рамках компьютерной программы. Исследовано влияние различных параметров математической модели диффузии твердой дисперсной примеси в движущемся потоке на результаты расчетов. Сопоставлены результаты расчетов с различными формулами скорости осаждения частиц, определено, что для крупнодисперсных частиц выбор формулы скорости седиментации имеет большее влияние на результаты расчетов распространения примеси в водотоке. Проведены расчеты диффузии для различных коэффициентов турбулентной диффузии, результаты расчетов сопоставлены, как и расчеты диффузии для математических моделей с учетом и без учета осаждение частиц. Определено влияние учета осаждения частиц для фракций примеси с разными размерами частиц. Проведены расчеты распределения концентраций фракций примеси с различными размерами частиц, выявлено влияние размера частиц на распространение фракций примеси. Выявленные в работе закономерности возможно использовать при оптимизации математических моделей экологической безопасности гидротехнических работ на водотоках.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

Список источников

- 1. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Издательство «Наука», 1977. 736 с.
- 2. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А.Г. Кутушев. СПб: Недра, 2003. 284 с.
- 3. Мухаметзанов И.Т. Осаждение мелкодисперсных пылевых частиц в дыхательном тракте с использованием средств индивидуальной защиты / И.Т. Мухаметзанов, Ш.Х. Зарипов, Л.М. Фатхутдинова [и др.] //Медицина труда и промышленная экология, 2017. № 7. С. 56-60.
- 4. Тукмаков А.Л. Распределение твердых частиц в акустическом поле резонансной трубы при различных режимах возбуждения колебаний / А.Л. Тукмаков //Теплофизика и аэромеханика, 2005. № 2. С. 219-227.
- 5. Тукмаков А.Л. Динамика заряженной газовзвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию / А.Л. Тукмаков, Д.А. Тукмаков // Теплофизика высоких температур, 2017. №4. С. 509-512.

- 6. Тукмаков Д.А. Математическая модель нестационарной сорбции в двухфазной среде, учитывающая пространственную неравномерность распределения концентрации микрокомпонента в фазе сорбента / Д.А. Тукмаков //Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, 2019. № 4. С. 24-35.
- 7. Тукмаков Д.А. Численная модель течения аэрозоля, обусловленного взаимодействием частиц и газа/ Д.А. Тукмаков // Сложные системы, 2021. №1. С. 64-71.
- 8. Чернышев И.А. Численное моделирование системы гидродинамического удаления льда из докового комплекса / И.А. Чернышев, А.Л. Сухоруков //Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2018. № 2. С. 136-145.
- 9. Podgornyi K.A. Leonov A.V. Modeling of suspended matter distribution in marine coastalareas: 2.Testing and practical applying of sm-model // Океанологические исследования, 2017. № 1. C.142–162
- 10. Jiaqi Y., Limo T., Yuntong S., Jiao S. Laboratory measurements of the fall velocity of fine sediment in an estuarine environment. International Journal of Sediment Research, 2020, Issue 2, pp. 217–226.
- 11. Рахуба А.В., Моделирование распределения мутности воды в Куйбышевском водохранилище / А.В. Рахуба, М.В. Шмакова //Вестник Московского университета» Серия 5: географическая, 2020. № 4. С.51—57
- 12. Jimenez J.A., Madsen O.S. Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments// Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng, 2003, pp.70–78.
- 13. Аллагулова Е.Э. Расчет концентрации речной взвеси от дноуглубительных работ: выпускная квалификационная работа / Е.Э. Аллагулова. Казань, 2021. 67 с.
- 14. Волынов М.А. Влияние плановой геометрии речного русла на диффузию и дисперсию примеси / М.А. Волынов // Фундаментальные исследования, 2013. № 6. C. 535-540
- 15. Белокопытов В.Н. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте / В.Н. Белокопытов, А.И. Кубряков, С.Ф. Пряхина // Морской гидрофизический журнал, 2019. № 1. C.5–15.
- 16. Наумов В.А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке / Наумов В.А. //Известия КГТУ, 2017. № 44. С.46—58.
- 17. Котеров В.Н. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Горизонтальное рассеяние/ В.Н. Котеров, Ю.С. Юрезанская // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2010. № 2. С. 375—387.
- 18. Мухаметзянова А. Г. Моделирование объемов и площадей зон загрязненных взвесью в водной среде / Мухаметзянова А. Г., К.А. Алексеев, Н.Н. Закиров //Вестник Казанского технологического университета, 2014. №21. С.361-364.
- 19. Цыденов Б.О. Численное исследование распространения примеси в пресном озере на основе распределения мутности воды / Б.О. Цыденов //Вычислительные технологии, 2017. № 1. С.113-124
- 20. Студёнов И.И., Шилова Н.А. Расчет гидравлической крупности взвеси при моделировании динамики концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей на примере Белого моря / И.И. Студёнов, Н.А. Шилова // Научные исследования в Арктике, 2015. №3. С.40—47
- 21. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. URL: http://www.pfo.meteorf.ru/assets/files/56/52.24.622-2019.pdf (дата обращения 10.12.2021)
- 22. Караушев А.В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / А.В. Караушев. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. 176 с

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, 1980-го года рождения, образование: специалист-математик, к.ф-.м.н., научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, AutorID:739648, SPIN-код:3556-8576, ORCID:0000-0002-0335-8548, tukmakovda@imm.knc.ru 420111, Россия, г. Казань, ул. Лобачевского.

UDC 502.2,57.013,51-7

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.003

Investigation of the influence of the parameters of the mathematical model of two-dimensional stationary convective diffusion on the calculations of the concentration of depositing solid particles in the channel Dmitry A. Tukmakov

Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, Kazan, *tukmakovda@imm.knc.ru*

Abstract. The paper investigates the influence of various parameters of the mathematical model of diffusion on the results of calculations of the convective diffusion of a dispersed impurity in a liquid. The need to study and model the diffusion processes of dispersed impurities is associated with the environmental problems of deepening the riverbed. Natural conditions in fishery reservoirs are adversely affected as a result of hydraulic engineering works. The extraction of sand and gravel mixtures in riverbeds leads to pollution of watercourses with suspended solids and, accordingly, to an increase in turbidity, which has a negative impact on aquatic ecosystems. This paper presents the results of a theoretical study of the diffusion of a solid impurity and evaluates the influence of both different approaches in modeling and the parameters of disperse media. The equations of the mathematical model are derived from the equation of convective diffusion in a two-dimensional non-stationary form. The watercourse is assumed to be rectilinear, of constant depth, with a constant average longitudinal velocity, while the transverse and vertical averaged velocities of the watercourse are assumed to be equal to zero. Let us direct the Ox axis along the coast towards the current, the Oz axis vertically upwards, and the Oy axis transverse to the flow. It is assumed that the point source maintains its intensity long enough to be able to solve the problem in the stationary approximation. After applying simplifications, a flat mathematical model of stationary diffusion is obtained. By the method of separation of variables in the form of a Fourier series, a solution was obtained for the set of equations of the mathematical model of diffusion of several fractions of particles. The solution is implemented in the form of a computer program. The influence of various model parameters (particle settling rate, accounting for particle sedimentation, and the linear size of particles of a dispersed impurity) on the results of calculations of the diffusion of a dispersed impurity in the longitudinal and transverse directions was determined using the method.

Keywords: mathematical modeling, diffusion, inhomogeneous media, dispersed suspension **Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state task of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

References

- 1. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravneniya matematicheskoj fiziki. [Equations of mathematical physics]. Moskva: Izdatel'stvo «Nauka». 1977, 736 p.
- 2. Kutushev A.G. Matematicheskoe modelirovanie volnovyh processov v aerodispersnyh i poroshkoobraznyh sredah. [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powder media]. SPb, Nedra, 2003, 284 p.
- 3. Muhametzanov I.T., Zaripov SH.H., Fathutdinova L.M., Grinshpun S.A. Osazhdenie melkodispersnyh pylevyh chastic v dyhatel'nom trakte s ispol'zovaniem sredstv individual'noj zashchity [Deposition of fine dust particles in the respiratory tract using personal protective equipment]. Medicina truda i promyshlennaya ekologiya [Occupational Health and Industrial Ecology]. 2017, no 7, pp. 56-60.
- 4. Tukmakov A.L. Raspredelenie tverdyh chastic v akusticheskom pole rezonansnoj truby pri razlichnyh rezhimah vozbuzhdeniya kolebanij [Distribution of Solid Particles in the Acoustic Field of a Resonant Tube under Different Modes of Oscillation Excitation]. Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and Aeromechanics]. 2005, no. 2, pp.219-227.
- 5. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Dynamics of a charged gas suspension with an initial spatially nonuniform distribution of the average dispersed phase density during the transition to the equilibrium state. Teplofizika vysokikh temperatur [Thermophysics of high temperatures]. 2017, no 4, pp. 491-495.
- 6. Tukmakov D.A. Matematicheskaya model' nestacionarnoj sorbcii v dvuhfaznoj srede, uchityvayushchaya prostranstvennuyu neravnomernost' raspredeleniya koncentracii mikrokomponenta v faze sorbenta [Mathematical model of non-stationary sorption in a two-phase medium, taking into account the spatial unevenness of the distribution of the concentration of the microcomponent in the sorbent phase]. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya [Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry]. 2019, no 4, pp.24-35.
- 7. Tukmakov D.A. Numerical model of aerosol flow due to particle-gas interaction. // Slozhnyye sistemy [Complex systems]. 2021, no.1, pp. 65-71.
- 8. Chernyshev I.A., Sukhorukov A.L. Chislennoye modelirovaniye sistemy gidrodi-namicheskogo udaleniya l'da iz dokovogo kompleksa [Numerical modeling of the hydrodynamic ice removal system from the dock complex]// Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]. 2018, no. 2, pp. 136-145.

- 9. Podgornyi K.A., Leonov A.V. Modeling of suspended matter distribution in marine coastalareas: 2.Testing and practical applying of sm-model. Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological Research]. 2017, no 1, pp. 142–162. (In Russian)
- 10. Yang Jiaqi, Tang Limo, She Yuntong, Sun Jiao Laboratory measurements of the fall velocity of fine sediment in an estuarine environment. International Journal of Sediment Research. 2020, no 2, pp. 217–226.
- 11. Rahuba A.V. , Shmakova M.V. Modelirovanie raspredeleniya mutnosti vody v Kujbyshevskom vodohranilishche [Modeling the distribution of water turbidity in the Kuibyshev reservoir] // Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5: geograficheskaya [Bulletin of Moscow University, Series 5: geographical]. 2020, no 4, pp. 51–57. (In Russian)
- 12. Jimenez J.A., Madsen O.S. Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 2003, pp. 70–78.
- 13. Allagulova E.E. Raschet kontsentratsii rechnoy vzvesi ot dnouglubitel'nykh rabot [Calculation of the concentration of river suspension from dredging]. Final qualifying work. Kazan, 2021, 67 p.
- 14. Volynov M. A. Vliyanie planovoj geometrii rechnogo rusla na diffuziyu i dispersiyu primesi [Influence of the planned geometry of the river channel on the diffusion and dispersion of impurities] //Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. 2013, no 6, pp. 535-540.
- 1. 15. Belokopytov V.N., Kubryakov A.I., Pryahina S.F. Modelirovanie rasprostraneniya zagryaznyay-ushchej primesi v Sevastopol'skoj buhte [Modeling the spread of contaminants in the Sevastopol Bay]. Morskoj gidrofizicheskij zhurnal [Marine Hydrophysical Journal]. 2019, no 1, pp. 5–15.
- 15. Naumov V. A. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennyh primesej ot tochechnogo istochnika i ih osazhdeniya v vodotoke [Mathematical modeling of the distribution of suspended impurities from a point source and their deposition in a watercourse]. Izvestiya KGTU [Izvestiya KSTU]. 2017, no 44, pp. 46–58. (In Russian)
- 16. Koterov V. N., Yurezanskaya Y.S. Modelirovanie perenosa vzveshennyh veshchestv na okeanicheskom shel'fe. Gorizontal'noe rasseyanie [Modeling of the transport of suspended matter on the oceanic shelf. Horizontal scattering] Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2010, no 2, pp. 375–387.
- 17. A. G. Muhametzyanova, K. A. Alekseev, N. N. Zakirov Modelirovanie ob"emov i ploshchadej zon zagryaznennyh vzves'yu v vodnoj srede [Calculation of suspension hydraulic fineness in modeling the dynamics of suspended matter concentration in the mouth areas of the Arctic seas on the example of the White Sea]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014, no 21, pp. 361-364. (In Russian)
- 18. Cydenov B.O. Chislennoe issledovanie rasprostraneniya primesi v presnom ozere na osnove raspredeleniya mutnosti vody [Numerical study of the spread of impurities in a fresh lake based on the distribution of water turbidity]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational technologies]. 2017, no 1, pp. 113-124.
- 19. Studyonov, I.I. Raschet gidravlicheskoj krupnosti vzvesi pri modelirovanii dinamiki koncentracii vzveshennyh veshchestv v priust'evyh rajonah arkticheskih morej na primere Belogo moray [Calculation of suspension hydraulic fineness in modeling the dynamics of suspended matter concentration in the mouth areas of the Arctic seas on the example of the White Sea]. Nauchnye issledovaniya v Arktike [Scientific research in the Arctic]. 2015, no 3, pp. 40–47
- 20. Poryadok provedeniya rascheta uslovnyh fonovyh koncentracij himicheskih veshchestv v vode vodnyh obektov dlya ustanovleniya normativov dopustimyh sbrosov stochnyh vod [The procedure for calculating the conditional background concentrations of chemicals in the water of water bodies to establish the standards for permissible wastewater discharges] Available at: http://www.pfo.meteorf.ru/assets/files/56/52.24.622-2019.pdf. 10.12.2021.
- 21. Karaushev A.V. Metodicheskie osnovy ocenki antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverhnostnyh vod: monografiya [Methodological bases for assessing the anthropogenic influence on the quality of surface waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 176 p.

Dmitry A. Tukmakov, born in 1980, education: specialist mathematician, candidate of physical and mathematical sciences, researcher, Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, AutorID:739648, SPIN-κο∂:3556-8576, ORCID:0000-0002-0335-8548, tukmakovda@imm.knc.ru, 420111, Russia, Kazan, st. Lobachevsky, 2/31.

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 04/20/2022; approved after reviewing 06/10/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 519.876:519.855:631/635 DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.004

Модели роста с насыщением в задаче параметрического программирования применительно к аграрному производству

Иваньо Ярослав Михайлович, Петрова Софья Андреевна, Цыренжапова Валентина Вячеславовна

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный, *iasa_econ@rambler.ru*

Аннотация. В работе приведены результаты применения моделей роста с насыщением для решения прогностических задач и оптимизации производства аграрной продукции на основе моделей параметрического программирования. Решались задачи построения асимптотических и логистических моделей для среднесрочного прогнозирования показателей аграрного производства; сравнения результатов моделирования по асимптотическим и логистическим моделям; построения и применения моделей параметрического программирования с использованием моделей роста с насыщением для оптимизации производства аграрной продукции. При этом использованы методы математического моделирования, прогнозирования, теории вероятностей и математической статистики и параметрического программирования. В результате предложены многоуровневые асимптотические и логистические модели для прогнозирования производственно-экономических сельскохозяйственного производства на примере урожайности зерновых культур. Верхний уровень благоприятные условия деятельности сельскохозяйственного (тренд пиков) характеризует товаропроизводителя, а нижний (тренд ложбин) описывает неблагоприятные ситуации получения продукции. Показано, что модели роста с насыщением имеют преимущество относительно линейных и нелинейных трендовых моделей, не ограниченных верхней оценкой, по точности и значимости. Кроме того, такие модели в меньшей степени ограничены заблаговременностью, зависимой от количества данных. При сравнении асимптотической и логистической моделей выделены их преимущества и недостатки. Разработанные математические модели реализованы на реальных объектах. Предложена многоуровневая модель параметрического программирования с использованием логистической функции для оптимизации производства аграрной продукции. Приведены прогнозы урожайности сельскохозяйственных культур и оптимальные планы производства продукции до 2024 года для разных ситуаций – благоприятная, усредненная и неблагоприятная. Предложенный алгоритм получения оптимальных решений направлен на улучшение управления производством аграрной продукции.

Ключевые слова: асимптотическая модель, логистическая модель, параметрическое программирование, прогнозирование, аграрное производство

Цитирование: Иваньо Я.М. Модели роста с насыщением в задаче параметрического программирования применительно к аграрному производству/ Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, В.В. Цыренжапова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 42-52. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.004.

Введение. На уровне страны и регионов разрабатываются концепции и программы по развитию сельскохозяйственных предприятий на длительные периоды, что предполагает расширения исследований по теоретическим и прикладным аспектам, связанным с моделированием производственных процессов. Кроме того, рыночные отношения создают которой любая благоприятную среду, В категория хозяйств может свободно функционировать, руководствуясь собственными возможностями и интересами. сложившейся ситуации предприятиям необходимо не только оптимизировать производство и находить дополнительные резервы для развития, но и предвидеть будущее.

Изучением и применением различных классов оптимизационных моделей, в том числе, применяемых для повышения эффективности управления в аграрном производстве, занимались многие исследователи: М. Е. Браславец, А. М. Гатаулин, В. А. Кардаш, В. Г. Кравченко, М. М. Тунеев, Д. Б. Юдин и другие [1 – 13]. Особо выделим работы,

связанные с поддержкой принятия решений в области менеджмента с учетом и без учета рисков [11, 14, 15, 16, 17].

Анализ задач математического программирования показывает, что модели параметрического программирования могут расширить возможности моделирования производства аграрной продукции в условиях недостаточности информации [1, 4, 7, 8, 9, 13].

Статистический анализ производственно-экономических показателей деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей показывает, что многие из них могут быть описаны с помощью трендов, факторных, авторегрессионных и смешанных моделей [1, 4, 7, 8, 9]. При этом для планирования производства аграрной продукции можно использовать задачи параметрического программирования для разных условий производственной деятельности [4, 9]. Если модели описания динамики производственно-экономических показателей являются качественными, то с их помощью возможно прогнозирование.

Модели роста широко используются для прогнозирования различных сфер хозяйственной деятельности человека. В работе [18] приведены примеры использования асимптотических и логистических функций для предсказания поведения природных ресурсов. В работе [19] модели роста предлагается использовать для моделирования численности популяций.

Авторами работ [4, 9] функция с насыщением применена для оценки производства продукции сельскохозяйственной организацией при разной интенсивности роста, связанной с динамикой внедрения новых технологий. Причем временной ряд рассмотрен в виде многоуровневых последовательностей, которые выделяются на основе анализа пиков и ложбин [20].

Подобные функции применялись для планирования аграрного производства в ряде работ [1, 4, 9]. В монографии [4] асимптотическая функция использована для среднесрочного прогнозирования показателей сельскохозяйственного производства.

Асимптотическая и логистическая функция характеризуются некоторым предельным значением y_m , которое может быть определено экспертами или с помощью комплексной оценки развития событий. В некоторых случаях при оценке верхнего значения можно ориентироваться на аномальные значения временного ряда показателя y.

Модели с насыщением имеют следующий вид:

$$\frac{dy}{dt} = k(y_m - y),\tag{1}$$

$$\frac{dy}{dt} = ky(y_m - y),\tag{2}$$

где k – коэффициент скорости роста.

Для применения вышеуказанных моделей необходимо знание начальных и граничных условий, а также значение насыщения.

Асимптотическая модель (1) применена в некоторых работах [1, 4] для оценки перспективы производства аграрной продукции. Вместе с тем не изучены возможности приложения логистической модели (2) для прогнозирования показателей аграрного производства.

Поэтому целью работы является сравнительная оценка применения логистических и асимптотических трендов для прогнозирования и оптимизации объемов производства аграрной продукции с использованием параметрического программирования при благоприятных, неблагоприятных и усредненных условиях производственной деятельности товаропроизводителей. Для достижения цели решались задачи определения качественных многоуровневых трендовых моделей на основе функций с насыщением и построения

моделей параметрического программирования с использованием многоуровневых трендовых моделей. Задачи решены на примере данных муниципальных районов и хозяйства Иркутской области.

- 1. Методы и материалы. Для оценки возможностей математических моделей использованы данные по урожайности пшеницы, ячменя, овса в Иркутском районе за период 1996 2019 гг. При решении задач оптимизации объемов при производстве аграрной продукции применялись методы параметрического программирования. В качестве данных использованы результаты деятельности ООО «Сибирская Нива», расположенного в Иркутском районе.
- **2. Основные результаты.** Модели в виде асимптотической и логистической функции с учетом планового показателя показаны на рис. 1. Из анализа выражений, описывающих урожайность пшеницы, следует, что обе функции соответствуют показателям точности и значимости согласно *F*-критерию Фишера и *t* статистикам Стьюдента. Остальные модели, в том числе нелинейные, неприемлемы для прогнозирования урожайности овса.

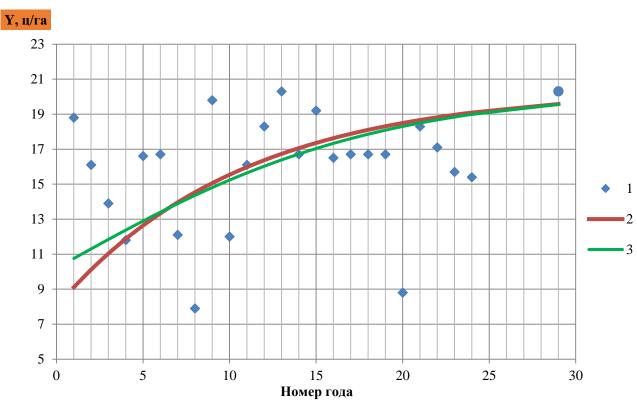


Рис. 1. Динамика урожайности овса в Иркутском районе по данным за 1996 – 2019 гг. (1) с трендами в виде асимптотической (2) и логистической (3) функции с нулевыми константами

Наибольшее значение y_{max} было выбрано равным для урожайности пшеницы 24,6 ц/га, овса - 20,4 ц/га и ячменя - 24,9 ц/га на основе максимального эмпирического значения временного ряда с добавкой в 0,1 ц/га, которая характеризует точность урожайности. Аналогично было определено минимальное значение урожайности зерновых культур. Для решения прикладных задач получены зависимости, описывающие динамику урожайности зерновых культур по данным Иркутского района с учетом плановых показателей на 2024 г.

На основе многолетних данных по урожайности пшеницы и овса в Иркутском районе за период 1996 - 2019 гг., а также плановых показателей 2024 года построены

асимптотическая и логистическая модели для среднесрочного прогнозирования показателей аграрного производства (табл. 1).

Таблица 1. Асимптотическая и логистическая модель и их статистические параметры для многолетнего ряда урожайности пшеницы и овса в Иркутском районе за 1996 - 2019 гг. и прогностические значения (с плановым показателем 2024 г.)

Уровни ряда	Уравнение	R^2	F-		Прогноз, ц/га							
			критерий	<i>t</i> -статистика	2020	2022	2024					
Пшеница												
Все значения	$y=24,6-13,8e^{-0.0734t}$	0,53	27,33	5,22	22,4	22,7	23,0					
Нижние	$y=19,0-7,8e^{-0.1044t}$	0,68	16,8	4,10	18,4	18,5	18,6					
Верхние	$y=24,6-11,3e^{-0,122t}$	0,70	16,4	4,04	24,1	24,2	24,3					
Все значения	$y=24,6/(1+e^{-0.08797t})$	0,57	31,95	5,65	22,1	22,5	22,8					
Нижние	$y=19,0/(1+e^{-0,142t})$	0,75	23,4	4,84	18,5	18,6	18,7					
Верхние	$y=24.6/(1+e^{-0.153t})$	0,78	24,5	4,95	24,1	24,2	24,3					
Овес												
Все значения	$y=20,4-12,4e^{-0,0936t}$	0,57	31,87	5,65	19,2	19,4	19,6					
Нижние	$y=16.8-7.9e^{-0.107t}$	0,51	6,36	2,90	16,3	16,4	16,4					
Верхние	$y=20,4-3,7e^{-0,0914t}$	0,58	8,3	2,81	20,0	20,1	20,14					
Все значения	$y=20,4/(1+e^{-0,108t})$	0,57	31,92	5,65	19,1	19,4	19,6					
Нижние	$y=16.8/(1+e^{-0.129t})$	0,54	6,94	2,64	16,2	16,3	16,4					
Верхние	$y=20,4/(1+e^{-0,176t})$	0,78	21,3	4,62	20,15	20,2	20,3					

В табл. 1 приведены точечные прогнозы урожайности пшеницы и овса на 2020, 2022 и 2024 гг. Предложенные модели учитывают эмпирические данные и плановый показатель, который в конкретном случае характеризует наибольшую урожайность за рассматриваемый период. Этот показатель является управляемым, позволяя подбирать адекватный план развития производства в Иркутском районе.

Обратим внимание на следующие преимущества моделей роста с насыщением в виде логистической и асимптотической функции. Во-первых, они значительно точнее линейных и нелинейных трендовых моделей, не ограниченных верхней оценкой, с помощью которых прогнозируют будущие ситуации по известным из прошлого значениям. Во-вторых, модели с верхней оценкой в меньшей степени ограничены заблаговременностью, зависимой от количества данных. В-третьих, все предложенные уравнения регрессии значимы, а также значимы коэффициенты роста. Вместе с тем прогнозы тесно связаны с уровнем насыщения или верхней оценкой. От того, насколько она адекватна реальной ситуации, зависит точность прогнозирования.

Однако не во всех случаях удается получить значимые выражения. В частности, для урожайности ячменя коэффициент детерминации (R^2) оказался ниже 0,50. Поэтому для этой культуры можно построить зависимость с невысокой точностью в качестве некоторого ориентира для деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя.

Полученные математические модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур могут быть использованы для оптимизации производства аграрной продукции с применением задачи параметрического программирования.

Математическая модель оптимизации производства растениеводческой продукции с учетом параметра в левой части ограничений приведена в работе [4]. Модификацией этой

модели является учет неоднородности земельных участков и использование логистической функции (2), описывающей коэффициенты при неизвестных левых частях ограничений, характеризующих объемы производства продукции. Приведем задачу параметрического программирования, целевая функция которой характеризует максимум дохода сельскохозяйственного предприятия:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \to \max, \tag{3}$$

при условиях:

• ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{i \in I} \sum_{i \in J} a_{ijl} x_{ij} \le A_l, \ l \in L; \tag{4}$$

• ограниченности размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n}_r \le \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (1 + \alpha_{ij}) x_{ij} \le \overline{n}_r, \quad r \in R;$$
(5)

• производства конечной продукции не менее заданного объема

$$\sum_{i \in I} \sum_{i \in J} v_{ijq}(t) x_{ij} \ge V_q, \ q \in Q; \tag{6}$$

• определенного количества вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} b_{ijm} x_{ij} \le B_m, \quad m \in M; \tag{7}$$

• неотрицательности переменных

$$x_{ii} \ge 0, \tag{8}$$

где x_{ij} — искомая переменная, площадь культуры j или вида кормовых угодий на участке i; c_{ij} — доход с единицы площади j-культуры или вида кормовых угодий на участке i; a_{ijl} — расход ресурса l на единицу площади культуры j или вида кормовых угодий на участке i; A_l — наличие ресурса l-вида; V_q — гарантированный (обязательный объем) производства продукции вида q; \overline{n}_r \underline{n}_r — максимально и минимально возможная площадь культур группы r; $v_{ijq}(t)$ — соответственно выход товарной продукции q — вида с единицы площади культуры j на участке i; a_{ij} — коэффициент, учитывающий площадь семенных посевов для культуры j на участке i; b_{ijm} — расход удобрений видов m и средств защиты на единицу площади культуры j или вида кормовых угодий на участке i; B_m — необходимый объем удобрений вида m.

В модели (3) - (8) левая часть ограничения (6) зависит от параметра t, который представляет собой время. При этом функция $v_{qs}(t)$ может быть описана в виде линейного и нелинейного выражения. В частности, для рассмотренных выше ситуаций показатель выхода товарной продукции имеет вид:

$$v_{ij} = \frac{v_{ij}^m}{(1 + e^{-\beta_{ij}t})},\tag{9}$$

$$v_{ij} = v_{ij}^m - (v_{ij}^m - v_{ij}^{\min})e^{-\beta_{ij}t} , \qquad (10)$$

$$v_{ij} = v_{ij}^{'} t^{v_{ij}^{''}}, \qquad (11)$$

где v_{ij}^m , v_{ij}^{\min} — верхняя и нижняя оценки выхода продукции вида j с единицы площади на участке i; β_{ij} — коэффициенты, характеризующие степень роста показателя; $v_{ij}^{'}$, $v_{ij}^{''}$ — параметры степенной функции.

Применим математическую модель (3)-(11) для сельскохозяйственной организации ООО «Сибирская Нива» Иркутского района, сделав допущение, что развитие деятельности организации согласовывается с вектором развития Иркутского района (табл. 1). Другими словами, тенденции изменения урожайности зерновых культур в хозяйстве соответствуют трендам этого показателя по району.

Для реализации модели использован следующий алгоритм.

Во-первых, в каждом временном ряду урожайности сельскохозяйственных культур выделены последовательности нижних и верхних уровней.

Во-вторых, для рядов со всеми значениями и выделенных последовательностей подобраны значимые тренды согласно коэффициенту детерминации, F-критерию Фишера и t-статистикам Стьюдента. В конкретном случае для урожайности пшеницы и овса предложена логистическая функция (9), а для урожайности ячменя — асимптотическое выражение (10). Для урожайности капусты и моркови использована степенная зависимость (11). Поскольку ряд урожайности картофеля характеризуется отсутствием тренда и незначительной вариацией, уровни оценивались с помощью средних значений и стандартных отклонений всего ряда и последовательностей нижних и верхних уровней.

В-третьих, формировалась задача линейного программирования, куда вошли показатели модели (3) - (7) и расчетные значения по трендам.

В-четвертых, решалась задача линейного программирования для конкретного года и уровня.

Затем третий и четвертый этапы повторялись многократно.

При реализации модели параметрического программирования сделано допущение об однородности участков посева.

Результаты оптимальных решений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оптимальные решения задачи параметрического программирования по данным Иркутского района на 2020, 2022 и 2024 гг. для ООО «Сибирская Нива» с использованием трендов трех уровней урожайности сельскохозяйственных культур

Год Площадь, га	x _I Пшеница 178	x2 Ячмень 280	<i>х</i> ₃ Овес 162	<i>х</i> ₄ Картофель 40 продукции, т	<i>x</i> ₅ Капуста 37	<i>х</i> ₆ Морковь 10	Целевая функция, тыс. руб.		
2020	393,4	613,2	309,4	ий уровень 632,0	1132,2	264,0	53663,89		
2022	400,5	624,4	314,3	660,0	1152,9	271,0	55001,10		
2024	405,8	635,6	317,5	688,0	1172,5	277,7	56272,13		
2020	429,0	672,0	327,2	667,6	1311,7	273,5	59225,87		
2022	430,8	677,6	327,2	688,8	1340,9	278,1	60366,40		
2024	432,5	683,2	328,9	710,0	1369,0	282,5	61501,07		
Нижний уровень									
2020	329,3	459,2	262,44	596,8	997,15	273,5	47552,21		
2022	331,08	462	264,06	623,2	1012,32	278,1	48517,43		
2024	332,86	464,8	265,68	649,6	1026,75	282,5	49465,19		

Согласно полученным оптимальным решениям для среднего уровня, характеризующего все члены временных рядов, доходы в 2022 г. могут быть увеличены на 2.5 %, а в 2024 г. — более чем на 4.9 %. Рост доходов осуществляется за счет увеличения

объемов производства благодаря прибавкам урожайности сельскохозяйственных культур. При этом распределение земельных ресурсов под посевы не изменяется.

Оптимальные решения по производству объемов растениеводческой продукции на основе трендов последовательностей верхних уровней показывают, что результативность деятельности товаропроизводителя относительно доходов в усредненных условиях может увеличиться на 9.3-10.4 %. При этом имеет место замедление процесса роста целевой функции с увеличением времени (таблица 2).

Наиболее сильное расхождение имеет место между значениями целевой функции для усредненных и неблагоприятных условий (тренды последовательностей нижних уровней), которые достигают 11,4-12,1 %. Другими словами, потери хозяйства в неблагоприятных условиях могут составить от 6,1 до 6,8 млн руб.

Модель (3) — (11) может быть реализована для муниципальных районов. В частности, ее применение для Иркутского района показало, что сельскохозяйственными товаропроизводителями возможно получение дохода в 2024 г. свыше 1163 млн руб. При этом для усредненных условий объем зерновых может превысить 27000, картофеля — 14300, капусты — 6000, моркови — более 1300 тонн. Что касается возможных потерь (неблагоприятные условия), то они соответствуют почти 9,3 %.

Выводы. Описана предложенная модель параметрического программирования для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с использование нелинейных трендов, в том числе с насыщением. Общая модель учитывает неоднородность земельных участков, характеризуемую различным плодородием.

Показано преимущество трендовых моделей с насыщением по сравнению с линейными и нелинейными моделями, не ограниченными верхними оценками при применении для прогнозирования и планирования производства аграрной продукции.

Приведен алгоритм реализации модели параметрического программирования для отрасли растениеводства одной из организаций Иркутского района, а также самого муниципального образования.

Результаты моделирования показывают возможности развития сельскохозяйственного товаропроизводителя в различных внешних условиях – благоприятных, неблагоприятных и усредненных. Прогностические и плановые показатели, полученные в неблагоприятных условиях, связаны с рисками производства сельскохозяйственной продукции относительно усредненных оценок.

Список источников

- 1. Барсукова М.Н. Оптимизационные модели планирования производства стабильных сельскохозяйственных предприятий / М.Н. Барсукова, Я.М. Иваньо. Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2011. 159 с.
- 2. Браславец М.Е. Экономико-математические методы в организации и планирования сельскохозяйственного производства / М.Е. Браславец. М.: Экономика, 1971. 358 с.
- 3. Гатаулин А.М. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин, Г.В. Гавриков, Т.М. Сорокина [и др.]; под ред. А.М. Гатаулина. М.: Агропромиздат, 1990. 432 с.
- 4. Иваньо Я.М. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях / Я.М. Иваньо, М.Н. Барсукова, С.А. Петрова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. № 3 (19). С. 73-85.
- 5. Тунеев М.М. Экономико-математические методы в организации и планировании сельскохозяйственного производства: учеб. пособие для с.-х. вузов по экон. спец. / М.М. Тунеев, В.Ф. Сухоруков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1986. 144 с.
- 6. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации: Задачи и методы стохастического программирования / Д.Б. Юдин. М.: Ленанд, 2017. 400 с.

- 7. Городовская Ж.И. Модели оптимизации сочетания отраслей аграрного производства с учетом изменчивости трудовых ресурсов / Ж.И. Городовская, Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Сб. статей III международной научно-практической конференции (27-29 мая 2014 г.). Иркутск: ИрГСХА, 2014. Ч. 2. С. 23-30.
- 8. Иваньо Я.М. Задача параметрического программирования с моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова, М.Н. Барсукова, Ю.В. Столопова // Прикладная информатика, 2021. Том 16. № 6 (96). С. 131-143. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-6-131-143.
- 9. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции: монография / Я.М. Иваньо, П.Г. Асалханов, М.Н. Барсукова [и др.]; под редакцией Я.М. Иваньо. Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ, 2021. 219 с.
- 10. Кардаш В.А. Модели управления производственно-экономическими процессами в сельском хозяйстве / В. А. Кардаш. М.: Экономика, 1981. 183 с.
- 11. Кардаш В.А. Экономика оптимального погодного риска в АПК / В.А. Кардаш. М.: Агропромиздат, 1989. 167 с.
- 12. Шапкин А.С. Математические методы и модели исследования операций: учеб. / А.С. Шапкин, Н.П. Мазаева. М.: Дашков и Ко, 2004. 400 с.
- 13. Умнов Е.А. Параметрический анализ в задачах математического программирования / Е.А. Умнов, А.Е. Умнов //Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), 2014. Т. 6. № 3(23). С. 73-83.
- 14. Орлов А.И. Перспективные математические и инструментальные методы контроллинга: монография / А.И. Орлов, Е.В. Луценко, В.И. Лойко. Краснодар: КубГАУ, 2015. 600 с.
- 15. Рыночные трансформации: новые бизнес-модели, инновационные технологии, практика решений: монография / под ред. В.А. Сидорова, Я.С. Ядгарова, В.В. Чапля. Лондон: Изд-во LSP, 2021. 461 с.
- 16. Oparin S.G. Optimal risk management technology as a tool for ensuring the reliability of solutions made in the digital economy. St.Petersburg State Polytechnical University Journal, Economics, 2020, vol. 13, no 2, pp. 53-63, DOI 10.18721/JE.13205.
- 17. Иваньо Я.М. Оценка редких природных событий и совместного проявления экстремальных явлений в Иркутской области / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Материалы IV международной научно- практической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (1941-1945 гг.) и 100-летию со дня рождения А.А. Ежевского (27-29 мая 2015 года). Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ, 2015. Часть II. С. 125-132.
- 18. Комплексное использование и охрана водных ресурсов / О.Л. Юшманов, В.В. Шабанов, И.Г. Галямина [и др.]; под ред. О.Л. Юшманова. М.: Агромиздат, 1985. 303 с.
- 19. Могилев А.В. Информатика: учеб. пособие для студ. пед. вузов. 2-е изд., стер / А.В. Могилев, Н.И. Пак, Е.К. Хеннер; под ред. Е.К. Хеннера. М.: Изд. Центр «Академия», 2001. 816 с.
- 20. Дружинин И.П. Динамика многолетних колебаний речного стока / И.П. Дружинин, В.Р. Смага, А.Н. Шевнин. М.: Наука, 1991. 176 с.

Иваньо Ярослав Михайлович. 1955 года рождения, образование высшее по специальности гидрология суши, полученной в Одесском гидрометеорологическом институте, д.т.н., профессор. Занимаемая должность: проректор по научной работе и цифровой трансформации, профессор кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 106394, SPIN-код: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa econ@rambler.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

Петрова Софья Андреевна. 1987 года рождения, образование высшее по специальности Прикладная информатика (в экономике), полученной в Иркутской государственной сельскохозяйственной академии, к.т.н. Занимаемая должность: доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 743695, SPIN-код: 7258-4269, ORCID: 0000-0001-9586-583X, sofia.registration@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

Цыренжапова Валентина Вячеславовна. 1985 года рождения, образование высшее по специальности Экономика и управление на предприятии (в аграрном производстве), полученной в Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. Аспирант кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 711547, SPIN-код 9125-0300; ORCID 0000-0003-1834-27067, tsyrenzhapova_v@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный.

UDC 519.876:519.855:631/635 DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.004

Growth models with saturation in the problem of parametric programming as applied to agricultural production

Yaroslav M. Ivanyo, Sofia A. Petrova, Valentina V. Tsyrenzhapova

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, *iasa_econ@rambler.ru*

Abstract. The paper presents the results of applying growth models with saturation to solve prognostic problems and optimize the production of agricultural products based on parametric programming models. The problems of constructing asymptotic and logistic models for medium-term forecasting of agricultural production indicators were solved. The results of modeling by asymptotic and logistic models were compared; Parametric programming problems were created and applied using saturation growth models to optimize the production of agricultural products. At the same time, methods of mathematical modeling, forecasting, probability theory and mathematical statistics and parametric programming were used. As a result, multilevel asymptotic and logistic models are proposed for predicting the production and economic indicators of agricultural production using the example of grain crop yields. The upper level (peak trend) characterizes favorable conditions for the activity of an agricultural producer, and the lower level (trough trend) describes unfavorable situations for obtaining products. It is shown that growth models with saturation have an advantage in accuracy and significance relative to linear and non-linear trend models that are not limited by an upper bound. In addition, such models are less limited by the amount of data-dependent lead time. When comparing the asymptotic and logistic models, their advantages and disadvantages are highlighted. The developed mathematical models are implemented on real objects. A multilevel model of parametric programming using a logistic function to optimize the production of agricultural products is proposed. Forecasts of crop yields and optimal plans for production until 2024 for favorable, average and unfavorable situations are given. The proposed algorithm for obtaining optimal solutions is aimed at improving the management of agricultural production.

Keywords: asymptotic model, logistic model, parametric programming, forecasting, agricultural production

References

- 1. Barsukova M.N., Ivanyo Ya.M. Optimizatsionnyye modeli planirovaniya proizvodstva stabil'nykh sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy [Optimization models for planning the production of stable agricultural enterprises]. Irkutsk, Publ. IrGSHA, 2011, 159 p.
- 2. Braslavets M.Ye. Ekonomiko-matematicheskiye metody v organizatsii i planirovaniya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva [Economic and mathematical methods in the organization and planning of agricultural production]. M.: Economics, 1971, 358 p.
- 3. Gataulin A.M., Gavrikov G.V., Sorokina T.M. [et al.]. Matematicheskoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov v sel'skom khozyaystve [Mathematical modeling of economic processes in agriculture]. Ed. Gataulin A.M., M.: Agropromizdat, 1990, 432 p.
- 4. Ivanyo Ya.M., Barsukova M.N., Petrova S.A. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [On one model of optimizing the production of agricultural products in favorable and unfavorable external conditions]. Information and mathematical technologies in science and management, 2020, no. 3 (19), pp. 73-85.

- 5. Tuneyev M.M., Sukhorukov V.F. Ekonomiko-matematicheskiye metody v organizatsii i planirovanii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: ucheb. posobiye dlya s.-kh. vuzov po ekon. spets. [Economic and mathematical methods in the organization and planning of agricultural production]. 2nd ed., M., Finance and statistics, 1986, 144 p.
- 6. Yudin D.B. Matematicheskiye metody upravleniya v usloviyakh nepolnoy informatsii: Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya [Mathematical methods of control in conditions of incomplete information: Problems and methods of stochastic programming]. M., Lenand, 2017, 400 p.
- 7. Gorodovskaya ZH.I., Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Modeli optimizatsii sochetaniya otrasley agrarnogo proizvodstva s uchetom izmenchivosti trudovykh resursov [Optimization model of combining of agrarian branch of production taking into account variability of workforce]. Klimat, ekologiya, sel'skoye khozyaystvo Yevrazii: Sb. statey III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (27-29 maya 2014 g.) [Climate, ecology, agriculture of Eurasia: Sat. articles of the 3rd International Scientific-practical Conference (May 27-29, 2014)]. Irkutsk: IrGSKHA, 2014, part 2, pp. 23-30.
- 8. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A., Barsukova M.N., Stolopova Yu.V. Zadacha parametricheskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Parametric programming problem with crop yield forecasting models]. Prikladnaya informatika [Applied Informatics], 2021, vol. 16, no. 6 (96), pp. 131-143, DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-6-131-143.
- 9. Ivanyo Ya.M., Asalkhanov P.G., Barsukova M.N. [et al.] Matematicheskiye i tsifrovyye tekhnologii optimizatsii proizvodstva prodovol'stvennoy produktsii: monografiya [Mathematical and digital technologies for optimizing food production: monograph]. Ed. Ya.M. Ivanyo, Irkutsk, Publ. Irkutskogo GAU, 2021, 219 p.
- 10. Kardash V.A. Modeli upravleniya proizvodstvenno-ekonomicheskimi protsessami v sel'skom khozyaystve [Models of management of production-economic processes in agriculture]. M., Ekonomika, 1981, 183 p.
- 11. Kardash V.A. Ekonomika optimal'nogo pogodnogo riska v APK [Economics of optimal weather risk in the agroindustrial complex]. M., Agropromizdat, 1989, 167 p.
- 12. Shapkin A.S., Mazayeva N.P. Matematicheskiye metody i modeli issledovaniya operatsiy: ucheb. [Mathematical methods and models of operations research: textbook]. M., Dashkov and Co., 2004, 400 p.
- 13. Umnov E.A., Umnov A.E. Parametricheskiy analiz v zadachakh matematicheskogo programmirovaniya [Parametric analysis in problems of mathematical programming]. Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta) [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)], 2014, vol. 6, no. 3(23), pp. 73-83.
- 14. Orlov A.I. Perspektivnyye matematicheskiye i instrumental'nyye metody kontrollinga: monografiya [Perspective mathematical and instrumental methods of controlling: monograph]. Krasnodar, KubGAU, 2015, 600 p.
- 15. Rynochnyye transformatsii: novyye biznes-modeli, innovatsionnyye tekhnologii, praktika reshenii: monografiya [Market transformations: new business models, innovative technologies, decision practice: Monograph]. Ed. Sidorov V.A., Yadgarov YA.S., Chaplya V.V., London, Publ. LSP, 2021, 461 p.
- 16. Oparin S.G. Optimal risk management technology as a tool for ensuring the reliability of solutions made in the digital economy. St.Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 2020, vol. 13, no 2, pp. 53-63, DOI 10.18721/JE.13205.
- 17. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Otsenka redkikh prirodnykh sobytiy i sovmestnogo proyavleniya ekstremal'nykh yavleniy v Irkutskoy oblasti [Assessment of rare natural events and joint of manifestation extreme events in the Irkutsk region]. Klimat, ekologiya, sel'skoye khozyaystvo Yevrazii: Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne (1941-1945 gg.) i 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Yezhevskogo (27-29 maya 2015 goda) [Climate, ecology, agriculture of Eurasia: Proceedings of the 4th International Conference, dedicated to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War (1941-1945) and the 100th anniversary of the birth of A.A. Yezhevsky (May 27-29, 2015)]. Irkutsk, Publ. Irkutskogo GAU, 2015, parth II, pp. 125-132.
- 18. Yushmanov O.L., Shabanov V.V., Galyamina I.G. [et al.] Kompleksnoye ispol'zovaniye i okhrana vodnykh resursov [Integrated use and protection of water resources]. Ed. Yushmanov O.L. M., Agromizdat, 1985, 303 p.
- 19. Mogilev A.V., Pak N.I., Khenner Ye.K. Informatika: ucheb. posobiye dlya stud. ped. vuzov. 2 izd., ster. [Informatics: Proc. allowance for students. ped. universities. 2nd ed., erased]. Ed. Khenner Ye.K., M., Publ. center "Academy", 2001, 816 p.
- 20. Druzhinin I.P., Smaga V.R., Shevnin A.N. Dinamika mnogoletnikh kolebaniy rechnogo stoka [Dynamics of long-term fluctuations of river runoff]. M., Nauka, 1991, 176 p.

Ivanyo Yaroslav Mikhaylovich. Born in 1955, higher education in the specialty Hydrology of land, received at the Odessa Hydrometeorological Institute, Doctor of Technical Sciences, Professor. Position: Vice-Rector for Research and Digital Transformation, Professor of the

Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 106394, SPIN-κοд: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny village.

Petrova Sofia Andreevna. Born in 1987, higher education in the specialty Applied Informatics (in Economics), received at the Irkutsk State Agricultural Academy, Candidate of technical sciences. Position: Associate Professor of the Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 743695, SPIN-κοδ: 7258-4269, ORCID: 0000-0001-9586-583X, sofia.registration@mail.ru, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny village.

Tsyrenzhapova Valentina Vyacheslavovna. Born in 1985, higher education in the specialty Economics and management at enterprise (in agricultural production), received at the Irkutsk State Agricultural Academy. Position: Graduate student of the Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 711547, SPIN-κοθ 9125-0300; ORCID 0000-0003-1834-27067, tsyrenzhapova_v@mail.ru, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny village.

Статья поступила в редакцию 09.05.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022; принята к публикации 03.06.2022.

The article was submitted 05/09/2022; approved after reviewing 05/23/2022; accepted for publication 06/03/2022.

УДК 519.622.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.005

Пакет программ MEOPT для решения невыпуклых задач параметрической идентификации

Сороковиков Павел Сергеевич, Горнов Александр Юрьевич

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Россия, Иркутск, pavel@sorokovikov.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработанный авторами пакет программ (ПП) МЕОРТ для численного исследования невыпуклых задач параметрической идентификации динамических моделей. В состав программного обеспечения входят библиотеки алгоритмов оптимизации и тестовых задач, инструментальные и сервисные модули, метакомпоненты. Реализованные библиотеки оптимизационных алгоритмов включают методы многомерной и одномерной невыпуклой оптимизации. Программное обеспечение создано на языке Си с применением компилятора GCC, поддерживает работу в операционных системах Windows, Linux и MacOS. На сегодняшний день завершены прототипы основных модулей ПП. Выполнено техническое тестирование первой версии программного обеспечения.

Ключевые слова: пакет программ, параметрическая идентификация, динамические модели, оптимизация динамических систем

Цитирование: Сороковиков П.С. Пакет программ МЕОРТ для решения невыпуклых задач параметрической идентификации/ П.С. Сороковиков, А.Ю. Горнов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2022. - № 2(26). - С. 53-60. - DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.005.

Введение. Вычислительные технологии решения задач параметрической идентификации динамических моделей и оптимального управления развивались параллельно с результатами в теории. В 1984 г. в России был разработан первый программный комплекс CONTROL, предназначенный для исследования проблем оптимального управления [1]. Использование методов безусловной оптимизации для численного решения указанных задач было реализовано в «Диалоговой системе оптимизации» (ДИСО) [2, 3]. Данная система предоставляла возможность работы в диалоговом режиме, позволив применять различные интерактивные технологии решения поставленной задачи.

Созданию пакетов программ, предназначенных для численного исследования проблем оптимизации динамических систем уделялось большое внимание в Иркутском вычислительном центре с момента его основания. В частности, были разработаны программные комплексы КОНУС [4], МАПР [5, 6], «Пакет прикладных программ для проблем оптимального управления» [7], OPTCON [8] и другие. Последний на протяжении нескольких десятилетий используется в практических приложениях.

В зарубежных организациях также велась разработка программных продуктов для исследования проблем оптимального управления и параметрической идентификации. Одним из первых программных инструментов была «Программа моделирования и оптимизации траекторий» (Program to Simulate and Optimize Trajectories, POST) [9]. Первоначально POST был разработан для решения задач оптимизации траектории ракеты-носителя и до сих пор используется для таких приложений. Другим широко известным программным обеспечением был программный комплекс «Оптимальные траектории путем неявного моделирования» (OTIS) [10]. ОТІS — это программное обеспечение, написанное на языке FORTRAN, обладающее универсальными возможностями для решения задач в аэронавтике и космонавтике, широко использующееся в аэрокосмической и оборонной промышленности. В политехническом университете Гонконга разработан пакет программ MISER3 [11].

Пакет программ «Генерация нелинейных траекторий» (Nonlinear Trajectory Generation, NTG) [12] предназначен для быстрого построения траекторий дифференциально плоских си-

стем. Еще одним программным комплексом является «Графическая среда для моделирования и оптимизации» [13] (GESOP), разработанная в Институте механики полета и управления Штутгартского университета Германии. Благодаря объединению существующих пакетов математического программирования (CPLEX, MINOS, SNOPT, LPSOLVE, NPSOL, DAESSA, DASOLV), в Принстонском университете США был разработан программный комплекс MINOPT [14].

М. Гердтс из Университета Бундесвера в Мюнхене разработал пакет программ оптимального управления обыкновенными дифференциальными уравнениями (Optimal Control of Ordinary-Differential Equations, OC-ODE) [15], он представляет собой набор процедур, в которых применяется метод автоматической прямой дискретизации для редукции задачи оптимального управления к конечномерной задаче нелинейной оптимизации. Набор инструментов динамической оптимизации с параметризацией векторного управления (The Dynamic Optimization Toolbox with Vector Control Parametrization, DOTcvp) был предложен и реализован Т. Хирмайером, Э. Бальса-Канто и Дж. Р. Банга (Bioprocess Engineering Group, IIM-CSIC, Испания) [16]. Программный комплекс «Множественной стрельбы для оптимального управления» (The Multiple Shooting CODe for Optimal Control, Muscod-II), разработанный в Гейдельбергском университете Германии [17], представляет собой программный пакет для исследования смешано-целочисленных нелинейных задач оптимального управления и является частью платформы NEOS. CasADi – это платформа с открытым исходным кодом для нелинейной траекторной оптимизации (Департамент химической и биологической инженерии, Университет Висконсин-Мэдисон, США) [18]. П.Е. Рутквист (Tomlab Optimization AB, Швеция) и М. Эдвалл (Tomlab Optimization Inc., США) разработали программный комплекс оптимального управления PROPT [19]. П. Фалуги, Э. Керриган и Э. Вик из Имперского колледжа Лондона предложили программное обеспечение оптимального управления ICLOCS [20]. Другим решателем, предназначенным для исследования сложных задач траекторной оптимизации, является пакет программ PSOPT, разработанный В.М. Бесерра из Школы системной инженерии Университета Рединга в Англии [21].

В последние годы интерес к конкретному применению оптимального управления в космическом полете привел к разработке нескольких полезных программных продуктов. Одним из них является программное обеспечение для проектирования и анализа миссий (Mission Design and Analysis Software, MIDAS) [22], которое предназначено для нахождения сложных баллистических гелиоцентрических траекторий перехода для межпланетных космических полетов. Другой инструмент, который был недавно разработан, — это программный комплекс NASA «Инструмент обобщенного анализа миссии» (Generalized Mission Analysis Tool, GMAT) [23]. Иной пакет программ, широко использующийся в последние несколько лет, — COPERNICUS [24]. Как GMAT, так и COPERNICUS предназначены для решения задач траекторной оптимизации, когда маневры могут рассматриваться как импульсные или с конечной тягой. Также следует отметить следующие программные пакеты для решения задач оптимизации (см., например, [13]): SOCS [25], DIRCOL [26], BNDSCO, KNITRO, DIDO, RIOTS_95, DIRECT, OPTCONTROLCENTRE, IPOPT, GPOPS, GPOPS-II, TOMLAB и другие.

В статье представлено описание программного пакета МЕОРТ, разработанного авторами для численного исследования невыпуклых задач параметрической идентификации. Созданное программное обеспечение отличается от других вышеупомянутых решателей общирной библиотекой алгоритмов нелокальной оптимизации различного генезиса, возможностью работы в нескольких режимах и другими характеристиками, описанными в работе. Статья организована следующим образом: в разделе 1 формулируется математическая и технологическая постановки задачи параметрической идентификации; в разделе 2 представлена логическая структура разработанного программного комплекса; раздел 3 описывает реализо-

ванные функциональные подсистемы; раздел 4 сообщает о режимах работы пакета программ МЕОРТ.

1. Постановка задачи. Динамическая модель задается в виде системы дифференциальных уравнений, которые зависят от идентифицируемых параметров:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1}(t) = f_{1}(a_{1},...,a_{k}, x_{1}(t),...,x_{n}(t), u_{1}(t),...,u_{r}(t)), \\ \dot{x}_{2}(t) = f_{2}(b_{1},...,b_{j}, x_{1}(t),...,x_{n}(t), u_{1}(t),...,u_{r}(t)), \\ ... \\ \dot{x}_{n}(t) = f_{n}(h_{1},...,h_{s}, x_{1}(t),...,x_{n}(t), u_{1}(t),...,u_{r}(t)). \end{cases}$$

Здесь $x_1, x_2, ..., x_n$ — фазовые координаты, $a_1, a_2, ..., a_k, b_1, b_2, ..., b_j, h_1, h_2, ..., h_s$ — параметры модели, $u_1, ..., u_r$ — управляющие воздействия (при наличии), t — переменная времени.

Для численного решения задачи идентификации динамических моделей с применением пакета программ необходимо записать математическую постановку задачи, на основе которой реализовать технологическую постановку на том языке, на котором разработано программное обеспечение (С). На этом этапе задаются правые части управляемой системы дифференциальных уравнений, вектор начальных состояний, отрезок времени, множество допустимых управлений.

Технологическая постановка задачи реализуется в виде файла с исходным программным кодом и состоит из следующих пунктов.

- 1. Количество фазовых координат, управляющих воздействий.
- 2. Стартовые значения фазовых координат.
- 3. Накладываемые ограничения на управляющие воздействия.
- 4. Правые части динамической системы.
- 5. Аналитическое представление градиента целевого функционала.
- 6. Информация о начальной дискретизации решаемой проблемы, необходимой точности интегрирования.
- 7. Лимит предоставленного для решения задачи времени центрального процессора.
- 8. Режим, в котором будет функционировать пакет программ.
- **2. Логическая структура пакета программ.** Специализированное программное обеспечение состоит из нижеприведенных функциональных подсистем.
 - 1. Фреймворк, позволяющий в единых стандартах программировать оптимизационные алгоритмы и обеспечивающий необходимую функциональность. Программное обеспечение создано на языке С с применением компилятора GCC, поддерживает работу в операционных системах Windows, Linux и MacOS.
 - 2. Библиотеки алгоритмов одномерной и многомерной оптимизации.
 - 3. Набор тестовых задач с известными решениями.
 - 4. Сервисные и инструментальные модули.
 - 5. Метакомпоненты.

Входные данные, составляющие постановку оптимизационной проблемы, заносятся в файл, написанный на языке программирования С. Затем модули программного пакета компилируются в исполняемый файл, представляющий собой программу, с помощью которой можно решить поставленную задачу. Выходные данные, сформированные в итоге, представляют собой коллекцию файлов с информацией о найденном решении, последовательности выполненных операций, статистике многократного запуска алгоритмов. Функциональные подсистемы разработанного программного обеспечения описаны ниже. Логическая структура пакета программ представлена на рис. 1.

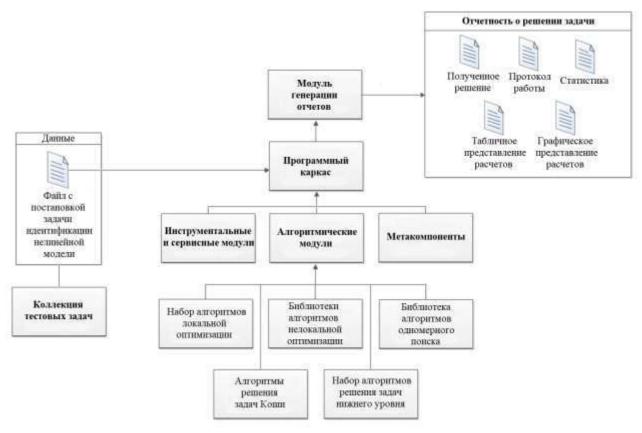


Рис. 1. Логическая структура разработанного пакета программ МЕОРТ

- **3. Реализованные функциональные подсистемы.** Алгоритмические модули пакета программ включают в себя нижеприведенные подсистемы, соответствующие подмодулям, приведенным на рис. 1.
 - 1. Библиотеки поисковых алгоритмов невыпуклой оптимизации (подмодуль «Библиотеки алгоритмов нелокальной оптимизации»).
 - а. Библиотека алгоритмов, основанных на методах одномерного глобального поиска: модификации методов «парабол», туннельного поиска, Пауэлла, параллельных касательных, Розенброка, криволинейного поиска, сферического поиска.
 - b. Набор поисковых алгоритмов, не использующих методы одномерного поиска: «случайных покрытий», поиска с запретами, Растригина, «экспертной оптимизации», Лууса–Яаколы.
 - с. Библиотека модификаций биоинспирированных алгоритмов: генетического поиска, дифференциальной эволюции, роя частиц, биогеографии, роя светлячков, опыления цветков, гармонического поиска, оптимизации по принципу «учительученик», культурного алгоритма.
 - 2. Коллекция алгоритмов решения проблем оптимизации функции одной переменной (подмодуль «Библиотека алгоритмов одномерного поиска»).
 - а. Библиотека алгоритмов одномерного глобального поиска.
 - b. Реализация комбинированного метода Брента для одномерного локального поиска.
 - 3. Набор алгоритмов многомерного локального поиска: BFGS, L-BFGS, методов сопряженных градиентов, декомпозиционного градиентного метода (подмодуль «Набор алгоритмов локальной оптимизации»).
 - 4. Библиотека алгоритмов решения задач Коши (подмодуль «Алгоритмы решения задач Коши»).

5. Коллекция алгоритмов решения вспомогательных задач нижнего уровня: генерации псевдослучайных чисел, вычисления интегралов, интерполяции фазовых координат и управлений по табличным значениям, решения систем линейных уравнений и т.п. (подмодуль «Набор алгоритмов решения задач нижнего уровня»).

Сервисные и инструментальные модули пакета программ состоят из нижеуказанных функциональных подсистем.

- 1. Средства протоколирования вычислительного процесса.
- 2. Средства создания контрольных точек процесса вычислений.
- 3. Средства расчета статистики по запускам алгоритмов.
- 4. Инструменты для табличного и графического представления результатов вычислительных экспериментов.
- 5. Инструменты проверки правильности аналитического представления градиента.
- 6. Процедуры построения разностных схем для градиентов.
- 7. Процедуры оценивания точности интегрирования.

Метакомпонентами пакета программ МЕОРТ являются следующие подсистемы.

- 1. Диалоговая система, реализующая интерфейс для пользователя.
- 2. Средства информирования и консультирования пользователя.
- 3. Инструменты управления входными данными.
- 4. Процедуры построения многометодных оптимизационных схем.
- 5. Механизмы настройки параметров алгоритмов.

Коллекция тестовых задач. Для апробации пакета программ МЕОРТ авторами разрабатывается специализированная библиотека оптимизационных задач.

4. Доступные режимы работы пакета программ.

Пакет программ МЕОРТ может функционировать в трех режимах: диалоговом, пакетном и режиме динамического планировщика.

В диалоговом режиме выбор алгоритмического обеспечения расчетов контролируется самим пользователем с помощью программного интерфейса.

В пакетном режиме, в отличие от диалогового, постановка оптимизационной проблемы и последовательность вычислительных процедур задаются пользователем перед эксплуатацией программного обеспечения и в процессе расчетов не настраиваются.

В режиме динамического планировщика автоматически генерируются многометодные схемы на основе оптимизационных алгоритмов из библиотеки. Методика обучения планировщика основана на поочередном запуске всех базовых глобализованных алгоритмов из одинаковых стартовых точек, вычислении оценок эффективности, определяемых как разность между рекордным и найденным алгоритмом значением целевой функции, и вероятностном перезапуске алгоритмов, имеющих наилучшие оценки. При этом для любого из базовых алгоритмов сохраняется ненулевая вероятность перезапуска, зависящая от суммируемого на итерациях вектора его оценок, в данном случае выступающего в качестве обучаемой модели. Алгоритмы локального поиска используются для периодического уточнения рекордного значения целевой функции методом, выбор которого также зависит недетерминированным образом от его успешности на предыдущих итерациях. Критерием останова работы планировщика является превышение заданного лимита времени.

Заключение. Пакет программ МЕОРТ для численного решения задач параметрической идентификации разработан с использованием языка С и компилятора GCC. Созданы библиотеки алгоритмов оптимизации, систематически разделенные на несколько подмножеств в зависимости от происхождения алгоритма. Все алгоритмы реализованы с использованием единых программных стандартов и интегрированы в пакет МЕОРТ. Доступны три режима работы разработанного программного комплекса: интерактивный, пакетный и режим

динамического планировщика. Проведено техническое тестирование первой версии программного обеспечения.

Список источников

- 1. Попов В.С. Комплекс программ для приближенного решения задач оптимального управления (описание применения) / В.С. Попов, Р.П. Федоренко. М.: ИПМ АН СССР, 1984. 56 с.
- 2. Диалоговый комплекс ДИСО. Раздел нелинейного программирования (версия 2) / Ю.Г. Евтушенко, О.П. Бурдаков, А.И. Голиков [и др.]. М.: ВЦ АН СССР, 1982. 88 с.
- 3. Грачев Н.И. Решение задач оптимального управления в системе ДИСО / Н.И. Грачев, А.Н. Фильков. М.: ВЦ АН СССР, 1986. 67 с.
- 4. Тятюшкин А.И. ППП КОНУС для оптимизации непрерывных управляемых систем / А.И. Тятюшкин // Пакеты прикладных программ: Опыт использования. М.: Наука, 1989. С. 63–83.
- Габасов Р. Пакет прикладных программ «Математическое программирование многомерных задач» / Р. Габасов, А.И. Тятюшкин, А.И. Жолудев [и др] // Алгоритмы и программы: Инф. Бюлл, 1986. – Т. 2. – № 71. – С. 33–67.
- 6. Горнов А.Ю. Численное решение задач оптимального управления в пакетном режиме / А.Ю. Горнов, А.И. Жолудев, А.И. Тятюшкин [и др] // Пакеты прикладных программ. Опыт разработки. Новосибирск: Наука, 1983. С. 3–17.
- 7. Гурман В.И. Приближенные методы оптимального управления / В.И. Гурман, В.А. Батурин, И.В. Расина. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 1983. 178 с.
- 8. Горнов А.Ю. Комплекс программ OPTCON для решения задач оптимального управления. Руководство пользователя / А.Ю. Горнов, А.О. Диваков. Иркутск: ИрВЦ СО РАН, 1990. 36 с.
- 9. Brauer G.L., Cornick D.E., Stevenson R. Capabilities and applications of the Program to Optimize Simulated Trajectories (POST). Program summary document. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1977, 140 p.
- 10. Vlases W.G. Optimal trajectories by implicit simulation. Technical Report WRDC-TR-90-3056. Seattle, Boeing Aerospace and Electronics, 1990.
- 11. Teo K.L., Goh C., Wong K. A unified computational approach to optimal control problems. New York, Longman Scientific & Technical, 1991, 294 p.
- 12. Milam M.B. Real-time optimal trajectory generation for constrained dynamical systems. Pasadena, California Institute of Technology, 2003, 161 p.
- 13. Rao A.V. Trajectory optimization: a survey. Optimization and optimal control in automotive systems, Cham, Springer, 2014, pp. 3–21.
- 14. Schweiger C.S., Floudas C.A. MINOPT: A software package for mixed-integer nonlinear optimization. Princeton, Princeton University, 1996.
- 15. Gerdts M. User's guide OC-ODE (version 1.4). Technical report. Würzburg, University of Würzburg, 2009.
- 16. Hirmajer T., Balsa-Canto E., Banga J.R. DOTcvpSB, a software toolbox for dynamic optimization in systems biology. BMC bioinformatics, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 1–14.
- 17. Kühl P. Muscod-ii users manual. Heidelberg, University of Heidelberg, 2007.
- 18. Andersson J.A.E. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control. Mathematical Programming Computation, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–36.
- 19. Rutquist P.E., Edvall M.M. Propt-matlab optimal control software. Tomlab Optimization Inc., 2010, vol. 260, no. 1, pp. 12.
- Falugi P., Kerrigan E., Van Wyk E. Imperial college London optimal control software user guide (ICLOCS).
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, London, England, UK, 2010, vol. 28.
- 21. Becerra V.M. Solving complex optimal control problems at no cost with PSOPT. 2010 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, IEEE, 2010, pp. 1391–1396.
- 22. Sauer Jr.C.G. MIDAS-Mission design and analysis software for the optimization of ballistic interplanetary trajectories. Journal of the Astronautical Sciences, 1989, vol. 37, pp. 251–259.
- 23. Hughes S. GMAT-Generalized Mission Analysis Tool, Greenbelt, NASA Goddard Space Flight Center, 2008.
- 24. Ocampo C. An architecture for a generalized spacecraft trajectory design and optimization system. Libration Point Orbits and Applications, 2003, pp. 529–571.
- 25. Betts J.T., Huffman W.P. Sparse optimal control software SOCS. Mathematics and Engineering Analysis Technical Document MEA-LR-085, Boeing Information and Support Services, The Boeing Company, PO Box, 1997, vol. 3707, pp. 98124–2207.

26. Von Stryk O. User's guide for DIRCOL: A direct collocation method for the numerical solution of optimal control problems, München, Technische Universität, 1999.

Сороковиков Павел Сергеевич, программист лаборатории 1.2. Оптимального управления, аспирант института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, год рождения: 1994, AuthorID: 1151746, SPIN-код: 7403-3014, ORCID: 0000-0002-5130-6603, pavel@sorokovikov.ru, 664033, Poccus, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Горнов Александр Юрьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории 1.2. Оптимального управления, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, год рождения: 1959, AuthorID: 110038, SPIN-код: 5146-0708, ORCID: 0000-0002-8340-5729, gornov@icc.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

UDC 519.622.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.005

MEOPT software package for solving non-convex problems of parametric identification

Pavel S. Sorokovikov, Alexander Yu. Gornov

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Russia, Irkutsk, pavel@sorokovikov.ru

Abstract. This paper considers the MEOPT software package created by the authors for the numerical study of non-convex parametric identification tasks. The developed software includes libraries of optimization algorithms and test problems, tool and service modules, and metacomponents. The implemented libraries of optimization algorithms include methods of multidimensional and one-dimensional non-convex optimization. The software was created in the C language using the GCC compiler and supports operation on Windows, Linux and MacOS operating systems. To date, the prototypes of the main modules of the package have been completed. Performed technical testing of the first version of the software.

Keywords: software package, parametric identification, dynamic models, optimization of dynamic systems

References

- 1. Popov V.S., Fedorenko R.P. Kompleks programm dlia priblizhennogo resheniia zadach optimal`nogo upravleniia (opisanie primeneniia) [A set of programs for the approximate solution of optimal control problems (application description)]. Moscow, IPM AS USSR, 1984, 56 p.
- 2. Evtushenko Yu.G., Burdakov O.P., Golikov A.I. et al. Dialogovyi kompleks DISO. Razdel nelinei`nogo programmirovaniia (versiia 2) [DIOS dialogue complex. Section of nonlinear programming]. Moscow, Computing Centre of the Academy of Sciencies, 1982, 88 p.
- 3. Grachev N.I., Filkov A.N. Reshenie zadach optimal`nogo upravleniia v sisteme DISO [Solution of optimal control problems in system DIOS]. Moscow, Computing Centre of the Academy of Sciencies, 1986, 67 p.
- 4. Tyatyushkin A.I. Paket prikladnykh programm: Opyt ispol'zovaniya [Application software packages: experience of use]. Pakety prikladnykh programm: Opyt ispol'zovaniya [Application Packages: Experience]. Moscow, Nauka, 1989.
- 5. Gabasov R., Tyatyushkin A.I., Zholudev A.I. et al. Paket prikladnykh programm «Matematicheskoe programmirovanie mnogomerny`kh zadach» [Application package "Mathematical programming of multidimensional problems"]. Algoritmy i programmy: Inf. Byull [Algorithms and programs: Information Bulletin], 1986, vol. 2, no. 71, pp. 33–67.
- 6. Gornov A.Yu., Zholudev A.I., Tyatyushkin A.I. et al. Chislennoye resheniye zadach optimal'nogo upravleniya v paketnom rezhime [Numerical solution of optimal control problems in batch mode]. Pakety` pricladny`kh programm. Opy`t razrabotki [Application software packages. Development experience]. Novosibirsk, Nauka, 1983.
- 7. Gurman V.I., Baturin V.A., Rasina I.V. Priblizhennyye metody optimal'nogo upravleniya [Approximate methods of optimal control]. Irkutsk, Irkutsk University, 1983, 178 p.

- 8. Gornov A.Yu., Divakov A.O. Kompleks programm OPTCON dlia resheniia zadach optimal`nogo upravleniia. Rukovodstvo pol`zovatelia [OPTCON software package for solving optimal control problems. User's manual]. Irkutsk, Irkutsk Computing Center, 1990, 36 p.
- 9. Brauer G.L., Cornick D.E., Stevenson R. Capabilities and applications of the Program to Optimize Simulated Trajectories (POST). Program summary document. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1977, 140 p.
- 10. Vlases W.G. Optimal trajectories by implicit simulation. Technical Report WRDC-TR-90-3056. Seattle, Boeing Aerospace and Electronics, 1990.
- 11. Teo K.L., Goh C., Wong K. A unified computational approach to optimal control problems. New York, Longman Scientific & Technical, 1991, 294 p.
- 12. Milam M.B. Real-time optimal trajectory generation for constrained dynamical systems. Pasadena, California Institute of Technology, 2003, 161 p.
- 13. Rao A.V. Trajectory optimization: a survey. Optimization and optimal control in automotive systems, Cham, Springer, 2014, pp. 3–21.
- 14. Schweiger C.S., Floudas C.A. MINOPT: A software package for mixed-integer nonlinear optimization. Princeton, Princeton University, 1996.
- 15. Gerdts M. User's guide OC-ODE (version 1.4). Technical report. Würzburg, University of Würzburg, 2009.
- 16. Hirmajer T., Balsa-Canto E., Banga J.R. DOTcvpSB, a software toolbox for dynamic optimization in systems biology. BMC bioinformatics, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 1–14.
- 17. Kühl P. Muscod-ii users manual. Heidelberg, University of Heidelberg, 2007.
- 18. Andersson J.A.E. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control. Mathematical Programming Computation, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–36.
- 19. Rutquist P.E., Edvall M.M. Propt-matlab optimal control software. Tomlab Optimization Inc., 2010, vol. 260, no. 1, pp. 12.
- Falugi P., Kerrigan E., Van Wyk E. Imperial college London optimal control software user guide (ICLOCS).
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, London, England, UK, 2010, vol. 28.
- 21. Becerra V.M. Solving complex optimal control problems at no cost with PSOPT. 2010 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, IEEE, 2010, pp. 1391–1396.
- 22. Sauer Jr.C.G. MIDAS-Mission design and analysis software for the optimization of ballistic interplanetary trajectories. Journal of the Astronautical Sciences, 1989, vol. 37, pp. 251–259.
- 23. Hughes S. GMAT-Generalized Mission Analysis Tool, Greenbelt, NASA Goddard Space Flight Center, 2008.
- 24. Ocampo C. An architecture for a generalized spacecraft trajectory design and optimization system. Libration Point Orbits and Applications, 2003, pp. 529–571.
- 25. Betts J.T., Huffman W.P. Sparse optimal control software SOCS. Mathematics and Engineering Analysis Technical Document MEA-LR-085, Boeing Information and Support Services, The Boeing Company, PO Box, 1997, vol. 3707, pp. 98124–2207.
- 26. Von Stryk O. User's guide for DIRCOL: A direct collocation method for the numerical solution of optimal control problems, München, Technische Universität, 1999.

Pavel S. Sorokovikov, laboratory programmer 1.2. of Optimal Control, PhD student at the Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, year of birth: 1994, AuthorID: 1151746, SPIN-code: 7403-3014, ORCID: 0000-0002-5130-6603, pavel@sorokovikov.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.

Alexander Yu. Gornov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory 1.2. of Optimal Control, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, year of birth: 1959, AuthorID: 110038, SPIN-code: 5146-0708, ORCID: 0000-0002-8340-5729, gornov@icc.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.

Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 10.06.2022.

The article was submitted 05/26/2022; approved after reviewing 06/03/2022; accepted for publication 06/10/2022.

УДК 621.331

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.006

Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами

Крюков Андрей Васильевич, Черепанов Александр Валерьевич, Крюков Александр Егорович

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

Аннотация. При проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения (СТЭ) особое внимание уделяется вопросам безопасности функционирования объектов транспортной электроэнергетики. Одним из определяющих факторов таких воздействий является возможность появления наведенных напряжений на протяженных металлических конструкциях, расположенных вдоль трассы железной дороги. В современных условиях, характеризующихся масштабным использованием средств цифровизации, выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования, поэтому необходима разработка алгоритмов определения наведенных напряжений, которые создаются тяговыми сетями. Для этого могут применяться цифровые модели, в основу которых положены методы определения режимов СТЭ, реализованные в программном комплексе Fazonord. В статье описаны компьютерные модели, позволяющие определять наведенные напряжения на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами, которые применяются в целях электрохимической защиты сооружения. Практическое использование этих моделей позволит обоснованно выбирать мероприятия по снижению негативных воздействий наведенных напряжений на персонал, осуществляющий обслуживающий сооружения.

Ключевые слова: тяговые сети железных дорог, трубопровод с изолирующими фланцами, моделирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 61-68. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.006.

Введение. Вблизи электрифицированных железных дорог (ЭЖД) могут располагаться протяженные металлические конструкции, в частности, трубопроводы, применяемые для транспорта жидких и газообразных продуктов. Электромагнитные влияния тяговой сети (ТС) могут приводить к возникновению наведенных напряжений на деталях сооружения. В ряде случаев эти напряжения превышают допустимые уровни в 60 В, установленные нормативными документами [1]. Решение задач определения электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопровод посвящен целый ряд работ. Так, например, в статье [2] проанализировано электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на токопроводящие конструкции. Теория и аналитические методы расчета электромагнитных влияний ЭЖД на металлические сооружения представлены в книгах [3, 4]. Методика определения наведенных напряжений на протяженных коммуникациях описана в статье [5]. Анализ низкочастотных электромагнитных полей и индуцированных напряжений в подземном трубопроводе приведен в работе [6].

Результаты, представленные в перечисленных выше работах, а также анализ процессов в сложной системе, образованной многопроводной тяговой сетью и трубопроводом, позволяют сделать следующие выводы:

- актуальность задачи определения наведенных напряжений, создаваемых в результате электромагнитных влияний ТС на протяженные металлические конструкции, не вызывает сомнений, так как воздействие этих напряжений на персонал может приводить к тяжелым электротравмам [7, 8];
- корректное определение наведенных напряжений требует учета целого ряда факторов,

таких, как: режим работы ТС; траектория сближения трасс ЭЖД и трубопровода; размеров коридора сближения; характеристики заземления трубопровода; протяженность совместного прохождения ТС и трубопровода; проводимость грунтов на трассе сближения [9, 10];

• применяемая методика определения электромагнитных влияний должна корректно работать в ближней, промежуточной и дальней зонах [11, 12] интеграла Карсона [13].

Для обеспечения безопасности персонала, обслуживающего трубопровод на участках, находящихся в зонах повышенных электромагнитных влияний ТС, необходимо применять специальные мероприятия [4, 14]. В условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики [15] выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования, для осуществления которого необходима разработка адекватных цифровых моделей. Такие модели могут быть реализованы на основе методов, предложенных в работах [10, 16].

Ниже представлены результаты разработки таких моделей применительно к трубопроводу, оборудованному изолирующим фланцем [17]. Такие фланцы используются в системах электрохимической защиты [18].

Методика и результаты моделирования. Для создания цифровых моделей многопроводной системы, включающей тяговую сеть и трубопровод, использовались методы моделирования СТЭ в фазных координатах [10, 16] и программный продукт Fazonord [19]. Рассматривалась типичная СТЭ, часть схемы которой показана на рис. 1.

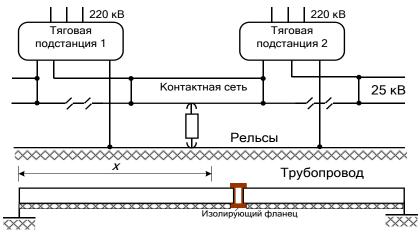


Рис. 1. Схема сближения тяговой сети 25 кВ и трубопровода, оборудованного изолирующим фланцем, расположенным на расстоянии 30 км от левой ТП

Система электроснабжения ЭЖД содержала следующие элементы: внешнюю сеть, выполненную линиями электропередачи 220 кВ; три тяговых трансформатора ТДТНЖ-40000/220/27,5; тяговую сеть 25 кВ, трубопровод диаметром 250 мм, расположенный на расстоянии 100 м от трассы ЭЖД. На этом сооружении предполагалось наличие распределенного заземления 0,05 см/км, а также стационарных заземлителей по краям участка сооружения с сопротивлением растеканию в один ом. На расстоянии 30 км от левой ТП предполагалось наличие изолирующего фланца, который моделировался RL — элементом с активным сопротивлением в 1 МОм. Часть схемы расчетной модели показана на рис. 2.

Результаты моделирования представлены на рис. 3-9. На рис. 3 показаны графики временных зависимостей наведенных напряжений U_1 основной частоты в месте установки изолирующего фланца.

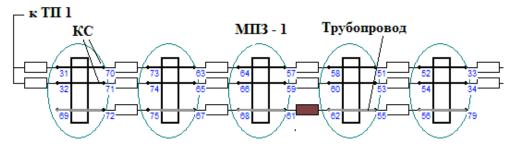


Рис. 2. Часть схемы расчетной модели:

МПЗ – межподстанционная зона; ТП – тяговая подстанция; КС – контактная сеть

На рис. 4 приведены аналогичные графики для эффективных напряжений высших гармоник (ВГ) U_{hg} , а на рис. 5 — для результирующих наведенных напряжений U_{Σ} с учетом ВГ.

Эти параметры рассчитывались по формулам:

$$U_{hg} = \frac{U_1 k_U}{100};$$
 $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2},$

где k_{U} – суммарный коэффициент ВГ.

При моделировании электромагнитных влияний корректно учитывались ближняя, промежуточная и дальняя зоны интеграла Карсона [20].

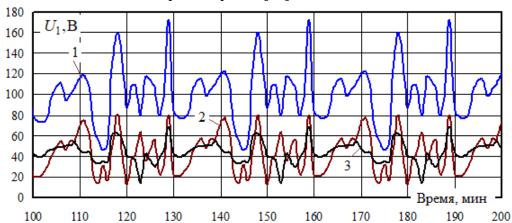


Рис. 3. Графики зависимостей наведенных напряжений основной частоты от времени: 1 — напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 — напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 — напряжение при шунтировании разрыва

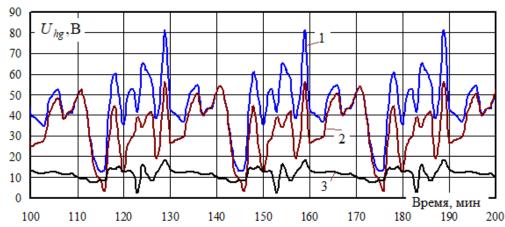


Рис. 4. Графики зависимостей эффективных значений наведенных напряжений ВГ от времени: 1 — напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 — напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 — напряжение при шунтировании разрыва

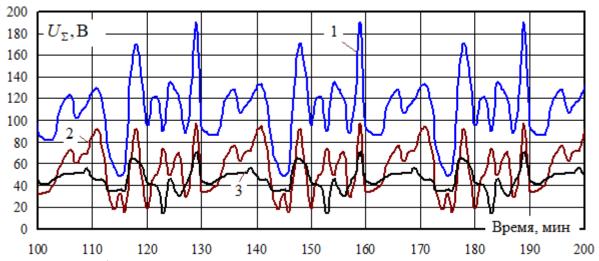


Рис. 5. Графики зависимостей суммарных наведенных напряжений от времени: 1 — напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 — напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 — напряжение при шунтировании разрыва

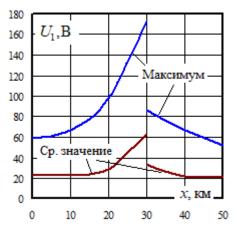


Рис. 6. Графики зависимостей наведенных напряжений основной частоты от координаты x

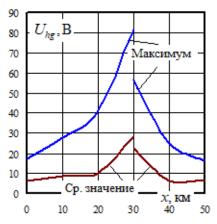


Рис. 7. Графики зависимостей эффективных значений наведенных напряжений высших гармоник от координаты x



Рис. 8. Графики зависимостей суммарных наведенных напряжений от координаты x

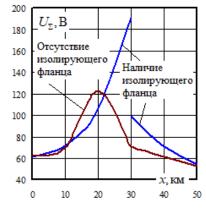


Рис. 9. Сравнительные графики максимумов суммарных наведенных напряжений

Результаты моделирования, представленные на рис. 3–9, позволяют сформулировать следующие выводы:

- интенсивная динамика изменений тяговых нагрузок приводит к значительным вариациям наведенных напряжений основной частоты (рис. 3), эффективных значений U_{hg} (рис. 4) и результирующих величин U_{Σ} (рис. 5);
- наведенные напряжения в отдельных точках трубы превышают допустимый уровень в 60 В [1]; для их снижения можно использовать экранирующие провода [21] или отсасывающие трансформаторы [22];
- в месте установки изолирующего фланца зависимости максимальных и средних значений $U_1 = U_1(x)$, $U_{hg} = U_{hg}(x)$, $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(x)$ имеют разрывы; наибольшие наведенные напряжения наблюдаются на левом конце трубы, примыкающем к фланцу;
- при отсутствии фланца напряжения в точке с координатой x = 30 км в два с половиной раза меньше; таким образом, наличие электрического разрыва трубы ухудшает условия электробезопасности.

Заключение. Разработаны цифровые модели для определения наведенных напряжений на трубопроводе, оборудованном изолирующим фланцем. Модели могут применяться в практике проектирования и эксплуатации трубопроводов для разработки мероприятий по снижению электромагнитных влияний тяговых сетей магистральных ЭЖД переменного тока.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020.

Список источников

- 1. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
- 2. Котельников А.В. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции / А В. Котельников, А.Б. Косарев // Электричество, 1992. № 9. С. 26-34.
- 3. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения / И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 248 с.
- 4. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы / М.П. Ратнер. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
- 5. Коннова Е.И. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации / Е.И. Коннова, А.Б. Косарев // Вестник ВНИИЖТ, 1990. № 2. С. 17-19.
- 6. Milesevic B., Filipovic-Grcic B. and Radosevic T., "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline," Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011, pp. 1-7.
- 7. Мисриханов М.Ш. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, А.О. Мирзаабдулаев // Электрические станции, 2008. № 11. С. 44-49.
- 8. Мисриханов М.Ш. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений / М. Ш. Мисриханов, В. А. Попов, Р. В. Медов [и др.] // Электрические станции, 2003. № 1. С. 47—55.
- 9. Закарюкин В.П. Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Ты Нгуен // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2016. № 2(62). С. 115-123.
- 10. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. Power Technology and Engineering, 2015, vol. 49, no. 4, p. 304-309.
- 11. Мисриханов М.Ш. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, С.Г. Мурзин, В.Н. Седунов [и др.] // Известия Самарского научного центра

- PAH, 2012. №5(3). T. 14. C. 808-814.
- 12. Мисриханов М. Ш. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, А. Ю. Токарский // Электро, 2010. №3. С. 13-18.
- 13. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Techn. J., 1926, v. 5, p. 539-554.
- 14. Косарев А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. М.: Интекст, 2008. 480 с.
- 15. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития / Я.В. Василенко // Проблемы российской экономики на современном этапе. М., 2020. С. 105-111.
- 16. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
- 17. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management. Communicates, Electronic and Automation Conference (IM-CEC), 2018, pp. 1186-1189, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469489.
- 18. Зиневич А.М. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А. М. Зиневич, В.И. Глазков, В.Г. Котик. М.: Недра, 1975. 288 с.
- 19. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В. П., Крюков А. В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.
- 20. Закарюкин В.П. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2015. № 3-4. С. 29-35.
- 21. Бочев А.С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного тока / А.С. Бочев, Т.П. Добровольскис, В.А. Мишель // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, − 1990. № 8. С. 17-20.
- 22. Павлов И.В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока / И.В. Павлов. М.: Транспорт, 1965. 204 с.

Крюков Андрей Васильевич, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, and_kryukov@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Черепанов Александр Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, smart_grid@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Крюков Александр Егорович, студент, Иркутский государственный университет путей сообщения, appleforevor@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.331

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.006

Simulation of induced voltages generated by a traction 25 kV network on a pipeline equipped with insulating flanges

Andrey V. Kryukov, Alexander V. Cherepanov, Alexander E. Kryukov

Irkutsk State Transport University,

Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. When designing and operating traction power supply systems (TPS), special attention is paid to the safety of the operation of transport power facilities. One of the determining factors of such impacts is the possibility of the appearance of induced stresses on extended metal structures located along the railway route. In modern conditions, characterized by the large-scale use of digitalization tools, the choice of such activities

should be based on computer simulation. Therefore, it is necessary to develop algorithms for determining the induced voltages that are created by traction networks. For this, digital models can be used, which are based on the methods for determining the TPS modes implemented in the Fazonord software package. The article describes computer models that make it possible to determine the induced voltages on a pipeline equipped with insulating flanges, which are used for the purpose of electrochemical protection of a structure. The practical use of these models will make it possible to reasonably choose measures to reduce the negative effects of induced voltages on personnel servicing the structure.

Key words: railway traction networks, pipeline with insulating flanges, modeling

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state task "Conducting applied scientific research" on the topic "Improving the quality of electrical energy and electromagnetic safety in power supply systems of railway transport equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates", project no. AAAA-A20-120111690029-4 dated 11/16/2020.

References

- 1. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
- 2. Kotelnikov A. V., Kosarev A. B. Elektromagnitnoye vliyaniye tyagovykh setey peremen-nogo toka na metallicheskiye konstruktsii [Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures]. Elektrichestvo [Electricity], 1992, no. 9, pp. 26-34.
- 3. Strizhevsky I. V., Dmitriev V. I. Teoriya i raschet vliyaniya elektrifitsirovannoy zheleznoy dorogi na podzemnyye metallicheskiye sooruzheniya [Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures]. M.:Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1967, 248 p.
- 4. Ratner MP Induktivnoye vliyaniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na elektricheskiye seti i truboprovody [Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines]. M.: Transport, 1966, 164 p.
- 5. Konnova E. I., Kosarev A. B. Raschet elektromagnitnogo vliyaniya setey peremennogo toka na metallicheskiye kommunikatsii [Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications]. Vestnik VNIIZhT, 1990, no. 2, pp. 17-19.
- 6. Milesevic B., Filipovic-Grcic B. and Radosevic T., "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline," Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Ener-getics (IYCE), 2011, pp. 1-7.
- Misrikhanov M. Sh., Mirzaabdulaev A. O. Analiz prichin neschastnykh sluchayev i mer zashchity ot navedennogo napryazheniya na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Analysis of the causes of accidents and protection measures against induced voltage on overhead power lines]. Elektricheskie stantsii [Power stations]. 2008, no. 11, pp. 44-49.
- 8. Modelirovaniye vozdushnykh liniy elektroperedachi dlya rascheta navedennykh napryazheniy [Modeling of overhead power lines for calculating induced voltages]. Elektricheskiye stantsii [Power stations]. 2003, no. 1, pp. 47–55.
- 9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ty Nguyen. Opredeleniye navedennykh napryazheniy pri slozhnykh trayektoriyakh sblizheniya tyagovoy seti peremennogo toka i smezhnoy linii [Determination of induced voltages at complex trajectories of convergence of an alternating current traction network and an adjacent line]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2016, no. 2(62), pp. 115-123.
- 10.Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Opredeleniye navedennykh napryazheniy pri slozhnykh trayektoriyakh sblizheniya tyagovoy seti peremennogo toka i smezhnoy linii. Power Technology and Engineering, 2015, vol. 49, no. 4, p. 304-309.
- 11. Misrikhanov M.SH., Murzin S.G., Sedunov V.N. Navedennyye prodol'nyye napryazheniya v parallel'nykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Induced longitudinal voltages in parallel overhead power lines]. Izvesti-ya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012, no. 5(3), vol. 14, pp. 808-814.
- 12. Misrikhanov M.Sh., Tokarsky A.Yu. Uchet provodimosti zemli pri opredelenii EDS, navedennykh v parallel'nykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Accounting for the conductivity of the earth in determining the EMF induced in parallel overhead power lines]. Elektro [Electro]. 2010, no.3, pp. 13-18.
- 13.Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Techn. J., 1926, v. 5, p. 539-554.

- 14. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektro-snabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. M.: Intekst, 2008, 480 p.
- 15. Vasilenko Ya. V. Tsifrovizatsiya rossiyskoy elektroenergetiki: sovremennoye sostoya-niye i perspektivy razviti-ya [Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects]. Problemy rossiyskoy ekonomiki na sovremennom etape [Problems of the Russian economy at the present stage]. M., 2020. pp. 105-111.
- 16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005, 273 p.
- 17.17. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management. Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IM-CEC), 2018, pp. 1186-1189, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469489.
- 18. Zinevich A. M., Glazkov V. I., Kotik V. G. Zashchita truboprovodov i rezervuarov ot korrozii [Protection of pipelines and reservoirs against corrosion]. Moscow: Nedra, 1975, 288 p.
- 19. Witness. about official register. computer program No. 2007612771 (RF) "Fazonord-Quality Calculations of power quality indicators in power supply systems in phase coordinates, taking into account the movement of trains" / Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Federal Service for Intellectual Property, Patents and trademarks. Perregister 06/28/2007.
- 20. Zakaryukin V.P., Kryukov A. V. Utochnennaya metodika opredeleniya vzaimnykh elek-tromagnitnykh vliyaniy smezhnykh liniy elektroperedachi [Refined method for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines]. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki [Izvestiya vuzov. Energy problems]. 2015, no. 3-4, pp. 29-35.
- 21. Bochev A.S., Dobrovolskis T. P., Michel V. A. Effektivnost' ekraniruyushchikh provodov mnogoprovodnoy tyagovoy seti peremennogo toka [Efficiency of shielding wires of a multi-wire AC traction network]. Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the All-Union Research Institute of Railway Transport]. 1990, no. 8, pp. 17-20.
- 22. Pavlov I.V. Otsasyvayushchiye transformatory v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Suction transformers in AC traction networks]. M.: Transport, 1965. 204 p.

Andrey V. Kryukov, dr., Professor, Professor of Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, professor of Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, and kryukov@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Alexander V. Cherepanov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, smart_grid@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Alexander E. Kryukov, student, Irkutsk State Transport University, appleforevor@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Статья поступила в редакцию 08.04.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 06.05.2022.

The article was submitted 04/08/2022; approved after reviewing 04/15/2022; accepted for publication 05/06/2022.

УДК 681.5

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.007

Киберфизическая безопасность прогностических алгоритмов в групповых регуляторах установок распределенной генерации

Булатов Юрий Николаевич¹, Крюков Андрей Васильевич^{2,3}, Суслов Константин Витальевич³

¹Братский государственный университет, Россия, Братск, bulatovyura@yandex.ru

Аннотация. Широкое применение в электроэнергетических системах установок распределенной генерации (РГ) требует решения сложной задачи настройки их регуляторов. В статье предлагается использовать прогностические алгоритмы управления, позволяющие существенно упростить ее решение. На основе линейного прогнозирующего звена рассматриваются различные структуры и модели прогностических регуляторов напряжения и частоты, как для отдельных агрегатов станции, так и для группового регулирования.

Реализация прогностических алгоритмов в регуляторах установок РГ возможна на базе микропроцессорных систем. В связи с этим, требуется изучить влияние несанкционированного изменения постоянной времени прогнозирующего звена в результате кибератаки на работу систем управления синхронных генераторов. Цель представленного исследования состояла в определении работы линейных прогностических алгоритмов в групповых регуляторах напряжения и частоты при изменении времени прогноза. Моделирование выполнялось в системе МАТLAB, результаты которого показали, что при внезапном изменении времени прогноза у групповых регуляторов напряжения и частоты генераторов малой гидроэлектростанции ухудшаются показатели качества управления с возможной потерей устойчивости. Показано, что для предотвращения таких ситуаций необходимо использовать аппаратное ограничение времени прогноза, обеспечивающего недопустимость работы с отрицательными значениями постоянных времени прогнозирующих звеньев. Кроме того, ограничение постоянных времени прогноза до значения п, определяющего количество генераторов в группе, дает лучшие результаты по качеству управления в переходном процессе.

Ключевые слова: установки распределенной генерации, прогностические алгоритмы управления, групповые регуляторы напряжения и частоты, киберфизическая безопасность, моделирование

Цитирование: Булатов Ю.Н. Киберфизическая безопасность прогностических алгоритмов в групповых регуляторах установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 69-84. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.007.

Введение. В настоящее время активно развивается направление, связанное с использованием в электроэнергетике установок распределенной генерации (РГ) [1–5], применение которых позволяет уменьшить нагрузки питающей сети, снизить потери, повысить надежность электроснабжения потребителей и качество электроэнергии [6]. Однако внедрение установок РГ требует решения множества задач, одной из которых является оптимизация настроек автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и скорости (АРС) синхронных генераторов с целью обеспечения их надежной и устойчивой работы. Для этого могут применяться интеллектуальные технологии, например, генетические алгоритмы. В работе [7] представлена реализация настройки пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора с использованием следующих эвристических методов: дифференциальная эволюция и генетический алгоритм. В работах [8, 9] для настройки ПИД регуляторов применяются усовершенствованные генетические алгоритмы. Определение оптимальных настроек систем автоматического управления требует решения таких задач, как идентификация динамического объекта и расчёт взаимосвязанных параметров настройки регуляторов, обеспечивающих заданный критерий оптимальности. Однако полученная настройка регуляторов с типовыми

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

линейными законами управления, широко используемыми на практике, может оказаться неоптимальной в результате изменения режима работы объекта. Поэтому необходимо определять оптимальные настройки регуляторов для всех возможных режимов работы динамического объекта, что связано с трудоемкими расчётами большого количества взаимосвязанных параметров.

Существует и другой подход, использующий прогностические алгоритмы [10], обеспечивающие работу регулятора по рассчитанному прогнозу погрешности управления. Модели прогностического управления применяются в силовой электронике [11, 12], в управлении асинхронными [13, 14] и синхронными двигателями [15, 16]. В представленных работах используются сложные прогнозирующие модели с конечным набором управлений, требующие для реализации микропроцессорной техники и сложных вычислений. В то же время достаточно просто реализуется прогнозирование с помощью линейной модели по двум значениям регулируемой величины: текущему и предыдущему. Сравнение различных прогностических методов, приведенное в работе [17], показывает, что линейные алгоритмы способны конкурировать с лучшими нелинейными. В статье [18] приводится универсальный безпоисковый метод настройки линейных прогностических ПИД регуляторов. Результаты многочисленных исследований показывают преимущества линейной прогнозирующей модели в ПИД регуляторах. Например, в работе [19] линейные прогностические ПИД регуляторы эффективно применяются в одноконтурной системе управления котлового пароперегревателя. В работе [20] показаны преимущества системы управления с модулем прогнозирования и даны рекомендации по выбору оптимального времени прогнозирования для регулирования теплового процесса. Большую эффективность дает применение линейных прогностических регуляторов для управления следующими типами установок РГ: газотурбинной [21], турбогенераторной [22] и гидрогенераторной [23]. Исследования, представленные в этих работах, показывают, что применение линейной прогнозирующей модели в АРВ и АРС позволяет значительно улучшить показатели качества управления без решения трудоемкой задачи настройки регуляторов.

Построение и реализация прогностических алгоритмов управления в регуляторах установок РГ возможны на базе микропроцессорных АРВ и АРС, в которых при поступлении измеренных параметров установки РГ выполняются необходимые вычисления. В результате этих вычислений формируются управляющие воздействия для оптимальной работы установки РГ в текущем режиме. Таким образом, рассматриваемая кибер-физическая система в виде установки РГ с прогностическими регуляторами состоит из двух взаимосвязанных частей: физической, в которую входят генераторы, турбины, возбудители и управляющие элементы; информационно-управляющей, в которой выполняются необходимые измерения, вычисления и передача управляющих сигналов, а в прогностических регуляторах — и времени прогноза. В связи с этим, требуется изучить влияние несанкционированного изменения постоянной времени прогнозирующего звена на работу систем управления синхронными генераторами. Такое изменение времени прогноза может иметь место в результате кибератаки.

Ниже представлено описание метода регулирования напряжения и частоты для группы синхронных генераторов небольшой мощности с использованием прогностических регуляторов. Также приведено описание компьютерных моделей и предлагаемых групповых прогностических регуляторов. Цель исследований состояла в определении правильности работы линейных прогностических алгоритмов управления в групповых регуляторах напряжения и частоты в случае несанкционированного изменения времени прогноза. Моделирование выполнялось в системе MATLAB на компьютерной модели малой гидроэлектростанции (ГЭС) с тремя генераторами.

1. Метод построения прогностических регуляторов напряжения и частоты синхронных генераторов. Использование алгоритма прогнозирования в составе типовых регу-

ляторов (например, APB и APC) позволяет осуществить их настройку с помощью одного параметра — времени прогноза. В этом случае линейный прогностический ПИД регулятор состоит из двух соединенных последовательно звеньев: самого ПИД регулятора и линейного прогнозирующего звена.

Передаточная функция линейного прогнозирующего звена представляется в следующем виде [17]:

$$W_p(s) = T_p s + 1, \tag{1}$$

где T_p — постоянная времени прогнозирующего звена; s — оператор Лапласа.

Определение постоянных времени прогнозирующих звеньев регуляторов отдельных агрегатов осуществляется по частоте собственных колебаний ротора одного из генераторов [24, 25], выбранного в качестве ведущего

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{\omega_0}{T_{je}} \cdot \frac{E_q \cdot U_G}{X_d} \cdot \cos \delta}}{2\pi},$$
 (2)

где U_G — напряжение генератора, о.е.; δ — угол между напряжением и ЭДС генератора E_q (угол нагрузки генератора), эл. град.; X_d — индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.; ω_0 — номинальная частота вращения ротора генератора, рад/с; T_{je} — эквивалентная постоянная механической инерции агрегата, с.

Постоянные времени прогнозирующих звеньев в регуляторах синхронных генераторов определяются величиной обратно пропорциональной f_p , т.е. $T_p = 1/f_p$. Структурная схема предлагаемой системы регулирования напряжения и частоты с помощью прогностических APB и APC для отдельного агрегата показана на рис. 1, в которой блокам отвечают следующие передаточные функции: W_{Γ} – для синхронного генератора; W_B – для возбудителя; W_T – для турбины; W_{APB} – для APB; W_{APC} – для APC; W_p – для линейного прогнозирующего звена.

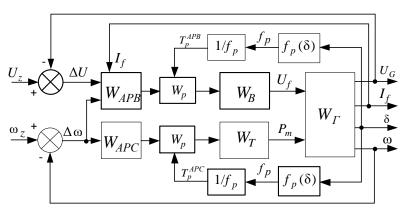


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования напряжения и частоты с прогностическими APB и APC

На рис.1 также обозначены следующие переменные: U_z — заданное значение напряжения генератора; ΔU — отклонение напряжения от заданного значения; U_f — напряжение на обмотке возбуждения; ω_z — заданное значение скорости вращения ротора; $\Delta \omega$ — отклонение текущего значения частоты ω от заданного значения; P_m — механическая мощность на валу турбины; I_f — ток в обмотке возбуждения. Согласно выражению (2) частота f_p и постоянная времени прогнозирующего звена T_p зависят от угла нагрузки δ синхронного генератора. При

изменении режима работы предлагаемая на рис. 1 система регулирования автоматически вычисляет время прогноза и перенастраивает прогнозирующие звенья для APB и APC.

Один из генераторов в группе однотипных агрегатов установки РГ принимается в качестве ведущего и постоянные времени всех прогнозирующих звеньев определяются по углу его нагрузки δ . Использование такого метода позволяет построить групповой прогностический автоматический регулятор скорости (ГПАРС) и групповой прогностический автоматический регулятор напряжения (ГПАРН) с одинаковыми постоянными времени прогноза. На рис. 2 показана структурная схема группового регулирования для прогностических АРВ и АРС. Воздействие регуляторов на генераторы выполняется через прогнозирующие звенья W_p^{APB} и W_p^{APC} , постоянные времени которых вычисляются автоматически и корректируются в случае изменения нагрузочного режима.

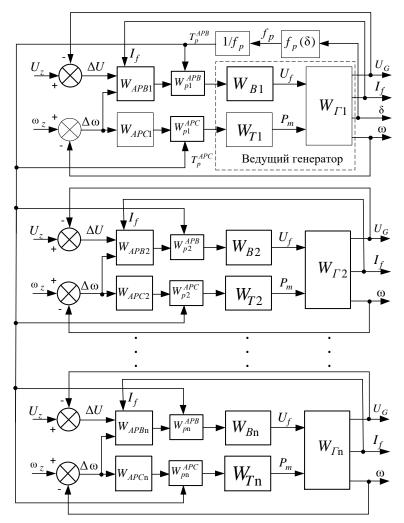


Рис. 2. Структурная схема группового регулирования для прогностических APB и APC: n – число агрегатов в группе

Предлагаемые структуры прогностических систем регулирования напряжения и частоты можно выполнить при модернизации классических APB и APC для различных установок PГ: турбогенераторных, гидрогенераторных, газотурбинных, дизельных и др.

Из представленной на рис. 2 структуры системы группового регулирования напряжения и частоты установки РГ видно, что постоянная времени для всех прогнозирующих звеньев определяется в вычислительной системе ведущего генератора, которая может быть реализована в микропроцессорных APB и APC, и передается по каналам связи на локальные прогностические регуляторы всех агрегатов. Таким образом, существует вероятность не-

санкционированного изменения времени прогноза в результате кибератаки на рассматриваемую информационно управляющую систему установки РГ, киберуязвимость которой состоит в возможных ошибках программирования цифровых регуляторах, подмене измеренных и вычисленных параметров настройки регуляторов, а также в передающихся по каналам связи параметров и управляющих воздействий, в том числе и времени прогноза.

2. Описание компьютерной модели малой ГЭС с групповыми прогностическими регуляторами. Исследования проводились на компьютерной модели малой гидроэлектростанции (ГЭС), имеющей связь через линию электропередачи (ЛЭП) длиной 5 км с электроэнергетической системой (ЭЭС) большой мощности (рис. 3). Компьютерная модель исследуемой системы, схема которой показана на рис. 4, создана в среде MATLAB с использованием пакетов Simulink и SymPowerSystems. В модели также учитываются APB и APC (блоки PAVR и ASR на рис. 4), групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты (блоки GPASR и GPAVR на рис. 4). Компьютерная модель позволяет измерять все указанные на рис. 4 параметры сети.

Модель малой ГЭС состояла из трех гидрогенераторов мощностью 3,125 MB А каждый и напряжением 6,3 кВ. На приемном конце ЛЭП подключалась нагрузка 9,3+j1,8 MB А (рис. 3). В модели имелась возможность вносить следующие возмущения: внезапное изменение времени прогноза у ГПАРН и ГПАРС; отключение питания от ЭЭС; кратковременное и удаленное от генераторов трехфазное короткое замыкание (КЗ).

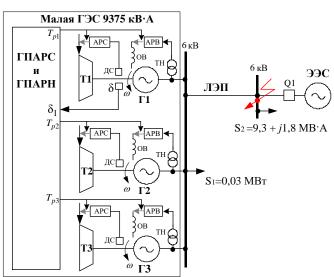


Рис. 3. Схема исследуемой системы: OB — обмотка возбуждения; TH — трансформатор напряжения; ДС — датчик скорости; Г — генератор; Т — турбина

Модель гидротурбины с учетом главного сервомотора (блоки Hydraulic Turbine на рис. 4) представлена следующей передаточной функцией [25]:

$$\frac{0.1s+1}{0.025s^2+1.35s+1} \cdot \frac{1-N \cdot 0.344s}{1+N \cdot 0.172s},$$

где s — оператор Лапласа; N — открытие направляющего аппарата (принимает значения от 0 до 1). Возбудителю синхронного генератора (блок Exciter на рис.4) отвечала передаточная функция, характерная для тиристорной схемы [25]:

$$\frac{1}{0,025\,s+1}\,.$$

Синхронный генератор моделировался с помощью трехфазной синхронной машины, входящей в состав пакета SimPowerSystems системы MatLab. Основные параметры генераторов (блоки Synchronous Machine на рис. 4) следующие: номинальная мощность S = 3,125

МВ·А; номинальное напряжение U=6300 В; ЭДС генератора $E_q=1,1$ о.е.; частота f=50 Гц; коэффициент инерции (инерционная постоянная) H=2,279 с; число пар полюсов, p=3; индуктивное сопротивление генератора по продольной оси $X_d=2,84$ о.е. Эквивалентная постоянная механической инерции агрегата $T_{je}=5,002$ с. В соответствии с указанными параметрами постоянные времени прогнозирующих звеньев ГПАРС и ГПАРН определялись по выражению: $T_p=1/0,785\cdot\sqrt{\cos\delta}$.

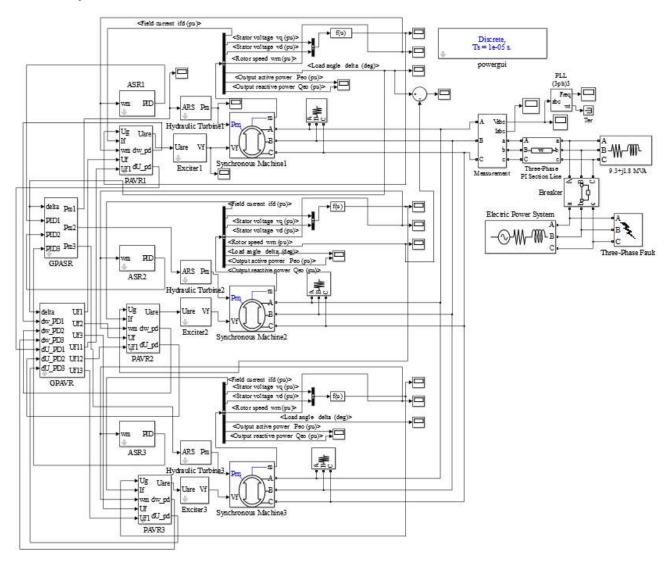


Рис. 4. Схема компьютерной модели в MATLAB

Схема модели локальных APC представлена на рис. 5. Она состоит из блоков, определяющих коэффициенты усиления и передаточные функции отдельных каналов регулирования ПИД регулятора, выход которого P_m подключается на вход ГПАРС, обозначенный как PID (рис. 4).

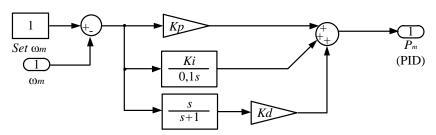


Рис. 5. Схема модели локального APC: $Set \omega_m$ – уставка по скорости вращения ротора

Схема модели локального APB показана на рис. 6. Прогнозирующие звенья в APB предлагается установить отдельно в каналы регулирования по напряжению и частоте, обозначенные как входы у ГПАРН dU_PD и dw_PD (рис. 4). Пройдя через ГПАРН, сигнал управления возвращается в локальные APB на входы Uf1 и Uf (рис. 6).

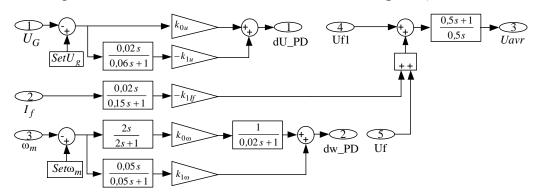


Рис. 6. Схема модели локального APB: Set U_g – уставка по напряжению

При моделировании использовались следующие коэффициенты настройки регуляторов: для APC K_p =7,55; K_i =2 и K_d =0,75; для APB k_{0u} = 100; k_{Iu} = 50; k_{Ilf} = 0; k_{0w} = 1,28; k_{Iw} = 0,73.

Блоки вычисления постоянной времени прогнозирующих звеньев имели общую связь по входу угла нагрузки δ ведущего генератора. Схемы компьютерных моделей ГПАРС и ГПАРН показаны на рис. 7.

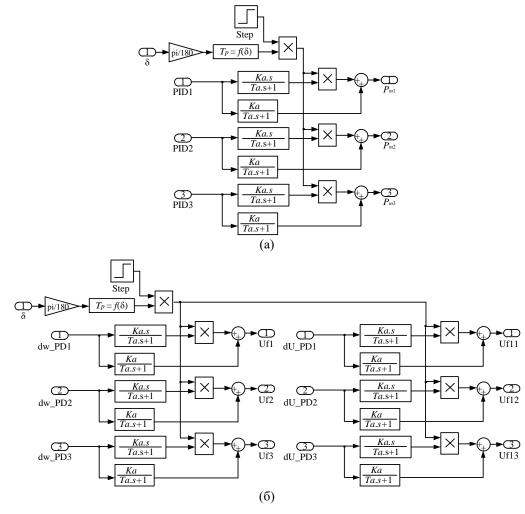


Рис. 7. Схемы моделей ГПАРС (а) и ГПАРН

Отдельное для каждого генератора линейное прогнозирующее звено с передаточной функцией, определяемой выражением (1), моделировалось при последовательном соединении с усилителем с передаточной функцией $\frac{K_a}{T_a s+1}$, что равнозначно параллельному соеди-

нению блока $\frac{K_a \ s}{T_a s + 1}$, умноженного на время прогноза T_p , и блока усилителя с передаточной

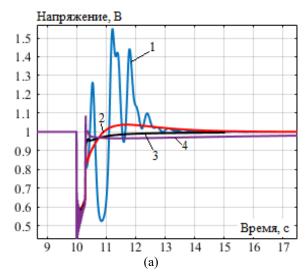
функцией $\frac{K_a}{T_a s + 1}$. Это реализовано в схемах ГПАРС и ГПАРН для возможности автоматиче-

ского изменения времени прогноза при вариации нагрузочного режима генератора. Параметры блоков при моделировании принимались следующими: K_a =1; T_a =0,001 с. Блок Step использовался для имитации внешнего изменения времени прогноза.

В соответствии с представленными на рис. 4–7 схемами устройств регулирования и их соединения, воздействия на гидротурбины отдельных агрегатов выполняются через прогнозирующие звенья ГПАРС, входными сигналами которого являются выходные сигналы локальных АРС генераторов (PID1, PID2, PID3 на рис. 7 а) и угол нагрузки δ ведущего генератора. Отличительной чертой ГПАРН является то, что его прогнозирующие звенья получаются встроенными в отдельные каналы регулирования локальных АРВ генераторов.

Исходная загрузка каждого генератора составляла 50 %. Моделирование выполнялось для следующих режимов:

- 1) внезапное изменение времени прогноза у ГПАРС и (или) ГПАРН;
- 2) удаленное от генераторов трехфазное КЗ длительностью 0,3 с.
- **3. Результаты моделирования.** Результаты моделирования для системы с группой гидрогенераторов, связанных с ЭЭС, представлены на рис. 8–12 в виде временных зависимостей напряжения, скорости вращения ротора, угла нагрузки генератора δ и частоты в сети при одновременном изменении в результате кибератаки постоянных времени линейных прогнозирующих звеньев для ГПАРН и ГПАРС с последующим удаленным от генераторов трехфазным КЗ длительностью 0,3 с. Изменение постоянных времени прогнозирующих звеньев регуляторов производилось в момент времени 6 с, а КЗ в момент времени 10 с.



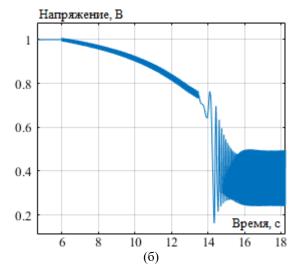


Рис. 8. Временные зависимости напряжений: (a) при изменении T_p с дальнейшим K3: $1 - T_p$ =0; $2 - T_p$ рассчитывается автоматически и не изменяется; $3 - T_p$ увеличена в n раз, где n – число параллельно работающих генераторов; $4 - T_p$ увеличена в 10 раз; (б) без K3: T_p увеличена в 100 раз

Как видно из рис. 8, 9 и 10 при нулевых значениях T_p (без прогноза) генераторы продолжают устойчивую работу даже после возникновения и отключения КЗ, однако это приводит к ухудшению показателей качества процесса управления всех параметров генераторов по сравнению с нормальным значением T_p , рассчитанным автоматически по предлагаемой методике: величина перерегулирования для напряжения увеличивается в 1,2 раза (характеристики 1 и 2 на рис.8, а); возникает колебательность напряжения генератора (характеристика 1 на рис. 8, а), которая отсутствует при нормальных значения T_p (характеристика 2 на рис.8, а); значительно возрастает колебательность и в 8,8 раза повышается величина перерегулирования для частоты в сети после отключения КЗ (характеристики 1 и 2 на рис. 9); в 3 раза увеличивается время переходного процесса для частоты (характеристики 1 и 2 на рис. 9); также значительно возрастает колебательность угла нагрузки ведущего генератора δ (характеристики 1 и 2 на рис. 10).

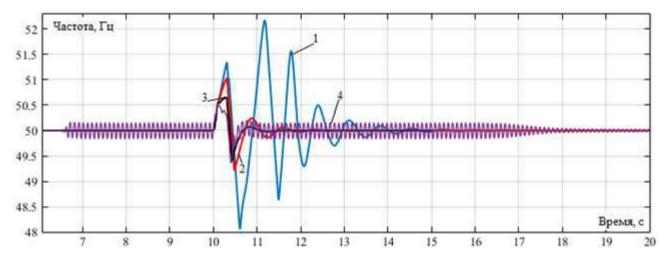


Рис. 9. Временные зависимости частоты: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис. 8

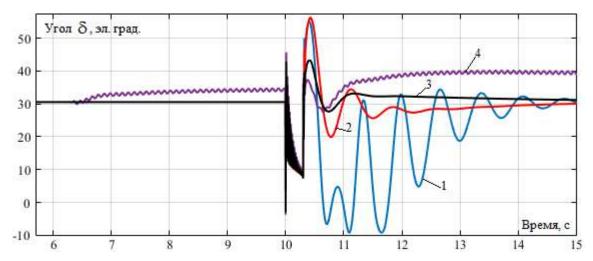


Рис. 10. Временные зависимости угла нагрузки генератора δ : обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис. 8

При одновременном увеличении постоянных времени прогнозирующих звеньев в 100 раз возникают высокочастотные колебания напряжения (рис. 8, б) и увеличение угла нагрузки ведущего генератора δ до потери устойчивости при значении, превышающем 90 эл. град., что приводит к резкому увеличению колебаний взаимного угла генераторов $\Delta \delta = \delta_1 - \delta_2$ (рис.11). Полученные результаты свидетельствуют о необходимости ограничения постоянных времени прогноза ГПАРН и ГПАРС до значения n, определяющего количество генераторов в группе (в рассматриваемом примере n=3). Аппаратное ограничение постоянных

времени прогноза ГПАРН и ГПАРС даст возможность избежать негативных эффектов от внешних воздействий, приводящих к потере устойчивости генераторов.

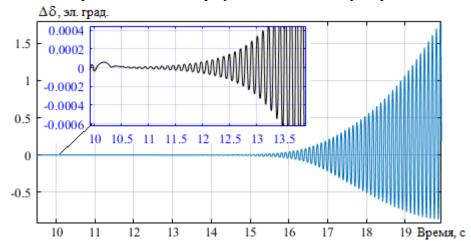


Рис. 11. Временная зависимость взаимного угла нагрузки генераторов станции при увеличении T_p в 100 раз

При небольшом отрицательном значении времени прогноза одновременно у ГПАРН и ГПАРС возникают незатухающие колебания напряжения генератора и частоты в сети с достаточно высокой амплитудой (рис. 12).

При увеличении постоянной времени прогноза только у ГПАРН ухудшаются показатели качества управления генератором в переходном процессе, вызванном кратковременным КЗ (рис. 13): увеличивается провал и время переходного процесса для напряжения (характеристики 1 и 2 на рис.13, а); растет угол нагрузки δ (характеристики 1 и 2 на рис.13, δ). Повышение T_p в 100 раз только у ГПАРН сразу же вызывает незатухающие колебания всех параметров, например, напряжения (характеристика 3 на рис.13, а), что приводит к постепенному нарастанию угла δ (характеристика 3 на рис.13, δ), снижению напряжения и потери устойчивости.

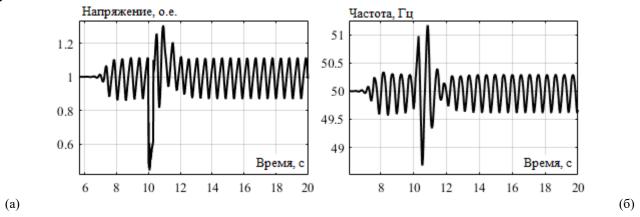
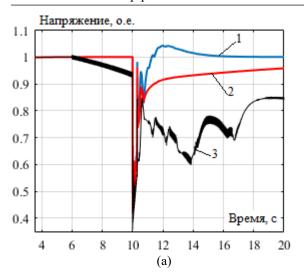


Рис. 12. Временные зависимости напряжения (a) и частоты в сети (б) при $T_p = -0.1$

Аналогичные результаты возникают при увеличении постоянной времени прогноза только у ГПАРС, однако здесь большему влиянию подвержены скорость вращения ротора генератора (рис. 14, а) и угол δ (рис.14, δ). Возникающие в этом режиме колебания отрицательно влияют на механические части генератора, снижают показатели устойчивости и надежности. Таким образом, еще раз подтверждается необходимость в аппаратном ограничении постоянной времени прогноза у ГПАРН и ГПАРС.



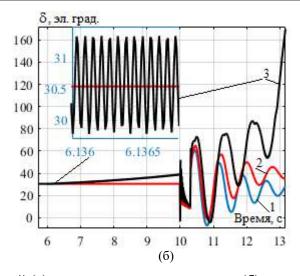
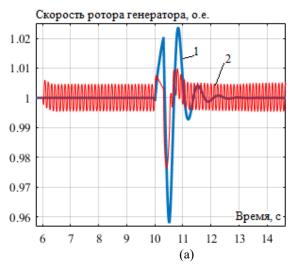


Рис. 13. Временные зависимости напряжений (а) и угла нагрузки генератора (б) при изменении T_p только у ГПАРН и дальнейшим КЗ: $1-T_p$ рассчитывается автоматически и не изменяется; $2-T_p$ увеличена 10 раз; $3-T_p$ увеличена в 100 раз



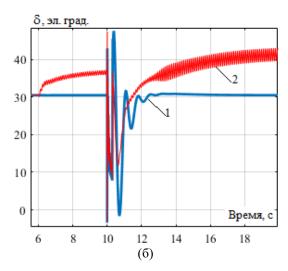


Рис. 14. Временные зависимости скорости вращения ротора (а) и угла нагрузки генератора (б) при изменении T_p только у ГПАРС и дальнейшим КЗ: $1-T_p$ рассчитывается автоматически и не изменяется; $2-T_p$ увеличена в 100 раз

При отрицательных значениях постоянных времени прогноза только у ГПАРН или у ГПАРС возникает опасность потери устойчивой работы группы синхронных генераторов. Это подтверждается результатами исследований, проведенных на компьютерной модели малой ГЭС и представленных на рис. 15 и 16 в виде напряжения и скорости вращения ротора генератора. Отрицательное значение T_p у ГПАРН сразу же вызывает колебания напряжения и скорости ротора, что приводит к потере устойчивости даже до момента возникновения КЗ (рис. 15). С отрицательным значением T_p у ГПАРС генераторы продолжают нормально работать, но при этом снижается запас устойчивости и при удаленном кратковременном КЗ машины выпадают из синхронизма (рис. 16).

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что при несанкционированном изменении времени прогноза у групповых регуляторов напряжения и частоты резко ухудшаются показатели качества управления и может возникать потеря устойчивости. Это подтверждает необходимость аппаратного ограничения времени прогноза и недопустимость режима с отрицательными значениями T_p у ГПАРН и (или) ГПАРС. Ограничение посто-

янных времени прогноза ГПАРН и ГПАРС до значения n, определяющего количество генераторов в группе, дает лучшие результаты по качеству управления в переходном процессе.

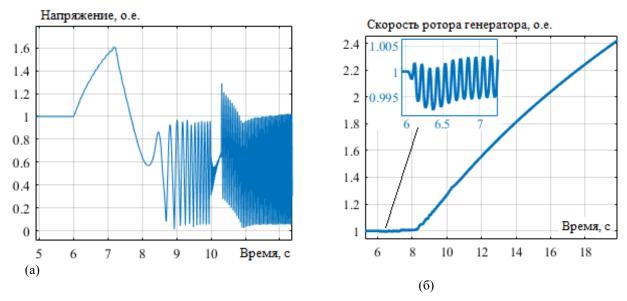


Рис. 15. Временные зависимости напряжения (а) и скорости вращения ротора генератора (б) при постоянной времени T_p , увеличенной у ГПАРС в 10 раз и умноженной на -1 у ГПАРН

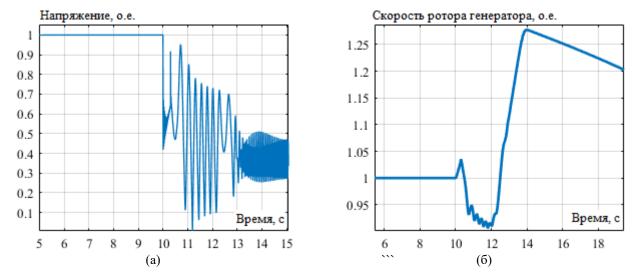


Рис. 16. Временные зависимости напряжения (а) и скорости вращения ротора генератора (б) при постоянной времени T_p , умноженной у ГПАРС на -1 и увеличенной в 10 раз у ГПАРН

Заключение и выводы. Результаты компьютерного моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

- 1. При нулевых значениях T_p у ГПАРН и ГПАРС (без прогноза) генераторы продолжают устойчивую работу даже после возникновения и отключения К3, но с ухудшенными показателями качества процесса управления по сравнению с нормальным значением T_p , рассчитанным автоматически по предлагаемой методике: величина перерегулирования для напряжения увеличивается в 1,2 раза; возникает колебательность напряжения генератора; значительно повышается колебательность и в 8,8 раза возрастает величина перерегулирования частоты после отключения К3; в 3 раза увеличивается время переходного процесса для частоты.
- 2. Лучшего эффекта удается достичь при увеличении постоянной времени линейного прогнозирующего звена в n раз, где n число параллельно работающих генераторов в группе: практически отсутствует колебательность, значительно уменьшается перерегулирование и время переходного процесса для напряжения, частоты в сети и угла нагрузки генератора δ

после возникновения и отключения КЗ. Дальнейшее увеличение постоянных времени прогноза ГПАРН и ГПАРС приводит к возникновению гармонических колебаний скорости вращения ротора и частоты в сети. При одновременном увеличении времени прогноза в 100 раз возникают высокочастотные колебания напряжения и увеличение угла нагрузки ведущего генератора δ до потери устойчивости. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости ограничения постоянных времени прогноза ГПАРН и ГПАРС до значения n, определяющего количество генераторов в группе.

- 3. В случае задания отрицательных значений постоянных времени прогноза у ГПАРН и (или) ГПАРС возникает опасность потери устойчивой работы группы синхронных генераторов станции. Таким образом, отрицательные значения времени прогноза у ГПАРН и (или) ГПАРС недопустимы.
- 4. Обобщая результаты моделирования, можно отметить, что в случае несанкционированного изменения времени прогноза у групповых регуляторов напряжения и частоты генераторов электростанции ухудшаются показатели качества управления и возможна потеря устойчивости. Это подтверждает необходимость аппаратного ограничения времени прогноза и недопустимости режима с отрицательными значениями T_p у ГПАРН и (или) ГПАРС.

Список источников

- 1. Илюшин П.В. Распределённая генерация: применение обосновано, не ограничено / П.В. Илюшин // Энергонадзор, 2015. №6(70). С.4-7.
- 2. Ерошенко С. А. Научные проблемы распределённой генерации / С. А. Ерошенко, А. А. Карпенко, С. Е. Кокин, А. В. Паздерин // Известия вузов: Проблемы энергетики, 2010. №11–12. С. 126–133.
- 3. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.
- 4. Голобоков С.В. Перспективы развития распределенной генерации тепловой и электрической энергии в России / С.В. Голобоков, А.А. Тихомирова, К.А. Степанова // Инжиниринг и технологии, 2019. − № 4(2). − C. 1−7. − DOI 10.21685/2587-7704-2019-4-2-4.
- 5. Филиппов С.П. Перспективы использования когенерационных установок при реконструкции котельных / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман // Промышленная энергетика, 2014. № 4. С. 7–11.
- Sikorski T. and Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks. Power Quality Issues in Distributed Generation, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172.
- 7. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm. International Journal of Innovate Computing, Information and Control, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 7761–7779.
- 8. Булатов Ю.Н. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2016. № 2 (63). —С. 7–22.
- 9. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization. Telkomnika, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524–1530. DOI: 10.11591/telkomnika.v11i3.2301
- 10. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd edition Springer, 2007, 405 p.
- 11. Rodriguez J. et al. State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016. DOI: 10.1109/TII.2012.2221469
- 12. Choi D. and Lee K. Dynamic Performance Improvement of AC/DC Converter Using Model Predictive Direct Power Control With Finite Control Set. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 757–767. DOI: 10.1109/TIE.2014.2352214
- 13. Ahmed A.A., Koh B.K. and Lee Y.I. A Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Speed Control of Induction Motors. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 1334–1346. DOI: 10.1109/TII.2017.2758393
- Elmorshedy M.F., Xu W., Liu Y., Allam S.M. and Dong M. Speed Control of Linear Induction Motor based on Finite-Set Model Predictive Direct Flux Control. 2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PRECEDE.2019.8753329

- 15. Carlet P.G., Toso F., Favato A. and Bolognani S. A speed and current cascade Continuous Control Set Model Predictive Control architecture for synchronous motor drives. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 5682–5688. DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912277
- Petkar S.G., Eshwar K. and Thippiripati V.K. A Modified Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, vol. 68, no. 2, pp. 1025–1034. DOI: 10.1109/TIE.2020.2970671
- 17. Pikina G.A., Pashchenko F.F.and Pashchenko A.F. Synthesis, Research and Comparative Analysis of Predictive Control Algorithms. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646
- 18. Пикина Г.А. Методы настройки прогностических типовых алгоритмов регулирования / Г.А. Пикина, М.С. Кузнецов // Теплоэнергетика, 2012. № 2. С. 64-68.
- 19. Пикина Г.А. Прогнозные типовые алгоритмы управления / Г.А. Пикина, М.С. Кузнецов // Энергетика, 2011, -№ 4, C. 61-66.
- Merzlikina E., Van Va H. and Farafonov G. Automatic Control System with an Autotuning Module and a Predictive PID-Algorithm for Thermal Processes. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 525–529. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446467
- 21. Булатов Ю.Н. Моделирование газотурбинной установки с прогностическими регуляторами напряжения и скорости / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2020. Т. 22. № 3. С. 60-67.
- 22. Булатов Ю.Н. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии, 2016. № 1 (29). С. 63-69.
- 23. Булатов Ю. Н. Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов // iPolytech Journal, 2021. Т. 25. № 5. С. 568–585. URL: https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-568-585.
- 24. Бушуев В.В. Динамические свойства энергосистем / В.В. Бушуев, Н.Н. Лизалек, Н.Л. Новиков. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
- 25. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость / П. Андерсон, А. Фуад ; Под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980. 568 с.

Булатов Юрий Николаевич, доцент, кандидат технических наук, зав. кафедрой энергетики, Братский государственный университет, bulatovyura@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3716-5357, Россия, Братск, Макаренко д.40.

Крюков Андрей Васильевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, and kryukov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6543-1790, Россия, Иркутск, Лермонтова д.83.

Суслов Константин Витальевич, доцент, доктор технических наук, зав. кафедрой электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, dr.souslov@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0484-2857, Россия, Иркутск, Лермонтова д.83.

UDC 681.5

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.007

Cyber-physical security of predictive algorithms in group controllers of distributed generation plants

Yuri N. Bulatov¹, Andrey V. Kryukov^{2,3}, Konstantin V. Suslov³

¹Bratsk State University, Russia, Bratsk, bulatovyura@yandex.ru

Abstract. Widespread use of distributed generation (DG) plants in electric power systems requires solving the complex problem of setting their regulators. The article proposes to use predictive control algorithms that can significantly simplify its solution. On the basis of a linear predictive link, various structures and models of predictive voltage and frequency controllers are considered, both for individual plant units and for group regulation.

The implementation of prognostic algorithms in the controllers of DG plants is possible on the basis of microprocessor systems. In this regard, it is required to study the impact of an unauthorized change as a result of a cyber-attack of the time constant of the predictive link on the operation of control systems for synchronous generators. The purpose of the presented study was to determine the operation of linear predictive algorithms in group voltage and frequency controllers with a change in the forecast time. The simulation was carried out in the MATLAB system, the results of which showed that with a sudden change in the forecast time, the group voltage and frequency controllers of the generators of a small hydroelectric power plant deteriorate in terms of control quality with a possible loss of stability. It is shown that to prevent such situations, it is necessary to use a hardware limitation of the prediction time, which ensures the inadmissibility of working with negative values of the time constants of the predictive links. In addition, limiting the forecast time constants to the value n, which determines the number of generators in the group, gives the best results in terms of the quality of control in the transient process.

Keywords: distributed generation plants, predictive control algorithms, group voltage and frequency controllers, cyber-physical security, modeling

References

- 1. Ilyushin P.V. Raspredelonnaya generatsiya: primeneniye obosnovano, ne ogranicheno [Distributed generation: application is justified, not limited]. Energonadzor, 2015, no. 6(70), pp.4–7.
- 2. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Nauchnyye problemy raspredelonnoy generatsii [Scientific problems of distributed generation]. Power engineering: research, equipment, technology, 2010, no. 11–12, pp. 126–133.
- 3. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technolo-gies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.
- Golobokov S.V., Tikhomirova A.A., Stepanova K.A. Perspektivy razvitiya raspredelennoy generatsii teplovoy i elektricheskoy energii v Rossii [Prospects for the development of distributed generation of thermal and electrical energy in Russia]. Engineering and Technologies, 2019, no. 4(2), pp. 1–7. DOI 10.21685/2587-7704-2019-4-2-4.
- 5. Filippov S.P., Dilman M.D. Perspektivy ispol'zovaniya kogeneratsionnykh ustanovok pri rekonstruktsii kotel'nykh [Prospects for the use of cogeneration units in the reconstruction of boiler houses]. Industrial power engineering, 2014, no. 4, pp. 7–11.
- Sikorski T. and Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks. Power Quality Issues in Distributed Generation, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172.
- 7. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm. International Journal of Innovate Computing, Information and Control, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 7761–7779.
- 8. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primeneniye veyvlet-preobrazovaniya i geneticheskikh al-goritmov dlya nastroyki avtomaticheskikh regulyatorov ustanovok raspredelennoy generatsii [Application of wavelet transform and genetic algorithms for tuning automatic controllers of distributed generation plants]. Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University, 2016, no. 2(63), pp. 7-22.
- 9. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization. Telkomnika, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524–1530. DOI: 10.11591/telkomnika.v11i3.2301

²Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk

³Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

- 10. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd edition Springer, 2007, 405 p.
- 11. Rodriguez J. et al. State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016. DOI: 10.1109/TII.2012.2221469
- 12. Choi D. and Lee K. Dynamic Performance Improvement of AC/DC Converter Using Model Predictive Direct Power Control With Finite Control Set. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 757–767. DOI: 10.1109/TIE.2014.2352214
- 13. Ahmed A.A., Koh B.K. and Lee Y.I. A Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Speed Control of Induction Motors. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 1334–1346. DOI: 10.1109/TII.2017.2758393
- 14. Elmorshedy M.F., Xu W., Liu Y., Allam S.M. and Dong M. Speed Control of Linear Induction Motor based on Finite-Set Model Predictive Direct Flux Control. 2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PRECEDE.2019.8753329
- 15. Carlet P.G., Toso F., Favato A. and Bolognani S. A speed and current cascade Continuous Control Set Model Predictive Control architecture for synchronous motor drives. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 5682–5688. DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912277
- Petkar S.G., Eshwar K. and Thippiripati V.K. A Modified Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, vol. 68, no. 2, pp. 1025–1034. DOI: 10.1109/TIE.2020.2970671
- 17. Pikina G.A., Pashchenko F.F.and Pashchenko A.F. Synthesis, Research and Comparative Analysis of Predictive Control Algorithms. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646
- 18. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Metody nastroyki prognosticheskikh tipovykh algoritmov regulirovaniya [Tuning methods for predictive standard control algorithms]. Thermal Engineering, 2012, no. 2, pp. 64–68.
- 19. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Prognoznyye tipovyye algoritmy upravleniya [Predictive typical control algorithms]. Energetika [Energy], 2011, no. 4, p. 61–66.
- Merzlikina E., Van Va H. and Farafonov G. Automatic Control System with an Autotuning Module and a Predictive PID-Algorithm for Thermal Processes. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 525–529. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446467
- 21. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. Modelirovaniye gazoturbinnoy ustanovki s prognosticheskimi regulyatorami napryazheniya i skorosti [Modeling of a gas turbine plant with predictive voltage and speed controllers]. Power engineering: research, equipment, technology, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 60–67.
- 22. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. Prognosticheskiye regulyatory dlya ustanovok raspredelennoy generatsii [Prognostic controllers for distributed generation installations]. Systems. Methods. Technologies, 2016, no. 1(29), pp. 63–69.
- 23. Bulatov Yu. N. Joint voltage and frequency predictive controllers for distributed generation plants. iPolytech Journal, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 568-585. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-568-585
- 24. Bushuev V.V., Lizalek N.N., Novikov N.L. Dinamicheskiye svoystva energosistem [Dynamic properties of power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1995, 320 p.
- 25. Anderson P., Fuad A. Upravleniye energosistemami i ustoychivost' [Management of energy systems and sustainability]. Moscow, Energiya, 1980, 568 p.

Yuri N. Bulatov, associate professor, candidate of technical sciences, Head of the Energy Department, Bratsk State University, bulatovyura@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3716-5357, Russia, Bratsk, Makarenko 40.

Andrey V. Kryukov, professor, doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, and kryukov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6543-1790, Russia, Irkutsk, Lermontov 83.

Konstantin V. Suslov, associate professor, doctor of technical sciences, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, dr.souslov@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0484-2857, Russia, Irkutsk, Lermontov 83.

Статья поступила в редакцию 08.05.2022; одобрена после рецензирования 31.05.2022; принята к публикации 03.06.2022.

The article was submitted 05/08/2022; approved after reviewing 05/31/2022; accepted for publication 06/03/2022.

УДК 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008

Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах

Карамов Дмитрий Николаевич 1 , Муфтахов Ильдар Ринатович 1 , Потапов Василий Васильевич 2 , Сыромятников Антон Анатольевич 2 , Шушпанов Илья Николаевич 2

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

Россия, г. Иркутск, dmitriy.karamov@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлена универсальная методика расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах. Описывается метод категоризации аккумуляторных батарей и его важность при формировании потенциально-возможных вариантов компоновки системы аккумулирования. Режимы работы аккумуляторных батарей рассчитываются с помощью хронологического метода, который позволяет определить основные показатели для каждого часа рассматриваемого периода. Кроме того, вводятся понятия частичного цикла и локальноминимального состояния заряда аккумуляторной батареи. Эти показатели необходимы для правильной оценки количества циклов батареи до ее замены. После определения предельного количества циклов до замены и среднегодового количества циклов заряд/разряд можно определить срок службы аккумуляторной батареи. Данная методика была использована в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Республике Якутия). Результаты показали, что лучше всего использовать свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи суммарной емкостью 144 кВт·ч. Полученная емкость позволяет использовать аккумуляторные батареи в тяжелых цикличных режимах работы фотоэлектрической системы. Представленная методика является универсальной и может использоваться в различных задачах системного характера в области энергетики.

Ключевые слова: автономные фотоэлектрические системы, аккумуляторные батареи, срок службы, частичный цикл, глубина разряда

Цитирование: Карамов Д.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах / Д.Н. Карамов, И.Р. Муфтахов, В.В. Потапов, А.А. Сыромятников, И.Н. Шушпанов. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. $-2022.- \mathbb{N} \ 2(26).- C. 85-96.-DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.$

Введение. В течение последнего десятилетия мировой опыт показал, что комбинированное использование возобновляемых источников энергии, аккумуляторных батарей и традиционных энергетических установок является экономически выгодным способом обеспечения потребителей в автономных энергосистемах [1, 2]. Особое значение возобновляемые источники энергии приобрели при электрификации удаленных сельских территорий, не имеющих связи с централизованными электроэнергетическими системами [3-5].

Оптимизация конфигурации, состава оборудования и установленной мощности является одной из основных задач при использовании возобновляемых источников энергии и аккумуляторных батарей [6]. Решение такой задачи позволяет определить оптимальное техническое решение, при котором достигаются приемлемые значения целевой функции.

Как правило, целевая функция представлена нормированной стоимостью энергии (Levelized cost of energy (LCOE), \$/кВт·ч) [7,8]. LCOE хорошо зарекомендовала себя при решении задачи оптимизации состава оборудования в автономных энергетических системах. Преимущества LCOE заключается в его универсальности и возможности интеграции любого другого технологического показателя в денежный эквивалент [9]. Например, показатели надежности энергетической системы можно рассматривать в части финансовых штрафов за

² Иркутский национальный исследовательский технический университет Россия, Иркутск,

недоотпуск электроэнергии потребителям. Аналогичным образом могут учитываться выбросы углекислого газа и других загрязняющих веществ, превышающие предельно допустимые нормы. Отдельного упоминания заслуживают вопросы реконструкции и замены оборудования автономных энергетических систем на протяжении всего срока эксплуатации. Поскольку LCOE рассчитывается на весь период функционирования энергокомплекса, то стоимость реконструкции системы и замены основного оборудования автономного энергокомплекса может быть определено с учетом дисконтирования для конкретного года рассматриваемого периода.

Мероприятия, направленные на реконструкцию автономной энергетической системы и замену основного оборудования, зависят от срока эксплуатации конкретного агрегата, его технического состояния и ремонтопригодности. Крайне важно учитывать вышеперечисленные факторы для решения сложных практических задач, поскольку они оказывают существенное влияние на результат оптимизации.

Аккумуляторные батареи имеют существенную долю в суммарных капиталовложениях в автономных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии. В среднем эта доля составляет от 30% до 45% в зависимости от используемого типа аккумуляторных батарей. Следовательно, учет количества замен аккумуляторных батарей оказывает существенное влияние на показатель LCOE и результат оптимизации состава оборудования.

В данной статье предлагается модель для расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных энергетических системах с возобновляемой генерацией. Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке простой, но надежной методики расчета срока службы аккумулирующих устройств. Данная модель включает многолетние метеорологические ряды; подробные математические модели основных элементов автономных энергетических систем; методику категоризации аккумуляторных батарей; технические характеристики основного и вспомогательного оборудования.

1. Аккумуляторные батареи в автономных энергетических системах. Аккумуляторные батареи в автономных энергетических системах являются стабилизирующим элементом, работающим в цикличном режиме. Имея малую величину инерции, аккумуляторные батареи могут запасать избыточную энергию и отдавать ее в моменты дефицита, поддерживая тем самым необходимую частоту энергосистемы.

Дизельные электростанции могут использоваться в качестве резервного источника электроэнергии при интеграции аккумуляторных батарей в автономные энергетические системы с возобновляемой генерацией [10]. В таких условиях режим работы дизельных электростанций зависит от состояния заряда аккумуляторным батарей. При этом дизельная электростанция включается на полную мощность, обеспечивая электроэнергией непосредственно потребителя и выполняя заряд аккумуляторных батарей. Такой режим работы позволяет дизельным электростанциям значительно сократить время использования и расход топлива.

При правильном выборе типа аккумуляторных батарей и суммарной емкости значительно улучшаются показатели устойчивости и надежности автономных энергетических систем. Следовательно, необходимо различать, какие типы аккумуляторных батарей можно использовать в конкретных условиях эксплуатации, а какие нельзя. Эта важная и сложная проблема часто недооценивается и приводит к катастрофическим результатам во время реальной эксплуатации.

2. Определение возможных вариантов компоновки. В статье [11] представлена уникальная методика категоризации аккумуляторных батарей в зависимости от условий эксплуатации и конфигурации генерирующего оборудования. Данная методика основана на анализе показателей работы большого количества реальных автономных энергосистем с

возобновляемыми источниками энергии и аккумуляторными батареями. Она включает в себя шесть основных показателей в зависимости от режимов работы аккумуляторной батареи в течение года. Каждый показатель имеет свои единицы измерения и соответствующую шкалу оценок от 1 до 5. По итогам данных оценок строится радиальная диаграмма. Также дано описание шести основных категорий, каждая из которых имеет свою радиальную диаграмму. Кроме того, подробно представлены процессы деградации в аккумуляторных батареях и их связь с основными показателями и оценками. Для каждой категории представлены только те типы аккумуляторных батарей и другого вспомогательного оборудования, которые можно использовать в данных условиях эксплуатации.

В работе [12] представлена интеграция методики категоризации аккумуляторных батарей в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических систем. Следовательно, при решении задачи оптимизации предлагаются такие варианты компоновки аккумуляторных батарей и дополнительного оборудования, максимально соответствующие заданным условиям эксплуатации. В таком случае минимизируются процессы деградации аккумуляторных батарей. Кроме того, эта методика заранее исключает такие типы аккумуляторных батарей, которые не соответствуют данным условиям эксплуатации, приводящим к быстрой потере располагаемой емкости.

- 3. Замена аккумуляторных батарей. На практике большое значение имеет учет количества замен аккумуляторных батарей за весь период эксплуатации автономного энергетического комплекса. Заслуживают внимания исследования, в которых предлагаются математические модели замены аккумуляторных батарей. Эти модели основываются на определении эксплуатационных показателей аккумуляторного звена. Одним из способов является определение среднегодового числа циклов заряд/разряд [13]. Также заслуживает упоминания модель RainFlow, основанная на определении количества циклов заряд/разряд в зависимости от глубины разряда [14]. Этот показатель делится на определенное количество интервалов, соответствующих определенному количеству циклов заряд/разряд. Таким образом определяется среднегодовое количество циклов заряд/разряд и предельное число циклов, соответствующих замене аккумуляторной батареи. Одной из наиболее сложных моделей является модель Schiffer [15], основанная на определении эксплуатационных показателей, влияющих на срок службы аккумуляторной батареи. В работе [16] утверждается, что модели, описанные в [13,14], значительно завышают срок службы батареи.
- **4. Описание методики.** Данный раздел содержит словесное описание рассматриваемой методики. Общеизвестные исследования или опубликованные работы авторов приводятся ниже в качестве ссылок и кратким словесным описанием.
- **4.1. Анализ климатических показателей.** Генерация от возобновляемых источников энергии зависит от климатических показателей таких как суммарная солнечная радиация, скорость ветра, температура / плотность воздуха.

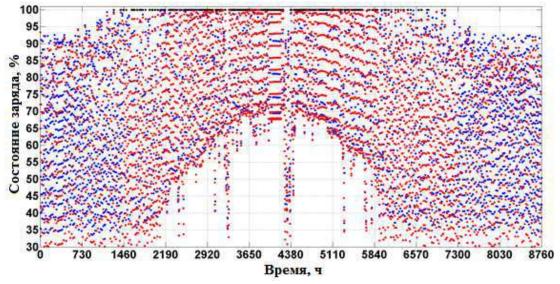
Многолетние метеорологические ряды часто используются для моделирования скорости ветра, суммарной солнечной радиации, температуры воздуха и многих других метеорологических параметров. В работе [17] подробно описана методика интеграции в энергетические исследования многолетних метеорологических рядов форматов FM 12 Synop и METAR, представлены схемы обработки и анализа данных. В статье [18] представлена методика моделирования суммарной солнечной радиации с использованием общедоступных многолетних метеорологических рядов. Моделирование основано на ретроспективных данных с использованием тандема математических моделей Iqbal и Kasten/Czeplak.

В результате получается 15-20-летняя последовательность метеорологических параметров с дискретным шагом один час и типичный метеорологический год.

4.2. Моделирование аккумуляторных батарей в автономных энергетических системах. Моделирование режимов работы автономной энергетической системы основано на хронологическом моделировании относительно каждого часа расчетного периода [1,6,10]. Хронологический метод расчета является усовершенствованной версией имитационного моделирования. Значения выходной мощности, уровня электрической нагрузки потребителя и электрических потерь в сети являются известными параметрами автономной энергосистемы. Учитывая стохастический характер генерации возобновляемых источников знакопеременная функция мощности системы может принимать положительное, так и отрицательное значение [6,12,16]. Положительная область указывает на избыток мощности, тогда как отрицательная область означает дефицит. Наличие аккумуляторных батарей решает эту проблему. В [12, с. 114-116] авторы статьи дают исчерпывающее описание универсальной математической модели аккумуляторных батарей с учетом эксплуатационно-технических ограничений. Последние характеризуются скоростью заряда и разряда в зависимости от типа аккумуляторных батарей.

4.2.1. Полный и частичный цикл заряд/разряд. Техническая документация аккумуляторных батарей, как правило, содержит определенный перечень характеристик, описывающих тот или иной тип оборудования. Эти характеристики включают следующее: срок службы в зависимости от глубины разряда, а также уровень напряжения для каждого состояния заряда аккумуляторной батареи.

Срок службы с учетом глубины разряда указывает, сколько циклов до замены аккумуляторная батарея может выполнить при заданной глубине разряда. Глубина разряда зависит от типа используемых аккумуляторов. Например, стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (FLA, OPzS, GroE), имеют максимальную глубину разряда 80%, при которой предельное количество циклов в среднем не превышает 1500-2000. Следовательно, под полным циклом понимается процесс, при котором аккумуляторная батарея разряжается до рекомендуемой глубины разряда, т. е. процента от ее номинальной емкости, а затем полностью заряжается к исходному состоянию. Однако в автономных энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии знакопеременная функция мощности часто меняется, что влияет на уровень заряда аккумуляторной батареи (рис. 1).



Цвета: заряд (красный), разряд (синий), полный заряд 100% (черный)

Рис. 1. Изменение в течение года состояния заряда батареи фотоэлектрической системы

Как видно из рис. 1, невозможно проследить полный цикл заряда/разряда по последовательным процессам во всем диапазоне глубины разряда. Эти условия показали

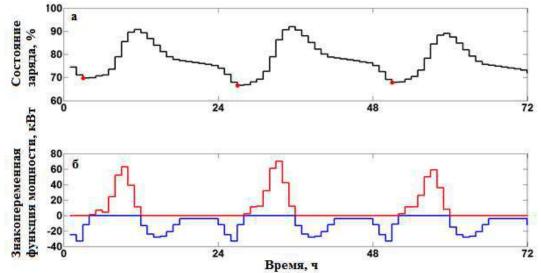
необходимость введения понятия частичного цикла, характеризующего изменение процесса заряд/разряд при различных значениях состояния заряда аккумуляторной батареи. Это позволит отслеживать, до какого частичного состояния аккумуляторные батареи заряжались, а затем разряжались до определенного значения. Например, аккумуляторные батареи в фотоэлектрических системах наиболее активно используются ночью или в пасмурные дни весенне-летний период. Поскольку аккумуляторные батареи в этот период разряжаются незначительно из-за низкого уровня электрической нагрузки (ночной режим), срок службы аккумуляторов за это время почти не уменьшается.

- **4.2.2. Моделирование частичных циклов**. При моделировании частичного цикла необходимо отслеживать поведение знакопеременной функции мощности системы и состояние заряда аккумуляторной батареи. Для простоты дадим словесное описание алгоритма моделирования частичного цикла. Следует отметить, что в процессе моделирования учитываются эксплуатационно-технические ограничения.
 - 1. Если знакопеременной функции мощности системы в момент времени t отрицательная, то аккумуляторная батарея разряжается. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока батарея не разрядится до минимального порога.
 - 2. Если аккумуляторная батарея продолжала разряжаться в течение определенного периода времени t, а затем процесс разряда сменился на заряд, батарея будет заряжаться до тех пор, пока знакопеременной функции мощности системы будет положительной.
 - 3. При выполнении условий (1) и (2) и полном 100% заряде аккумуляторной батареи знакопеременная функция мощности системы принимает значение электрической нагрузки потребителя, тем самым напрямую обеспечивая потребителей электроэнергией от фотоэлектрической системы без использования аккумуляторных батарей. Этот процесс часто происходит в автономных фотоэлектрических системах в весенне-летний период, когда электрическая нагрузка имеет низкие значения, а генерация высокие.
 - 4. Когда аккумуляторная батарея разряжалась (1) в течение определенного промежутка времени t, а затем заряжалась (2) до определенного значения (или до 100% состояния заряда (3)), то этот процесс называется неполным циклом. Окончание цикла определяется в тот момент, когда процесс разряда (1) происходит снова после выполнения всех вышеперечисленных условий, что свидетельствует о завершении предыдущего цикла и начале нового частичного цикла. В качестве примера рассмотрим поведение состояния заряда аккумуляторной батареи в течение трех дней и знакопеременной функции мощности для автономной фотоэлектрической системы. На рис. 2 представлены, а) изменение состояния заряда аккумулятора, %; и б) знакопеременная функция мощности, кВт.

Как видно на рис. 2, аккумуляторная батарея заряжается днем (красная линия) и разряжается ночью (синяя линия). Красные точки (рис. 2a) показывают конец предыдущего частичного цикла и начало следующего.

4.2.3. Характеристика срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда. Кривая срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда - это характеристика, определяющая количество циклов до отказа при различной глубине разряда. При этом минимальное значение состояния заряда аккумуляторной батареи можно определить в зависимости от продолжительности частичного цикла и глубины разряда. Для этого вводится понятие локально-минимального состояния заряда

аккумуляторной батареи. Локально-минимальное значение соответствует наименьшему уровню заряда аккумуляторной батареи для каждого частичного цикла.

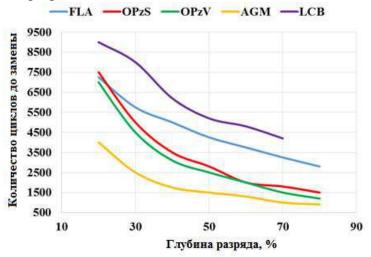


Цвета: заряд (красный), разряд (синий,

Рис. 2. а) изменение состояния заряда батареи, %, б) функция переменной мощности, кВт

Учитывая, что частичный цикл это малая составляющая всей характеристики состояния заряда аккумуляторной батареи, то его наименьшее значение является локальным. После определения локально-минимального значения состояния заряда аккумуляторной батареи для каждого частичного цикла можно рассчитать его среднегодовое значение. Следовательно, эта величина зависит от знакопеременной функции мощности и режимов функционирования. Использование среднегодового локально-минимального значения состояния заряда аккумуляторной батареи является оценкой наихудшего случая, которая также называется оценкой снизу (пессимистичной оценкой).

Следующим шагом является определение предельного количества циклов до замены путем сравнения полученного среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи с характеристикой срока службы в зависимости от глубины разряда. На рис. 3 показаны типовые характеристики срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда.



Расшифровка аккумуляторных батарей: FLA – залитая свинцово-кислотная; LCB – свинцово-карбоновая; OPzS – залитая свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; OPzV – гелеобразная свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; AGM – свинцово-кислотная с абсорбированным электролитом

Рис. 3. Срок службы в зависимости от глубины разряда для различных типов аккумуляторных батарей

Таким образом, можно выявить следующую закономерность: чем выше суммарная емкость аккумуляторных батарей, тем выше среднегодовое значение локального минимального состояния заряда, что естественно увеличивает число циклов до отказа.

4.2.4. Расчет срока службы аккумуляторной батареи. Помимо среднегодового локально-минимального состояния заряда батареи и предельного числа циклов до замены, необходимо определить среднегодовое число циклов заряд/разряд. Для этого необходимо рассчитать количество энергии, поступающей в аккумуляторную батарею за рассматриваемый период времени. Далее полученное значение необходимо разделить на общую установленную емкость аккумуляторной батареи. Это дает возможность рассмотреть все частичные циклы за рассматриваемый период и привести их к общему числу. Можно наблюдать следующую закономерность: чем выше суммарная установленная емкость аккумуляторных батарей, тем меньше среднегодовое количество циклов заряд/разряд.

Для определения срока службы аккумуляторных батарей необходимо предельное количество циклов до замены, зависящих от среднегодового значения локально-минимального состояния заряда, разделить на среднегодовое число циклов заряд/разряд.

На рис. 4 представлена упрощенная блок-схема, описывающая алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей.

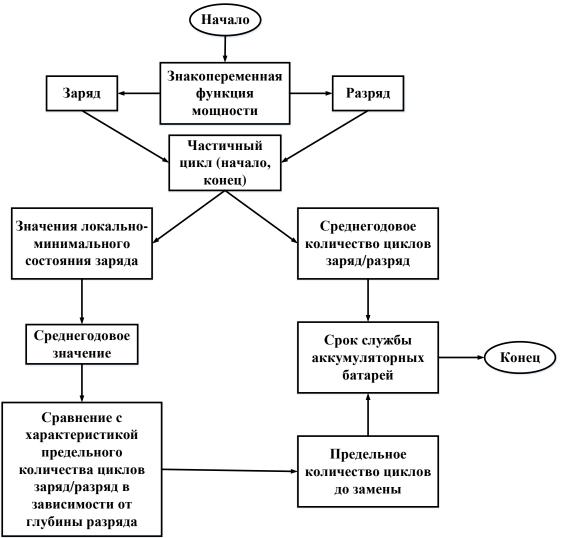


Рис. 4. Упрощенная блок-схема, описывающая алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей

5. Реализация на практике. В данном разделе описаны результаты использования данной методики на практике. Рассмотрим в качестве примера основные результаты, полученные в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Алданский район, Республика Якутия).

До 2015 года данная автономная энергетическая система имела только дизельную электростанцию. В качестве основного энергетического оборудования использовались два дизель-генератора мощностью 25 кВт. Наибольшая (15 кВт) и наименьшая (10 кВт) электрические нагрузки (по данным 2015 года) приходятся на зимнее и летнее время соответственно. Годовой расход топлива чисто на дизельную генерацию составлял 35 тонн в год.

В 2015 году было принято решение построить фотоэлектрическую систему с аккумуляторными батареями, чтобы снизить количество потребляемого дизельного топлива и увеличить количество часов подачи электроэнергии потребителям с 10 часов в сутки до круглосуточного.

Согласно исходного технического задания основными критериями были: экономия дизельного топлива (тонн в год), срок службы аккумуляторной батареи (количество лет) и нормируемая стоимость энергии (Руб./кВт·ч). Предпочтение отдавалось необслуживаемым аккумуляторным батареям, учитывая, что нормативные документы жестко регламентируют использование обслуживаемых аккумуляторов с жидким электролитом. Использование необслуживаемых аккумуляторных батарей снизило расходы на ежегодное техническое обслуживание.

На первом этапе использовались суммарная солнечная радиация, скорость ветра, температура воздуха и многие другие климатические параметры на рассматриваемой локации.

Целью второго этапа было моделирование автономной фотоэлектрической системы и решение задачи категоризации аккумуляторных батарей. После был составлен перечень аккумуляторных батарей, отвечающих требованиям сложных циклических режимов работы фотоэлектрической системы. В перечень вошли следующие аккумуляторные батареи: OPzS, OPzV, классические затопленные аккумуляторные батареи с повышенным техническим ресурсом (FLA) и свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи (LCB). В частности, для OPzS и FLA была рекомендована система циркуляции электролита. Поскольку изначально рассматривались необслуживаемые аккумуляторные батареи, то впоследствии в задачу оптимизации состава оборудования были включены только аккумуляторные батареи типов OPzV и LCB.

В конечном итоге для проекта был выбран следующий состав оборудования: солнечная электростанция (36 кВт), солнечные инверторы (36 кВт), свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи (144 кВт·ч) и батарейные инверторы (24 кВт). Годовая расчетная генерация составляет 103000 кВт·ч. Из них 44000 кВт·ч обеспечивает солнечная электростанция, остальное дизельная. Ежегодно на аккумуляторные батареи поступает около 22000 кВт·ч. Предельное количество циклов до замены составляет 4200, а среднегодовое количество циклов заряд/разряд имеет значение от 150 до 210 в год. В случае увеличения электрической нагрузки поселка в 2,5 раза расчетный срок службы аккумуляторной батареи составляет 15 лет.

Полученный состав оборудования обеспечивает значительную экономию дизельного топлива (более 40%), длительный срок службы аккумуляторных батарей и снижение нормированной стоимости энергии с 34 до 18 руб./кВт·ч.

Данная система работает с 2016 года. Электрическая нагрузка за этот период увеличилась более чем в 2 раза. Поскольку такой сценарий рассматривался при решении задачи, были выбраны аккумуляторные батареи достаточной емкости, выдерживающие сложные циклические режимы работы.

Заключение. В данной работе представлена методика расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах. Дается описание категоризации аккумуляторных батарей и их важности при определении потенциальновозможных вариантов компоновки. Методика категоризации аккумуляторных батарей позволяет определить такие типы аккумуляторных батарей, которые можно использовать в данных условиях эксплуатации, тем самым исключая, заведомо неподходящие. Предлагаемая методика основана на хронологическом моделировании режимов работы автономных энергетических систем относительно каждого часа расчетного периода. Также в статье описаны основные режимы работы аккумуляторных батарей и их характеристики. Вводятся понятия частичного цикла и локально-минимального состояния аккумуляторных батарей. Определение среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторных батарей и сравнение его с характеристикой срока службы в зависимости от глубины разряда позволяет определить предельное количество циклов до замены.

Данная методика была использована в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Алданский район, Республика Якутия). Решением задачи категоризации был выявлен ряд типов аккумуляторных батарей, удовлетворяющих требованиям эксплуатации. Расчетный срок службы аккумуляторных батарей составляет до 15 лет.

В настоящее время аккумуляторные батареи вместе с солнечной электростанцией полностью обеспечивают потребности местных потребителей в электроэнергии с марта по октябрь. В этот период дизельная электростанция работает только в пасмурные дни. Представленная методика универсальная и может быть использована для решения задач оптимизации состава оборудования и установленной емкости аккумуляторных батарей.

Благодарности. данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-48-383004.

Список источников

- 1. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
- 2. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. Applied Energy, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
- 3. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. Energy Policy, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
- 4. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., et al. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
- 5. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., et al. Renewable energy development in rural areas of Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
- Karamov D. N., Minarchenko I. M., Kolosnitsyn A. V., Pavlov N. V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. Energy Conversion and Management, 2021, vol. 240, 114256
- 7. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., et al. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO² Emissions. Energy Procedia, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
- 8. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, vol. 15, pp. 4470–4482.

- 9. Karamov D.N., Suslov K.V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. Energy Reports, 2021, vol. 7, Suppl. 1 pp. 349–358.
- 10. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. Renewable Energy, 2006, vol. 31, pp. 2227–2244.
- 11. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar Energy, 2007, vol. 81, pp. 1409–1425.
- 12. Karamov D.N. Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 113–130.
- 13. Bernal-Agustin J. L, Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, pp. 2111–2118.
- 14. Green HJ, Manwell J. HYBRID2 A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems In: Proceedings of WindPower'95, 1995, Washington DC.
- 15. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., et al. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. Journal of Power Sources, 2007, vol. 168, pp. 66–78.
- 16. Dufo-López R., Lujano-Rojas J. M., Bernal-Agustín J. L. Comparison of different lead—acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. Applied Energy, 2014, vol. 115, pp. 242–253.
- 17. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88.
- 18. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar irradiance based on open access long-term meteorological observation data. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37.

Карамов Дмитрий Николаевич, 1990 года рождения, образование высшее по специальности Электроснабжение, полученное в ИрГТУ, к.т.н., занимаемая должность: старший научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 905773, SPIN-код: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Муфтахов Ильдар Ринатович, 1990 года рождения, образование высшее по специальности Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем, полученное в ИрГУПС, занимаемая должность: инженер-исследователь лаборатории исследования операций, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 738846, SPIN-код: 2655-9802, ORCID: 0000-0003-2516-459X, ildar_sm@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Потапов Василий Васильевич, 1948 года рождения, образование высшее по специальности Инженер электрофизик, полученное в Томском политехническом институте имени Кирова, к.т.н., занимаемая должность: доцент кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ, AuthorID: 740448, SPIN-код 1011-4444, ORCID: 0000-0002-3150-088X, PV1511@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Сыромятников Антон Анатольевич, 1989 года рождения, образование высшее по специальности Экономика и управление на предприятии (в энергетике), полученное в ИрГТ, занимаемая должность: техник на кафедре электроснабжения и электротехники ИРНИТУ, ORCID: 0000-0002-9720-6456, acad1killer@rambler.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Шушпанов Илья Николаевич, 1986 года рождения, образование высшее по специальности Электроснабжение, полученное в ИрГТУ, к.т.н., занимаемая должность: доцент кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ. AuthorID: 678997, SPIN-

код: 5280-0644, ORCID: 0000-0001-7121-7651, ilis83@mail.ru, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008

Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems

Dmitriy N. Karamov¹, Ildar R. Muftahov¹, Vasiliy V. Potapov², Anton A. Syromyatnikov², Ilya N. Shushpanov².

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia, Irkutsk, *dmitriy.karamov@mail.ru*

Russia, Irkutsk

Abstract. This paper presents a versatile and simple methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems. A description is given of battery categorization and its importance in establishing potential configuration options. Battery operating modes are modeled using the chronological modeling method which defines the mode indicators with respect to every hour of the period under consideration. The notions of partial cycle and local minimum state of battery charge are introduced. These indicators are necessary for the correct estimate of the number of battery cycles to failure. After identifying the number of cycles to failure and the average annual number of cycles, it is possible to calculate storage battery lifetime. This methodology was used in 2015 when designing and setting up Verkhnyaya Amga, a photovoltaic system in the Republic of Yakutia. The results showed that it is best to use lead—carbon batteries with a total capacity of 144 kW·h.

 $\textbf{Keywords:} \ \text{autonomous photovoltaic systems, storage batteries, lifetime, partial cycle, depth of discharge}$

Acknowledgement: the reported study was funded by RFBR and the Government of the Irkutsk Region, project number 20-48-383004.

References

- 1. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
- 2. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. Applied Energy, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
- 3. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. Energy Policy, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
- 4. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., et al. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
- 5. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., et al. Renewable energy development in rural areas of Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
- 6. Karamov D. N., Minarchenko I. M., Kolosnitsyn A. V., Pavlov N. V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. Energy Conversion and Management, 2021, vol. 240, 114256
- 7. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., et al. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO² Emissions. Energy Procedia, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
- 8. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, vol. 15, pp. 4470–4482.
- 9. Karamov D.N., Suslov K.V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. Energy Reports, 2021, vol. 7, Suppl. 1 pp. 349–358.
- 10. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. Renewable Energy, 2006, vol. 31, pp. 2227–2244.

² Irkutsk National Research Technical University,

- 11. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar Energy, 2007, vol. 81, pp. 1409–1425.
- 12. Karamov D.N. Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 113–130.
- 13. Bernal-Agustin J. L, Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, pp. 2111–2118.
- 14. Green HJ, Manwell J. HYBRID2 A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems In: Proceedings of WindPower'95, 1995, Washington DC.
- 15. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., et al. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. Journal of Power Sources, 2007, vol. 168, pp. 66–78.
- 16. Dufo-López R., Lujano-Rojas J. M., Bernal-Agustín J. L. Comparison of different lead—acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. Applied Energy, 2014, vol. 115, pp. 242–253.
- 17. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88.
- 18. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar irradiance based on open access long-term meteorological observation data. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37.
- *Dmitriy N. Karamov*, AuthorID: 905773, SPIN-код: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru
- *Ildar R. Muftahov*, AuthorID: 738846, SPIN-код: 2655-9802, ORCID: 0000-0003-2516-459X, ildar_sm@mail.ru
- Vasiliy V. Potapov, AuthorID: 740448, SPIN-код 1011-4444, ORCID: 0000-0002-3150-088X, PV1511@mail.ru
- Anton A. Syromyatnikov, ORCID: 0000-0002-9720-6456, acad1killer@rambler.ru

 Ilya N. Shushpanov, AuthorID: 678997, SPIN-κοд: 5280-0644, ORCID: 0000-0001-7121-7651, ilis83@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 05/26/2022; approved after reviewing 06/10/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 661.311:338.27

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.009

Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы

Кононов Юрий Дмитриевич, Кононов Дмитрий Юрьевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск, *kononov@isem.irk.ru*

Аннотация. Рассматривается проблема распространения существующих методов индикативного анализа текущего состояния энергетической безопасности (ЭБ) на комплексную оценку вариантов развития систем энергетики. Актуальность этой проблемы обусловлена ростом неопределенности будущего, в том числе из-за начинающегося перехода к низкоуглеродной стратегии. Предложен состав индикаторов, меняющийся в зависимости от рассматриваемой перспективы и учитывающий экономический и экологический аспекты ЭБ. Описан подход к оценке значимости отдельных индикаторов при формировании комплексных обобщающих показателей состояния ЭБ. Представлены результаты оптимизационных расчетов по оценке изменения этих показателей для двух вариантов электроснабжения Европейской части страны и Урала. Эти варианты отличаются стоимостью топлива для электростанций (во втором варианте газ на 25%, а уголь на 5% дороже, чем в первом). Удорожание топлива сказывается на структуре ввода мощностей в разных регионах, увеличивая долю безуглеродных станций и уменьшая эмиссию СО2. Но при этом увеличивается стоимость генерации электроэнергии и риски для потенциальных инвесторов. Комплексный показатель ЭБ учитывает это разнонаправленное влияние. Его рост говорит о предпочтительности первого варианта с позиции ЭБ. Сделан вывод о возможности и целесообразности использования такого рода показателей в качестве дополнительного критерия эффективности при сравнении вариантов развития ТЭК и региональной системы энергоснабжения. С увеличением горизонта прогнозирования состав используемых индикаторов должен уменьшаться, а значимость экономического и экологического аспектов ЭБ будет расти.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, индикативный анализ, прогнозирование, оптимизация **Цитирование** Кононов Ю.Д. Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 97-103. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.009.

Введение. Комплексной оценке состояния энергетической безопасности уделяется серьезное внимание во многих странах [1]. Ее основой является индикативный анализ. Он включает определение состава, численной оценки и значимости индикаторов, а также конструирование обобщающих показателей — комплексные индексы ЭБ (КИЭБ). Как правило, такие индексы имеют иерархическую структуру: состоят из 2-3 уровней, на каждом из которых индикаторы объединяются в группы с разными весами [2]. Такой индекс можно представить следующим образом [3]:

КИЭБ =
$$\sum_{i=1}^{3} \left(\mathbf{S}_{i} \sum_{i}^{m} \left(\mathbf{S}_{ij} \sum_{i}^{l} \mathbf{S}_{ijk} \cdot \mathbf{I}_{ijk} \right) \right)$$
,

где I_{ijk} — значение индикатора i ; 1 — его номер в соответствующей группе, m — номер группы в определенном блоке, S_{ijk} — вес индикатора в группе, S_{ij} — вес группы в блоке.

При оценке текущего состояния ЭБ разных стран применяется от 12 (Мировой Энергетический Форум [4]) до 34 (Международный Энергетический Совет [5]) и более индикаторов.

В России для этой цели в [6] предлагается использовать 37 индикаторов. Из них к числу наиболее важных объектов анализа относятся 14 [7]. В их число входят: доля природного газа в структуре первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), динамика

уровня цен на ТЭР внутри страны, изменение энергоемкости ВВП, соотношение добычи и использования внутри страны разных видов топлива, доля экспорта ТЭР в общем объеме экспорта, доля в общем экспорте ТЭР продукции нефтепереработки и нефтехимии. Эти индикаторы можно использовать и при комплексной оценке ЭБ прогнозируемых вариантов развития ТЭК страны. Остальные предлагаемые в этой публикации индикаторы (объем неплатежей, забастовки, чрезвычайные ситуации на объектах ТЭК и другие) важны лишь при характеристике текущего состояния ЭБ.

Очевидно, что в условиях энергетического перехода даже для оценки текущего состояния ЭБ России потребуется расширить круг учитываемых факторов за счет таких индикаторов, как эмиссия CO_2 на человека, изменение площади лесов, разнообразие и стоимость источников энергоснабжения и других, используемых в международной практике индикативного анализа.

1. Обоснование состава и значимости индикаторов. Возможный состав индикаторов для комплексной оценки состояния ЭБ в прогнозных исследованиях ТЭК России показан в табл. 1. При его формировании учитывались: меняющиеся цели прогнозных исследований, зарубежный опыт и российские особенности — независимость от импорта энергоресурсов. Следует отметить, что предлагаемые индикаторы характеризуют, прежде всего, экономический и экологический аспекты ЭБ.

При группировке индикаторов, имеющих разные единицы измерения, возникает проблема их нормирования — приведение в сопоставимый вид. При мониторинге изменения состояния ЭБ за определенный промежуток времени эта проблема решается выражением всех индикаторов в процентах к их значению в реперном году или в базовом варианте.

Важной и сложной проблемой, возникающей при конструировании обобщенного индекса ЭБ, является определение весов отдельных индикаторов. В настоящее время эти веса, как правило, задаются экспертно. Однако, если варианты развития ТЭК определяются с помощью оптимизационных моделей, то появляется возможность оценивать значимость некоторых индикаторов по их влиянию на решение (критерий оптимальности) модели.

Такой оценке может также помочь анализ опыта зарубежных организаций, определяющих и сравнивающих состояние ЭБ разных стран. При этом надо учитывать, что численные значения того или иного индикатора зависят от структуры интегрального индекса ЭБ и количества используемых индикаторов. Эта зависимость видна из табл. 2, в которой приведены некоторые индикаторы и их веса, используемые в практике Global Energy Institute (США) — U.S. Energy Security Risk [8], International Energy Security Risk [9] и World Energy Council — World Energy Trilemma Index [5].

Таблица 1. Возможный состав индикаторов для комплексной оценки состояния ЭБ вариантов развития ТЭК

Угрозы	Индикаторы	Перспектива	
		5-10 лет	более 10 лет
Экономичес-	Энергоемкость ВВП	+	+
кие	Доля затрат на потребляемую энергию в ВВП	+	-
	Душевое потребление ТЭР	+	+
	Душевое потребление электроэнергии	+	+
	Затраты на энергию и топливо в расходах		
	населения	+	-
	Цены на электроэнергию	+	+
	Динамика цен на топливо	+	+
	Волатильность мировых цен на нефть	+	-
	Доля энергетического экспорта в ВВП	+	-
	Отношение прироста запасов ТЭР к их добыче	+	-

	Доля ТЭК в ВВП	+	-
	Доля ТЭК в общих капиталовложениях	+	-
Экологические	Эмиссия СО ₂ на душу населения	+	+
	Карбоноемкость экономики	+	+
	Эмиссия СО2 от электростанций	+	+
	Доля безуглеродной генерации	+	+
Технологичес-	Износ основных производственных фондов в		
кие	отраслях ТЭК	+	-
	Удельный расход топлива на электростанциях	+	+
	Доля распределенной генерации	+	-
	Резервные мощности электростанций	+	-

Целесообразность использования того или иного индикатора при конструировании обобщенного индекса ЭБ отмечена знаком плюс.

Таблица 2. Веса некоторых индикаторов, используемых при комплексной оценке состояния ЭБ

	Интегральные индексы ЭБ			
Индикаторы	US Energy	International	World Energy	
	Security Risk	Energy Security	Trilemma Index	
		Risk		
Энергоемкость экономики	3,2	7,0	5,0	
Душевое энергопотребление	2,5	3,0	-	
Доля затрат на потребляемую				
энергию в ВВП	3,6	4,0	-	
Затраты на энергию в расходах				
населения	1,7	3,0	-	
Цены на электроэнергию	3,0	6,0	3,0	
Цены на моторное топливо	9,0	7,0	3,0	
Цены на газ	-	-	3,0	
Волатильность цен на нефть	4,4	5,0	-	
Разнообразие источников электро-				
снабжения	2,0	5,0	-	
Доля безуглеродной генерации	1,1	2,0	5,0	
Карбоноемкость экономики	2,4	2,0	2,0	
Эмиссия СО ₂ на человека	1,6	2,0	1,0	

Включены лишь некоторые индикаторы, учитывающие в основном экономический и экологический аспекты ЭБ и не учитывающие страновые особенности, геополитический и технологический аспекты ЭБ.

Из зарубежного опыта построения интегральных показателей ЭБ интересны не сами численные значения весов отдельных индикаторов, а их относительная значимость. Ее можно определить, сравнив вес данного индикатора с весом выбранного ведущего индикатора. Пример такого подхода показан в табл. 3. Из нее и из анализа других зарубежных источников следует, что с позиции ЭБ значимость цены электроэнергии оценивается в 1,2-1,9 раза выше значимости индикатора эмиссии CO_2 .

Таблица 3. Оценка сравнительной значимости некоторых индикаторов

	Интегральные индексы ЭБ			
Индикаторы	US Energy	International	World Energy	
	Security Risk	Energy Security	Trilemma Index	
		Risk		
Энергоемкость экономики	1	1	1	

Душевое энергопотребление	0,9	0,6	-
Доля затрат на потребляемую			
энергию в ВВП	1,13	0,57	-
Затраты на энергию в расходах			
населения	0,59	0,43	-
Цены на электроэнергию	0,94	0,84	0,50
Цены на моторное топливо	2,8	1	0,7
Цены на газ	-	-	0,5
Волатильность цен на нефть	1,34	0,7	-
Разнообразие источников электро-			
снабжения	-	0,7	-
Доля безуглеродной генерации	0,34	0,29	0,83
Карбоноемкость экономики	0,34	0,29	0,33
Эмиссия СО ₂ на человека	0,5	0,29	0,17

Значимость индикатора определялась путем сравнения его веса с весом индикатора «Энергоемкость экономики». Численные значения весов этих индикаторов приведены в табл.

2. Источник: авторская оценка

2. Комплексная оценка ЭБ варианта. Такая оценка была использована в расчетах, иллюстрирующих применение индекса ЭБ для сравнения вариантов энергоснабжения Европейской части страны и Урала (табл. 4).

Расчеты проводились с использованием оптимизационной модели МИСС-ЭЛ [10]. Критерий оптимальности модели — минимум дисконтированных затрат на генерацию и магистральный транспорт электроэнергии. Все основные исходные данные интервально. Учет их неопределенности и множества возможных комбинаций требует получения и сравнения большого количества оптимальных для разных условий решений. Для этого в компьютерной программе МИСС-ЭЛ используется известный метод Монте Карло. При этом предусматривается выбор характера распределения вероятности значений исходных показателей внутри задаваемого диапазона.

Важная особенность МИСС-ЭЛ — определение инвестиционных рисков сооружения каждой рассматриваемой электростанции и варианта энергоснабжения в целом. Для этого определяется вероятность (частота) попадания данной станции в оптимальное решение. Чем меньше эта вероятность, тем выше риск реализации соответствующего инвестиционного проекта. Представляется, что риски для потенциальных инвесторов могут дополнить список индикаторов ЭБ [11].

Таблица 4. Значения используемых индикаторов энергетической безопасности рассматриваемых вариантов

Показатель	Ед. измер.	Регион	Вариант А	Вариант Б
Средняя стоимость	Цент/кВтч	Европейская часть	7,8	8,1
электроэнергии		Урал	7,6	7,9
Инвестиционный риск	%	Европейская часть	3-6	8-15
варианта (вероятность		Урал	1-4	4-10
дефицита)				
Доля станций с риском	%	Европейская часть	2-5	4-8
для инвесторов более 50%		Урал	0	1
Выбросы СО2	Млн. т	Европейская часть	3,0	2,9
		Урал	1,4	1,3

Результаты оптимизационных расчетов для прогнозируемых условий энергоснабжения Урала и шести (объединенных в таблице) федеральных округов Европейской части РФ в период 2025-2030 гг. В варианте Б стоимость топлива выше, чем в варианте А (газа на 25%, угля на 5%).

Удорожание топлива снижает долю угольных и газовых электростанций в прогнозируемом вводе новых мощностей, уменьшая выбросы CO_2 (особенно на Урале). Но при этом увеличиваются стоимость генерации электроэнергии и риски для инвесторов (табл. 5). Комплексный показатель ЭБ учитывает это разнонаправленное влияние. Его рост говорит о негативных в целом последствиях для состояния ЭБ повышения цен на топливо. Эти последствия разные в разных регионах. Изменение обобщенного индекса ЭБ всего макрорегиона равно 1,6% (учитывая, что доля Урала в производстве электроэнергии составляет 22%).

Taosinga 3. Ogenka coctosinis 35 pernonos upu ygoposkanisi tonsinis			
Показатель	Bec	Изменение показателя, %	
	индикатора	Европейская Урал	
		часть	
Стоимость электроэнергии	0,5	3,8	3,6
Выбросы СО2	0,3	-3,0	-7,0
Инвестиционный риск варианта	0,1	6,5	4,5
Доля станций с риском более 50%	0,1	2,5	1,5
Комплексный (обобщающий) индекс ЭБ		2	0,3

Таблица 5. Оценка состояния ЭБ регионов при удорожании топлива

В России при оценке состояния ЭБ важно учитывать территориальные различия в условиях энергоснабжения [12]. При таком учете комплексный индекс ЭБ энергоснабжения страны упрощенно можно выразить следующим образом:

КИЭБ =
$$\sum_{r} \sum_{i} (\boldsymbol{I}_{ri} \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{\gamma}_{ri}) \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{\gamma}_{r}$$
,

где I_{ri} – индикатор i в регионе r, γ_{ri} – его вес, γ_r – доля региона в энергопотреблении страны.

Заключение. Как за рубежом, так и в России индикативный анализ в основном используется для оценки текущего состояния энергетической безопасности. Представляется, что получаемые на его основе комплексные индексы ЭБ могут дополнить состав критериев, используемых при сравнении и выборе вариантов развития ТЭК и региональных систем энергоснабжения. С увеличением горизонта прогнозирования состав используемых индикаторов должен уменьшаться. При этом значимость экономической и экологической составляющей ЭБ будет расти. Индикативный анализ ЭБ играет ключевую роль в краткосрочных прогнозах. В оценке вариантов на перспективу до 10-15 лет важнее становится численная оценка стратегических угроз, а в долгосрочных прогнозах преимущество будет иметь сравнение вариантов (траекторий развития) по устойчивости к вероятным принципиальным изменениям в условиях развития ТЭК.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. № AAAA-A21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

Список источников

1. Кононов Ю.Д. Анализ зарубежного опыта комплексной оценки энергетической безопасности / Ю.Д. Кононов // Энергетическая политика, 2018. - № 6. - C. 98-107.

- 2. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide / OESD, 2018, 152 p.
- 3. Augutis J., et all. Integrated energy security assessment // Energy, 2017, v. 138, pp. 890-901.
- 4. WEF. Global Energy Architecture Performance Index, Report 2017, 32 p., available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf (accessed: 14.02.2020)
- 5. WEC. World Energy Trilemma 2019 Map, 2019, 79 p., available at: http://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf (accessed: 06.07.2020)
- 6. Методические рекомендации по оценке состояния энергетической безопасности Российской Федерации на федеральном уровне. / Под ред. С.М. Сендерова. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. 35 с.
- 7. Сендеров С.М. Состояние энергетической безопасности России на федеральном уровне: методические подходы к оценке и основные результаты / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук // Известия РАН. Энергетика, 2018. № 2. С. 3-12.
- 8. Index of U.S. Energy Security Risk (2018 Edition) / Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerse, 2018, 92 p., available at: http://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/us-energy-security-risk-2018.pdf (accessed: 31.01.2020)
- 9. International Index of Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerse, 2018, 88 p.
- 10. Кононов Ю.Д., Использование стохастического моделирования при выборе вариантов энергоснабжения регионов с учетом инвестиционных рисков / Ю.Д. Кононов, В.Н. Тыртышный, Д.Ю. Кононов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2018. № 2(10). С. 80-87.
- 11. Кононов Ю.Д. Экономическая составляющая энергетической безопасности методические подходы к ее оценке / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2019. Т. 15. № 6. С. 1086-1096.
- 12. Смирнова С.М. Энергетическая безопасность регионов России: состояние и тенденции изменения за последние шесть лет / С.М. Смирнова, С.М. Сендеров, // Энергетическая политика, 2018. № 1. С. 16-23.

Кононов Юрий Дмитриевич, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории взаимосвязей экономики и энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, kononov@isem.irk.ru. Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Кононов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории взаимосвязей экономики и энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, stranger72@bk.ru. Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 661.311:338.27

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.009

The mix and significance of energy security metrics as depending on the objectives of a projection and the time frame covered by it

Yuri D. Kononov, Dmitry Yu. Kononov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, kononov@isem.irk.ru

Abstract. This study considers the issue of extending the existing methods of indicator-based analysis of the current energy security (ES) performance to a comprehensive assessment of options for the development of energy systems. The relevance of the above issue is due to the increasing uncertainty of the future, including the beginning of the transition to a low-carbon strategy. The study proposes a mix of metrics that varies depending on the time frame covered and takes into account the economic and environmental aspects of ES. An approach to assessing the significance of individual metrics in the formation of comprehensive overall metrics of the ES performance is outlined. The results of optimization calculations to assess changes in such metrics for two options for power supply of the European Russia and the Ural are presented. These options differ in the cost of fuel for power plants (in the second option, gas is 25% more expensive and coal 5% more expensive than in the first option). The rising cost of fuel affects the mix of capacity additions in different regions, increasing the share

of carbon-free plants and reducing CO_2 emissions. However, this increases the cost of generating electricity and risks for potential investors. The overall metric of ES takes into account this multidirectional influence. Its growth indicates that the first option is more preferable from the standpoint of ES. It is concluded that it is possible and expedient to use this kind of metrics as an additional performance criterion when comparing options for the development of the energy sector and the regional system of energy supply. As the projection time frame increases, the number of the metrics used should decrease, and the importance of the economic and environmental aspects of ES will grow.

Keywords: energy security, indicator-based analysis, forecasting, optimization

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment No. (FWEU-2021-0003 reg. No. AAAA-A21-121012090014-5) of the program for basic research of the Russian Federation for 2021-2030 and was supported in part by a Russian Foundation for Basic Research grant under research project No. 20-010-00204.

References

- 1. Kononov Yu.D. Analiz zarubezhnogo opyta kompleksnoj ocenki energeticheskoj bezopasnosti [Analysis of foreign experience of a comprehensive assessment of energy security]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2018, no. 6, pp. 98-107.
- 2. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide. OESD, 2018, 152 p.
- 3. Augutis J., et all. Integrated energy security assessment, Energy, 2017, v. 138, pp. 890-901.
- 4. WEF. Global Energy Architecture Performance Index, Report 2017, 32 p., available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf (accessed 14.02.2020)
- 5. WEC. World Energy Trilemma 2019 Map, 2019, 79 p. available at: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf
- 6. Metodicheskie rekomendacii po ocenke sostoyaniya energeticheskoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii na federal'nom urovne [Guidelines for assessing the state of energy security of the Russian Federation at the federal level]. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2013, 35 p.
- 7. Senderov S.M., Rabchuk V.I. Sostoyanie energeticheskoj bezopasnosti Rossii na federal'nom urovne: metodicheskie podhody k ocenke i osnovnye rezul'taty [The state of Russia's energy security at the federal level: methodological approaches to assessment and main results]. Izvestiya RAN. Energetika, , 2018, no. 2, pp. 3-12.
- 8. Index of U.S. Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerse, 2018, 92 p. available at: https://www.globalenergyinstitute.org /sites/default/ files/us-energy-security-risk-2018.pdf (accessed31.01.2020)
- 9. International Index of Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerse, 2018, 88 p
- 10. Kononov Yu.D., Tyrtyshnyj V.N., Kononov D.Yu. Ispol'zovanie stohasticheskogo modelirovaniya pri vybore variantov energosnabzheniya regionov s uchetom investicionnyh riskov [The use of stochastic modeling in the selection of energy supply options for regions, taking into account investment risks]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2018, no. 2(10), pp. 80-87.
- 11. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. E`konomicheskaya sostavlyayushhaya e`nergeticheskoj bezopasnostii metodicheskie podxody` k ee ocenke[Economic component of energy security and methodological approaches to its assessment]. Natsional'nyye interesy: prioritety i bezopasnost', 2019, vol. 15, no. 6, pp. 1086-1096.
- 12. Smirnova S.M., Senderov S.M. Energeticheskaya bezopasnost' regionov Rossii: sostoyanie i tendencii izmeneniya za poslednie shest' let [Energy security of Russian regions: state and trends of change over the past six years]. Energeticheskaya politika [Energy Policy.], 2018, no. 1, pp. 16-23.

Yuri D. Kononov, Prof. Dr. of Sciences in Economics, Principal Researcher, "Economy and Energy Relationships" Laboratory Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, kononov@isem.irk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Dmitry Yu. Kononov, Senior Researcher, "Economy and Energy Relationships" Laboratory Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, stranger72@bk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 12.05.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 05/12/2022; approved after reviewing 05/20/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 620.95.001.76

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010

Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы

Кулагина Людмила Владимировна 1 , Штым Константин Анатольевич 2 , Кириллова Ирина Валерьевна 1

¹ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,

Россия, Красноярск, klvation@gmail.com

² ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,

Россия, Владивосток

Аннотация. Устойчивый тренд последних десятилетий — поиск и внедрение эффективных, рациональных и возобновляемых источников тепловой энергии для снижения загрязнения окружающей среды. Пеллеты из биомассы (отходов древесины и сельского хозяйства) можно использовать в качестве биотоплива, что является эффективным методом получения биотоплива с такими же характеристиками, как древесина. В статье приведены результаты экспериментов по получению пеллет с включением отходов животноводства и предложена математическая модель процесса горения биотоплива, подтверждающие, что добавление в определенных пропорциях к биомассе сырья отходов животноводства — экологичная, ресурсосберегающая и эффективная альтернатива производства традиционного топлива.

Ключевые слова: ресурсосбережение, биотопливо, математическая модель, альтернативная энергетика, загрязнение атмосферы

Цитирование: Кулагина Л.В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы / Л.В. Кулагина, К.А. Штым, И.В. Кириллова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. - № 2(26). - С. 104-114. - DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010.

Введение. В последние десятилетия мировая зависимость от ископаемого топлива стала критической из-за нескольких факторов: непрерывного роста населения, урбанизации, истощения запасов нефти, непрерывного роста цен на нефтепродукты, глобального потепления. Отрасли промышленности, зависящие от невозобновляемого топлива (уголь, природный газ), вызвали резкое увеличение выбросов парниковых газов, что привело к высокому уровню загрязнения окружающей среды [1, 2]. Возобновляемые источники являются самыми быстрорастущим источниками мировой энергии, потребление увеличивается на 3% в год. Известно, что состав и количество отходящих газов напрямую зависит от вида сжигаемого топлива. Сжигание природного газа ведёт к эмиссии в атмосферу NO_x и CO₂. Использование органического топлива (в первую очередь мазута) является причиной выбросов NO_x, SO₂, золы, соединений ванадия, солей натрия и др. Твердое топливо, помимо вышеупомянутых компонентов, способствует накоплению золовых частиц, сажи, несгоревших частиц, золошлаковых отходов [3].

Кризисное состояние энергетического и промышленного секторов стимулировало рост использования возобновляемых источников энергии, таких как, солнечная, ветровая и геотермальная энергия, биомасса и сельскохозяйственные отходы. Эти источники доступны везде и хорошо известны как альтернативные источники, эта чистая и неисчерпаемая энергия может уменьшить загрязнение окружающей среды; тем не менее, ее полный потенциал еще не реализован из-за проблем, связанных с обращением, транспортировкой, хранением и сжиганием сырья [2, 4]. Вероятно, энергетические системы в будущем будут базироваться на интеграции как традиционных, так и нетрадиционных источников тепловой и электрической энергии, систем ее транспортировки, накопления и распределения. Экологические требова-

ния современности создают предпосылки для разработки новых экологоэффективных альтернативных видов топлива, а также математических и вычислительных систем для моделирования процессов горения композиционных смесей с учетом разности состава конечных продуктов [5].

Особенности резко континентального климата большей части территории РФ обусловливают значительную составляющую систем теплоснабжения в суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов (около 400 млн. т/год, 45 % от общего расхода). Вследствие этого достижение реальных показателей энергоэффективности в целом по стране невозможно без повышения эффективности одной из наиболее энергозатратных отраслей народного хозяйства — теплоснабжения [2]. В сфере теплоснабжения присутствует сегмент, который зачастую недооценивается — автономные источники тепла (АИТ) мощностью до 1 МВт, к ним можно отнести котлы в домах частного сектора и на объектах малого и среднего бизнеса. В 2022 году Правительство РФ выделило 12,9 млрд. рублей на перевод частных домов в Омске, Красноярске, Новокузнецке и Чите с угля на альтернативное топливо [6], это дает предпосылки для развития предлагаемой технологии.

Одним из направлений повышения эффективности в энергетике является комплексное использование сырья, создание замкнутых газо- и водооборотных систем; разработка принципиально новых и совершенствование действующих процессов производства; переработка и использование энергетических отходов (теплота, зола, шлак, продукты очистки дымовых газов и т.п.). В настоящее время, несмотря на успешный опыт эксплуатации ветроустановок и солнечных панелей в Европе, США и Канаде, нет ясности в стратегии развития энергетики на ближайшие годы. В связи с этим, в настоящее время слабо разработаны теоретические основы процессов производства, зажигания и горения смесевых композиционных топлив, это в основном связано с тем, что древесина является сложным (с химической точки зрения) композиционным материалом, состоящим из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, пентозанов и других полисахаридов и кислот [7-11].

Математическое моделирование сжигания биотоплива. Разработка наиболее эколого- и энергоэффективных составов биотопливных композиций по результатам экспериментальных исследований процессов зажигания и горения существенно затруднена вследствие большого объема возможных вариаций соотношений основных компонентов топлива, условий теплообмена и характерных размеров топливных частиц. Исследователями доказано, что смешивание двух видов сырья биомассы может улучшить характеристики долговечности производимых пеллет [11].

Состав образующихся в результате термического разложения пеллет твердых (кокс) [12], жидких (биомасло и смола) [13] и газообразных (летучие) продуктов [14] зависит от вида древесины и скорости нагрева топлива. Известно [15], что при пиролизе древесины образуется несколько промежуточных продуктов термического разложения различных, как по химическому составу, так и по фазовому состоянию (твердые, жидкие и газообразные). В процессе горения биотоплива последовательность пиролиза описывается как термическое разложение в одну стадию, но с образованием трех компонентов: уголь, смола и газ (рис. 1). Использование этой модели одностадийного пиролиза может быть как адекватной, так и недостаточно обоснованной при прогнозировании процессов зажигания частиц древесной биомассы [11].



Рис. 1. Схема пиролиза древесины с образованием трех продуктов реакции

В исходный момент времени частица древесного топлива вводится в высокотемпературную среду и греется за счет конвекции и излучения. В итоге усиленного нагрева инициируется процесс улетучивания воды. Фронт улетучивания движется от поверхностных слоев в глубинные. В итоге складывается пористый древесный каркас с высочайшим тепловым сопротивлением. Водяные пары, возникающие при испарении, фильтруются через слой сухого горючего, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса.

Прогрев частички древесной породы приводит к тепловому разложению и выходу летучих продуктов, которые вместе с парами воды и продуктами термохимического взаимодействия углерода и водяных паров фильтруются к плоскости частички горючего [12]. В итоге формируется парогазовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критичных значений температур и концентраций горючего.

Далее представлена математическая модель для крупных частиц биомассы, в которых существует значительный температурный градиент. Модель учитывает конвекцию и диффузию водяного пара, капиллярную конвекцию воды за счет градиента давления и диффузию связанной воды в порах частиц топлива. Частица рассматривается как одномерная, но модель может быть расширена до двух- или трехмерного варианта. Сделаны следующие допущения: частица биомассы состоит из множества компонентов, в том числе твердых, газообразных и жидких, все компоненты находятся в тепловом равновесии; геометрия частицы сведена к одномерной модели; газы внутри пористой структуры частицы подчиняются закону идеального газа; гомогенными газовыми реакциями внутри частицы пренебрегают.

В момент времени t и в пространственной координате r частицы биомассы плотность биомассы $\rho_{bm} = (r,t)$ изменяется во времени в процессе термохимического превращения следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_{bm}}{\partial t} = \dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c,$$

где $\dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c$ скорость потери массы частицы за счет сушки (R_m) , выделения летучих продуктов (R_v) и коксования (R_c) .

В единице частицы топлива объем влаги обозначается $\rho_m = (r,t)$ и изменяется в процессе горения. Если пренебречь конвекцией и диффузией влаги в частице, то изменение $\rho_m = (r,t)$ во времени можно описать:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -R_m,$$

Изменение массы кокса в частице описывается уравнением ниже, где исходный член $\dot{\omega}_c$ учитывает образование угля за счет пиролиза и расход кокса за счет окисления и газификации:

$$\frac{\partial \rho_c(r,t)}{\partial t} = \dot{\omega}_c = R_C - R_{CO_2} - R_{CCO_2} - R_{CH_2O},$$

Скорость гетерогенных реакций угля можно представить в следующем виде:

$$R_{ci} = \frac{M_C}{\Omega M_i} S_{char} A_i T \exp(-\frac{E_i}{RT}) \rho_j,$$

где i – номер реакции (между R_{CO_2} , R_{CCO_2} и R_{CH_2O}), j = O_2 , CO_2 , H_2O , Ω – стехиометрический коэффициент, S_{char} – удельная внутренняя поверхность (м²/м³); M – молекулярный вес.

Уравнение сохранения для газообразных веществ:

$$\begin{split} \frac{\partial}{\partial t} = & (\epsilon p_{g} Y_{i}) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \Big(G(r) \epsilon p_{g} u_{g} Y_{i} \Big) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \Big(G(r) \epsilon p_{g} D_{\text{эфф}} \frac{\partial Y_{i}}{\partial r} \Big) + \dot{\omega}_{i}, \\ i = & O_{2}, N_{2}, \text{CO,C } O_{2}, \text{H}_{2} \text{ O,CH}_{4}, \text{H}_{2} \text{ и смола,} \end{split}$$

где є — пористость; p_{g} — плотность газа в частице; u_{g} — скорость газа в порах частиц; Y_{i} — массовая доля частиц газовой фазы i.

Эффективный коэффициент диффузии газа в порах частиц рассчитывается следующим образом:

$$D_{\mathrm{a}\mathrm{d}\phi} = rac{D_{ab^{arepsilon}}}{ au} = D_{ab^{arepsilon^2}} \; ,$$

где τ – кривизна, которую можно описать как $\tau = 1/\epsilon$. Скорость образования газообразных частиц i, $\dot{\omega}_i$, определяется из подмоделей для сушки, пиролиза и горения/газификации кокса.

Массовая доля газовой фазы равна

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon p_g) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon p_g u_g) = \dot{\omega}_g = \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i,$$

где N — число частиц в газе.

Уравнение сохранения энергии основано на предположении о локальном тепловом равновесии для газа, жидкости и твердого тела:

$$\begin{split} &\frac{\partial}{\partial t} \Biggl(\Biggl(\rho_{m} C_{p_{m}} + \rho_{bm} C_{p_{bm}} + \rho_{C} C_{p_{C}} + \varepsilon p_{g} \sum_{i=1}^{N} Y_{i} C_{p_{i}} \Biggr) T \Biggr) + \\ &+ \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \Biggl(G(r) \varepsilon p_{g} u_{g} \sum_{i=1}^{N} Y_{i} C_{p_{i}} T \Biggr) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \Biggl(G(r) k_{\text{3} \phi \phi} \frac{\partial T}{\partial r} \Biggr) + \dot{\omega}_{\text{\tiny TEILII}}, \end{split}$$

где T — температура компонентов частиц при (r,t); $\dot{\omega}_{\text{тепл}}$ — включает эндотермическую теплоту испарения, теплоту пиролиза и теплоту газификации кокса, а также экзотермическую теплоту окисления кокса и изменение явной энтальпии; C_p — теплоемкость.

Коэффициент эффективной теплопроводности $k_{\rm эфф}$ представляет собой сумму коэффициентов теплопередачи радиацией $k_{\rm pag}$ и конвекцией $k_{\rm конв}$. Коэффициент кондуктивной теплопередачи является взвешенной по массе суммой влаги (k_m) , угля (k_c) , биомассы (k_{bm}) и теплопроводности газа (k_g) .

Эффективный коэффициент проводимости внутри частицы равен

$$\begin{split} k_{\mathrm{3}\varphi\varphi} &= k_{\mathrm{конB}} + k_{\mathrm{pad}}, \\ k_{\mathrm{конB}} &= \varepsilon k_{g} + (1 - \varepsilon) \Big[\Big(p_{m} k_{m} + p_{bm} k_{bm} + p_{c} k_{c} \Big) \big/ p_{m} + p_{bm} + p_{c} \Big], \\ k_{\mathrm{pad}} &= \frac{\varepsilon \sigma T^{3} d_{\mathrm{nop}}}{\in}, \end{split}$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана; ϵ — коэффициент излучения; $d_{\text{пор}}$ — диаметр свободного объема внутри частицы.

Компонентный состав биотоплива. Биомасса имеет различные преимущества - доступность, низкая стоимость, нейтральная характеристика CO₂ и широкое распространение [2, 16]. Хотя топливо из биомассы используется повсеместно, в странах с низким уровнем дохода оно сжигается напрямую, что представляет непосредственную опасность для здоровья и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Исходное сырье для производства пеллет: щепа, опилки, низкотоварная древесина, отходы после с/х переработок, (лузга подсолнуха, солома, шелуха зерновых, отходы круп),

опилки, трава и т.д. Использование биомассы в ее естественном состоянии имеет ряд недостатков: низкая плотность, меньшая теплота сгорания на единицу объема, высокая влажность по сравнению с исходным материалом и высокая зольность, особенно в биомассе, содержащей большое количество коры; кроме того, использование требует дополнительных мер изза высокого потенциала загрязнения [17]. К недостаткам процесса относится сложность увеличения производственных мощностей из-за нехватки сырья. Возможным решением — является добавление в сырье альтернативных высококалорийных отходов (например, кроличьих ферм).

В кроличьем навозе в доступной водорастворимой форме содержатся активные соединения: фосфор (до 1,8%); кальций (до 2,4%); натрий (до 2,2%); калий (порядка 1,1%) и другие, среди которых в зависимости от местности и рациона кормления встречаются цинк, медь, марганец, железо, а также редкоземельные элементы.

Сбор образцов для представленного в работе эксперимента проводился на кролиководческой ферме в городе Назарово (географические координаты: 56°00' ю.ш. и 90°23' в.д.) в следующих условиях: среднегодовая температура на ферме 13-24 °C, месячная относительная влажность 63-79%, включая «зону комфорта» с температурой 19 °C и уровнем влажности от 60 до 65%. В хозяйстве содержались 150 кроликов. Подготовка сырья осуществлялась в период с июля 2021 г. по декабрь 2021 г. Навоз помещали в большие полиэтиленовые пакеты, далее для получения сырья требуемых характеристик использовался ГОСТ Р 54192-2010, Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием [17]. Сущность метода заключается в высушивании образца при температуре (105±2) °C в воздушной атмосфере до постоянной массы (рис. 2).

Технология производства уплотненной биомассы в виде пеллет по технологии «Пини Кей» (часто такие брикеты называют евродрова, или евробрикеты.) с включением отходов кроличьих ферм, включала следующие операции: сбор и транспортировка навоза; хранение и сушка; грубое и мелкое измельчение навоза; брикетирование, охлаждение, кондиционирование и упаковка. Топливные брикеты стандарта «Пини Кей» имеют форму неправильного многогранника или цилиндрической формы, с отверстием внутри по всей длине. Отверстие обеспечивает дополнительную тягу внутри брикета, благодаря этому брикеты горят без принудительной вентиляции и могут успешно использоваться в печах с малой тягой, кроме того, значительно увеличивается теплопроводность.

Во всех существующих методах уплотнения биомассы исходным материалом являются твердые частицы. Преимущество «Пини Кей» — отсутствие связующих веществ при производстве пеллет. При добавлении в исходное сырье отходов в объеме 25% и больше пеллеты рассыпались. Прочностные характеристики пеллет связаны с наличием нативного лигнина и гемицеллюлоз как ответственных за развитие межволоконного взаимодействия. Основной температурный переход полимеров связан с появлением сегментальной подвижности, в результате чего полимер переходит из стеклообразного состояния в высокоэластичное.

Данное оборудование может быть использовано для уплотнения смесей различной грануляции, получаемых путем измельчения биомассы хвойных деревьев, тополей, дубов, берез, сорных культур и др. После получения пеллет с включением отходов животноводства образцы сравнивали по следующим показателям качества: влажность, зольность и теплотворная способность (рис. 3).



Рис. 2. Высушивание навоза согласно ГОСТ Р 54192-2010.



Рис. 3. Пеллеты, изготовленные из типового сырья (a) и с добавлением отходов кроличьих ферм (δ)

Теплотворную способность и зольность пеллет определяли с помощью калориметра IKA С 6000, оснащенного стандартной кислородной бомбой, используемого для твердых и жидких горючих веществ таких как уголь, кокс, нефтяное масло, мазут, топливо из биомассы, а также строительные материалы. Высушенную биомассу анализировали в соответствии с методиками ГОСТ Р 55661-2013 [18] и ГОСТ 147-2013 [19]. Навеску, содержащую биомассу, помещали в бомбу, окруженную водой и находящуюся в калориметрическом сосуде. Калориметрический сосуд с бомбой размещен в теплоизолированной оболочке с комбинированным нагревом/охлаждением (рис. 4).



Рис. 4. Процесс испытаний традиционных и полученных в ходе работы пеллет с помощью калориметра IKA С 6000

Определение содержания элементов C, H, N, O, S реализовано с помощью универсального элементного анализатора Vario MACRO cube, предназначенного для определения макросодержаний элементов в твердых и жидких пробах. Результаты сравнительного анализа пеллет представлены в таблице.

Основными выбросами загрязняющих веществ, возникающими при сжигании твердого биотоплива из опилок, являются оксиды азота NO_x [20]. Концентрация оксида азота в выхлопных газах, с одной стороны, оказывает негативное влияние на окружающую среду, а с другой стороны, является показателем интенсивности процесса горения. Наличие оксидов азота в дымовых газах дает информацию о температуре горения, так как они образуются при высоких температурах [21]. Как видно из таблицы, в полученном образце, благодаря технологии подготовки сырья и заданной температуре при производстве пеллет, выбросы NOx отсутствуют, что подтверждает экологичность предлагаемого биотоплива.

Зола является негорючим компонентом биомассы, и чем выше зольность топлива, тем ниже его теплотворная способность. Очевидно, что уменьшение содержания древесных компонентов и увеличение количества биомассы приведет к уменьшению зольности. Низкая зольность ценна, а избыток золы вызывает проблемы при горении, препятствуя проникновению воздуха в печь, тем самым, замедляя скорость горения такого пеллет.

Теплотворная способность является стандартной мерой содержания энергии в топливе, определяется как количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива и охлаждении продуктов сгорания до 298 К. Когда скрытая теплота конденсации воды включается в теплотворную способность, ее называют калорийностью. Однако в печах любая влага, содержащаяся в топливе, образующаяся в процессе горения, уносится в виде водяного пара, поэтому эта теплота не учитывается. Результат известен как чистая теплотворная способность или низшая теплота сгорания. Топлива, содержащие углерод с более высокой степенью окисления, будут иметь более низкую теплотворную способность, поскольку для их полного окисления требуется меньше кислорода. Однако, когда топливо содержит такие соединения, как углеводороды, которые имеют более низкую степень окисления, это имеет тенденцию повышать теплотворную способность биомассы. Таким образом, становится очевидным, что элементный состав сырья может играть жизненно важную роль в теплотворной способности биомассы.

Таблица. Сравнительный анализ пеллет из разных материалов

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	Результаты испытаний образца (<i>a</i>)	Результаты испытаний образца (<i>б</i>)
Влага общая, W^{r}_{t}	%	6,1	3,6
Зольность, сухое состояние, A ^d	%	2,7	2,0
Выход летучих веществ, Сухое беззольное состояние, V ^{daf}	%	82,7	82,0
Содержание углерода, сухое без- зольное состояние, С ^{daf}	%	52,7	53,2
Содержание водорода, сухое беззольное состояние, H ^{daf}	%	6,11	6,23
Содержание азота, сухое беззольное состояние, N ^{daf}	%	0,71	0,00
Содержание серы, сухое состояние,	%	0,00	0,00

S ^d			
Содержание серы, сухое беззольное состояние, S ^{daf}	%	0,00	0,00
Содержание кислорода, сухое без- зольное состояние, O ^{daf}	%	40,53	40,57
Высшая теплота сгорания, сухое состояние, Q_s^d	ккал/кг	4810	4910
Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q_s^{daf}	ккал/кг	4940	5010
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, $Q_i^{\ r}$	ккал/кг	4210	4400

Сравнивая значения, полученные в результате проведенных экспериментальных испытаний с данными, представленными в научной литературе [20, 21], приходим к выводу, зрения воздействия на окружающую среду использование пеллет из комбинированного сырья для отопления более выгодно, чем сжигание древесного биотоплива, из-за меньшего количества загрязняющих веществ и более высокой теплотворной способности.

Заключение. В статье представлена технология получения биотоплива с добавлением органических компонентов и разработана комплексная модель сжигания биомассы, приведена сравнительная количественная оценка теплопроизводительности и уровня воздействия на окружающую среду традиционных древесных пеллет и пеллет с добавлением отходов животноводческих хозяйств. Результаты, представленные в работе, доказывают, что полученные с включением отходов кроличьих ферм пеллеты могут успешно заменить традиционное биотопливо, благодаря высокой теплотворной способности (продолжительность горения значительно выше простых дров, не дымят при сгорании), снижению загрязнения воздуха и почвы, минимизации затрат при изготовлении.

В условиях нехватки сырья в лесодефицитных районах добавление местных доступных компонентов при производстве биотоплива дает ряд неоспоримых преимуществ: полная утилизация навоза, отсутствие вредных экологических воздействий на всех стадиях утилизации токсичных отходов жизнедеятельности животных и углеродсодержащих отходов и образований, снижение себестоимости производства.

Представленные результаты являются основой для дальнейших разработок в области компьютерного моделирования процессов сжигания топлива с включением отходов животноводства, оптимизации параметров топочного устройства с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и усовершенствования экономических показателей процесса изготовления сырья.

Список источников

- 1. Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science, 2010, pp. 63-81.
- 2. Кулагина Т.А. Теоретические основы защиты окружающей среды: учебн. пособие / Т.А. Кулагина, Л.В. Кулагина. Красноярск: СФУ, 2017. 362 с.
- 3. Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman M.M. A study on improved biomass briquetting. Energy for sustainable development, 2002, 6(2), pp.106–110.
- 4. Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P Energy saving technologies and mass thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry. Journal of Cleaner Production, 2020, v.274, DOI:10.10.16/j.clepro.2020.122997.
- 5. Сыродой С.В. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 01.04.14 «Библиотековедение, библиографоведение и книговедение» : диссертация

- на соискание ученой степени доктора технических наук / Сыродой Семён Владимирович; Томский политехнический университет. Томск, 2022. 403 с.
- 6. Абрамченко В. В. Частные дома в четырех городах переведут с угля на альтернативное топливо. URL: https://t.me/s/government_rus/2035 (дата обращения 12.05.2022).
- 7. Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. Fuel Process Technol, 2005, 86(9), pp.1021-1053.
- 8. Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling, AIChE J 2006, 52(12), pp. 4258–4272.
- 9. Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. Biomass Bioenergy 2004, 26(3), pp. 281–287.
- 10. Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. Fuel processing technology, 2001, 72, pp. 43–50.
- 11. Никитин В.М. Химия древесины и целлюлозы / Никитин В.М. // М.: Лесная промышленность, 1978. 368 с.
- 12. Кузнецов В.Г. Влияние кинетической схемы пиролиза на прогностические оценки характеристик процесса воспламенения частицы древесной биомассы/ Г.В. Кузнецов, С.В. Сыродой// Физика горения и взрыва, 2019. Т.55. №2. С. 82-96.
- 13. Gorton W.C., Knight J.A Oil from biomass by entrained flow pyrolysis. Biotechnol Bioeng Symp, 1984, v.14, pp.15–20.
- 14. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. Ind. Eng. Proc. Des. Dev, 1985, v.24, pp. 836–844.
- 15. Гришин А.М. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов/ А.М. Гришин, С.П. Синицын, И.В. Акимов// Физика горения и взрыва, 1991. Т.27. №6. С.17-23.
- 16. Патент на полезную модель № 205015, Устройство для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами: № 2020104971; заявл. 2021.02.25. Публ. и выдача пат. 2023.06.23 / Кулагина Л.В., Енютина Т.А., Кириллова И.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».
- 17. Кулагина Л.В. Повышение экологичности сжигания смесей в топках малого объёма за счёт включения органических компонентов / Л.В. Кулагина, И.В. Кириллова // E3S Web Conf.. Vol. 295. 2021.International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202129502002.
- 18. ГОСТ Р 54192-2010. Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 2. Общая влага. Ускоренный метод.
- 19. ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010). Топливо твердое минеральное. Определение зольности (Издание с Изменением N 1) / ГОСТ Р от 28 октября 2013 г.
- 20. Zhou, S. and Zhang, X. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, vol. 24(1), pp. 170-174.
- 21. Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass Bioenergy, 2006, vol.30, pp.648–654.

Кулагина Людмила Владимировна канд. техн. наук, доцент кафедры Техносферная и экологическая безопасность СФУ; AuthorID 596975, SPIN-код 1325-9320, ORCID 0000-0003-4406-5060, klvation@gmail.com, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 26.

Штым Константин Анатольевич докт. техн. наук, профессор, директор Департамента энергетических систем Политехнического института (Школы) ДВФУ, AuthorID 483983, SPIN-код 8616-043, shtym.ka@dvfu.ru, o. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7.

Кириплова Ирина Валерьевна аспирант кафедры Техносферная и экологическая безопасность СФУ, 20.04.01.01 Безопасность жизнедеятельности в техносфере, AuthorID 1029381, SPIN-код 9493-8756, kirina.24@yandex.ru, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 26.

UDC 620.95.001.76

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010

Development the Technology for the Production of Thermal Energy Using Biomass

Liudmila V. Kulagina¹, Konstantin A. Shtym², Irina V. Kirillova¹

¹Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, klvation@gmail.com

Abstract. A sustainable trend of recent decades is the search for and implementation of efficient, rational and renewable sources of thermal energy to reduce environmental pollution. Pellets from biomass (waste wood and agriculture) can be used as biofuels, which is an efficient method for obtaining biofuels with the same characteristics as wood. The article presents the results of experiments on obtaining pellets with the inclusion of animal waste and a mathematical model of the biofuel combustion process is proposed, confirming that the addition of animal waste in certain proportions to the biomass of raw materials is an environmentally friendly, resource-saving and efficient alternative to the production of traditional fuel.

Keywords: Resource Saving, Biofuel, Mathematical Model, Alternative Energy, Air Pollution

References

- 1. Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science, 2010, pp. 63–81
- 2. Kulagina T.A. Teoreticheskiye osnovy zashchity okruzhayushchey sredy: uchebn. posobiye [Theoretical foundations of environmental protection: Tutorial. Krasnoyarsk, SibFU, 2017, 362 p.
- 3. Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman M.M. A study on improved biomass briquetting. Energy for sustainable development, 2002, 6(2), pp.106–110.
- 4. Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P. Energy saving technologies and mass thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry. Journal of Cleaner Production, 2020, v.274, DOI:10.10.16/j.clepro.2020.122997.
- 5. Syrodoi, S.V. Public library in the system of continuous library and information education: specialty 01.04.14 «Library science, bibliography and book science». Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Tomsk Polytechnic University, 2022, 403 p.
- 6. Abramchenko V. V. Chastnyye doma v chetyrekh gorodakh perevedut s uglya na al'ternativ-noye toplivo [Private houses in four cities will be transferred from coal to alternative fuel]. Available at: https://t.me/s/government_rus/2035 (access 12.05.2022).
- 7. Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. Fuel Process Technol, 2005, 86(9), pp. 1021-1053.
- 8. Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling, AIChE J 2006, 52(12), pp. 4258–4272.
- 9. Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. Biomass Bioenergy 2004, 26(3), pp. 281–287.
- 10. Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. Fuel processing technology, 2001, 72: pp.43–50.
- 11. Nikitin V.M. Khimiya drevesiny i tsellyulozy [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 1978, 368 p.
- 12. Kuznetsov V.G., Syrodoi, S.V. Vliyaniye kineticheskoy skhemy piroliza na prognosticheskiye otsenki kharakteristik protsessa vosplameneniya chastitsy drevesnoy biomassy [Influence of the Pyrolysis Kinetic Scheme on the Predictive Estimates of the Characteristics of the Ignition Process of a Woody Biomass Particle]. Fizika goreniya i vzryva [Physics of combustion and explosion], 2019, v. 55, no. 2, pp. 82–96.
- 13. Gorton W.C., Knight J.A Oil from biomass by entrained flow pyrolysis. Biotechnol Bioeng Symp, 1984, v.14, pp.15–20.
- 14. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. Ind. Eng. Proc. Des. Dev, 1985, v.24, pp. 836–844.
- 15. Grishin A.M., Sinitsyn S.P., Akimov I.V. Sravnitel'nyy analiz termokineticheskikh postoyannykh sushki i piroliza lesnykh goryuchikh materialov [Comparative Analysis of Thermokinetic Constants of Drying and Pyrolysis of Forest Combustible Materials]. Fizika goreniya i vozdeystviya [Physics of Burning and Explosure], 1991, v. 27, no. 6, pp. 17–23.

²Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok, *shtym.ka@dvfu.ru*

- 16. Kulagina L.V., Enyutina T.A., Kirillova I.V. Device for preparation for combustion of a water-fuel mixture with organic components: № 2020104971 Utility Model Patent № 205015
- 17. Kulagina L.V., Kirillova I.V. Povysheniye ekologichnosti szhiganiya smesey v topkakh malogo ob"yoma za schot vklyucheniya organicheskikh komponentov [Improving the environmental friendliness of burning mixtures in small-volume furnaces due to the inclusion of organic components]. International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). E3S Web Conf., V. 295, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202129502002.
- 18. GOST R 54192-2010. Biofuels are solid. Determination of moisture content by drying. Part 2. General moisture. accelerated method.
- 19. GOST R 55661-2013 (ISO 1171:2010). Solid mineral fuel. Determination of ash content (Edition no. 1) / GOST R 28 October 2013.
- 20. Zhou, S. and Zhang, X. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, vol. 24(1),pp. 170-174.
- 21. Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass Bioenergy, 2006, vol.30, pp.648–654.

Kulagina Liudmila Vladimirovna, PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant Professor of the Chair «Technospheric and Ecological Safety» in SibFU; AuthorID 596975, SPIN-κοд 1325-9320, ORCID 0000-0003-4406-5060, klvation@gmail.com, 26 Kirenskogo str., Krasnoyarsk, Russia.

Shtym Konstantin Anatolievich, PhD (Doctor of Technical Sciences), Full Professor, Head of the Department of Construction Engineering Systems in Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University, AuthorID 483983, SPIN-κο∂ 8616-043, shtym.ka@dvfu.ru, Level 7, Building C, FEFU Campus, Russky Island.

Kirillova Irina Valerievna, PhD student of the Chair «Technospheric and Ecological Safety» in SibFU, AuthorID 1029381, SPIN-κοθ 9493-8756, kirina.24@yandex.ru, 26 Kirenskogo str., Krasnoyarsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 24.04.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.

The article was submitted 04/24/2022; approved after reviewing 06/03/2022; accepted for publication 06/15/2022.

УДК 528.854.4

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.011

Подход к построению углеродной карты Ханты-Мансийского автономного округа на основе оценки биомассы с помощью данных дистанционного зондирования Земли

Бредихин Арсентий Игоревич¹, Мельников Андрей Витальевич²

Россия, г. Ханты-Мансийск, a_bredihin@ugrasu.ru

Аннотация. Ханты-Мансийский автономный округ-Югра обладает большой площадью лесных территорий (более 90% от всей площади округа). А лесная растительность естественным образом рано или поздно отмирает, вследствие чего из органического вещества происходит выделение углекислого газа в атмосферу и усиление глобального потепления.

Для недопущения повышения глобальной температуры необходимо вести учет запасов углерода. Помимо выбросов от сжигания топлива, диоксид углерода (CO2), который является парниковым газом, образуется при разложении мертвой растительности, поскольку растения накапливают и хранят в себе углерод. При этом Ханты-Мансийский автономный округ-Югра (ХМАО-Югра) обладает большой площадью лесов: по состоянию на 2020 год она составляет 503990 км² при общей площади территории округа в 534,8 тыс. км² [1, с. 608-610], что составляет 94,2% площади всего округа. Поэтому для учета запаса углерода в рамках округа необходимо оценить данный запас в виде количества растительной (лесной) биомассы.

Один из способов оценки растительной биомассы — создание углеродных карт с применением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Применение полученных с помощью методов ДЗЗ спутниковых снимков и методов их обработки позволит получить карту округа с полным охватом всей территории, а применение моделей машинного обучения позволит разработать модель, с помощью которой будет возможно получать углеродную карту округа с заданной точностью.

В данной работе приведен обзор решений зарубежных ученых за последние 5 лет в области ДЗЗ, направленных на создание углеродных карт. На основании данного обзора предложена программа исследований, которая позволит разработать подход, позволяющий получать цифровую углеродную карту ХМАО с необходимой точностью.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковый снимок, углерод, растительная биомасса, машинное обучение

Цитирование: Бредихин А.И. Подход к построению углеродной карты Ханты-Мансийского автономного округа на основе оценки биомассы с помощью данных дистанционного зондирования Земли / А.И. Бредихин, А.В. Мельников // Информационные и математические технологии в науке и управлении. $-2022.- \mathbb{N} \ 2(26).- C.\ 115-126.- DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.011.$

Введение. Ханты-Мансийский автономный округ-Югра является крупным нефте- и газодобывающим российским регионом. Он характеризуется большими объемами выбросов парниковых газов в атмосферу. Так, на территории округа имеется большое количество болот, которые являются источником метана (CH₄), а нефте- и газодобыча является источником диоксида углерода (CO₂). Кроме того, углерод содержится и в растительности (в т.ч. лесной).

Одним из способов оценки лесной биомассы округа является применение спутниковых изображений оптического и инфракрасного диапазонов совместно с лидарными снимками. Здесь примечательным является подход к решению данной задачи американскими учеными [2], который основан на применении полевых измерений с совместными данными НАСА. Суть подхода заключается в последовательном получении полевых измерений — массы деревьев на определенных участках, определении согласованности данных с сигналами лидара, обучении модели «случайный лес» на отдельных участках карты и вычислении с ее помощью биомассы на остальных участках карты.

¹Югорский государственный университет,

²Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,

В работе [2] описана усовершенствованная версия данного подхода из статьи [3]. В обоих случаях тот же коллектив ученых разрабатывал модели в континентальном масштабе – для Африки, Азии и Южной Америки и использовал для этого изображения MODIS с разрешением 500 м.

Однако для нашего случая подход необходимо модифицировать. Ведь разрешение изображений в 500 м оказывается недостаточным для построения углеродной карты в рамках региона $P\Phi$. Также следует принять во внимание тот факт, что различия в видах растительности, обусловленные различиями климата, также могут влиять на точность модели.

Данная статья рассматривает проблему получения углеродной карты. Она разбита на 4 части: в первой части будут подробно рассмотрены методы сбора полевых данных и преобразования их в значения биомассы. Вторая часть будет посвящена анализу сигналов лидара и проверке согласованности полевых данных с метриками сигналов лидара. В третьей части будет уделено внимание построению модели машинного обучения для вычисления значений биомассы различных участков будущей углеродной карты округа. В четвертой части работы будут приводиться предложения по изменению подхода к созданию углеродных карт для адаптации его к условиям северного региона.

1. Сбор полевых данных. Это первый этап создания углеродной карты. Для начала выбираются участки, соответствующие «пятнам» лидара GLAS.

«Пятна», т.е. отпечатки лидара GLAS, имеют диаметр около 70 метров и расположены на расстоянии 170 метров друг от друга. Съемка ведется вдоль поверхности Земли с помощью двух каналов с длинами волн 532 и 1064 нм [4]. Согласно данным из [5], архив данных лидара GLAS за 3 года (с 10.2018 по 01.2022) содержит примерно 5468 файлов общим размером ~11 Тб для территории XMAO.

Замечание. В работе [3] используются датасеты, в которых диаметр «пятен» равен 65 м; участок имеет форму квадрата со сторонами 40 метров.

Затем выбираются участки лесных массивов, целиком лежащие в «пятнах» лидара GLAS. Схема выбора участка в «пятне» лидара показана на рисунке 1. После чего в границах каждого участка измеряется диаметр ствола всех деревьев на высоте 1,3 м от земли. При вычислении биомассы деревьев используется среднее значение удельного веса дерева (плотность) на основе вида.

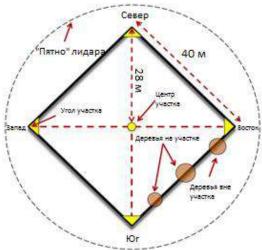


Рис. 1. Схема выбора участка в «пятне» лидара GLAS

В работе [2] для оценки биомассы предлагается регрессионная модель следующего вида:

$$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(\rho), \tag{1}$$

где AGB — значение биомассы (англ. above-ground biomass), D и H — диаметр и высота дерева, а ρ — плотность древесины. Однако на практике высота дерева не всегда доступна. Поэтому, как считают авторы [2], необходимо отойти от ее использования в модели:

$$\ln(AGB) = \alpha + b\ln(D) + c(\ln(D))^2 + d(\ln(D))^3 + \beta_3 \ln(p) \tag{2}$$

При логарифмировании данных окончательная оценка будет смещаться и, таким образом, нескорректированные оценки биомассы будут недооценивать реальные значения. Поэтому оценку необходимо умножать на поправочный коэффициент:

$$CF = exp\left(\frac{RSE^2}{2}\right),\tag{3}$$

где RSE – метрика полученной модели (англ. root square error – корень квадратичной ошибки). Авторы [2] утверждают, что разновидности данной модели в основном применяются для оценки биомассы широколиственных и тропических деревьев.

Лидары применяются для оценки биомассы и в аналогичных исследованиях. Так, в работе [6] авторы применяют гиперспектральные и лидарные данные для оценки биомассы кукурузы. Однако вместо спутниковых лидаров используется бортовой лидар Leica с дискретным возвратом, предназначенный для съемок на малой высоте. При этом в работе [6] процедура полевых измерений схожа с таковой в работе [3] – измерение высоты и массы стеблей кукурузы.

Способ получения полевых измерений в работе [7] полностью аналогичен основной работе ([3]) с тем отличием, что дополнительно измеряется высота дерева с помощью лазерного гипсометра. Там же приведены аллометрические уравнения, которые учитывают еще и высоту дерева. При этом уравнения предназначены для определения биомассы ствола, ветвей, листьев и плодов (sic!) дерева.

В работе [8] применяются лидарные данные и гиперспектральные изображения для определения влияния размера выбранного участка на точность определения биомассы. Причем оценивается не только надземная, но еще и подземная биомасса.

Работа [9] посвящена разработанному авторами методу оценки объема ствола под названием Outer Hull Model – OHM. Данный метод применяется для оценки биомассы отдельных деревьев, что в нашем случае может быть слишком затратно. Согласно полученным в [9] результатам, для хвойных деревьев биомасса хвои и ветвей дерева может достигать до 20% биомассы всего дерева.

В работе [10], посвященной оценке лесной биомассы, используются полученные в ходе миссии GEDI лидарные данные. Миссия GEDI была начата сравнительно недавно на момент публикации данной статьи — 5 декабря 2018 г. Согласно данным из [11], лидар миссии GEDI установлен на международной космической станции (МКС), имеет разрешение 1 км и собирает данные в диапазоне с 51.6 ю.ш. до 51.6 с.ш. Упоминается в [10] и об оптимальном разрешении снимков для создания углеродных карт — оно принято равным 100 м.

В работе [12] процедура сбора полевых данных также ничем не отличается от таковых в рассмотренных работах. В ней упоминается об использовании значения диаметра дерева на уровне груди в 10 см. Авторы [12] утверждают, что это значение может быть слишком велико, поскольку на деревья с меньшим диаметром может приходиться значительная доля биомассы (произведена оценка биомассы в Кении).

Работа [13] посвящена оценке лесной биомассы на острове Калимантан. В данной работе представляет интерес необычный подход к определению биомассы на участке — он основан на методе Монте-Карло.

Работа [14] в этом списке стоит особняком: здесь описывается подход к оценке биомассы травянистой растительности, растущей вблизи болот. В отличие от вычисления биомассы лесов здесь не требуется использование лидарных данных.

Работа [15] также отличается от остальных: в ней описывается подход оценки биомассы в урбанизированных территориях. Особенность данного подхода заключается в использовании высокоточных спутниковых снимков (разрешение 5 м), а для измерения высоты деревьев при сборе полевых данных используется лазерный высотомер. Подход включает в себя метод стратификации лидарных снимков, т.е. деление снимков на слои по высоте.

Исходя из представленного обзора методов сбора полевых данных, можно видеть, что во всех работах получение данных о растительности связано либо с измерениями на местах (деревья), либо со сбором и обработкой образцов растительности (трава). При агрегировании данных о биомассе наиболее подходящим в нашем случае способом агрегации данных является вычисление среднего значения биомассы по классам растительности, аналогично проделанным действиям в работах [3, 15].

2. Анализ сигналов лидара. Следующий этап создания углеродной карты — анализ формы сигнала лидара GLAS. Это необходимо для установления статистической взаимосвязи между полевыми оценками плотности надземного углерода (англ. aboveground carbon density, ACD). В работе [2] предполагается, что отношение массы углерода к общей биомассе составляет 1:2.

Здесь же подробно изложен процесс анализа «пятен» лидара GLAS. Так, перед непосредственной обработкой данных авторы отбросили «пятна», которые имеют менее 2 пиков, максимальную высоту, превышающую шум менее чем в 2 раза и расхождение со значениями высоты от SRTM более 25 м.

Подробное описание алгоритма оценки биомассы по снимкам лидара (LVIS) дано в работе [16]. Согласно ему, сигнал с лидара переводится в профиль высоты покрова. При этом используется методика из статьи [17]. По сути, дальнейший анализ «пятна» лидара связан с анализом гистограммы профиля покрова.

Методика перевода сигнала с лидара в профиль высоты покрова из статьи [17] состоит из следующих шагов: определение и отсечение шума, вычисление кумулятивной «функции покрова», преобразование «функции покрова» по методологии МакАртура-Хорна, обратное преобразование ее в плотность вероятности. Ее схема показана на рисунке 2.

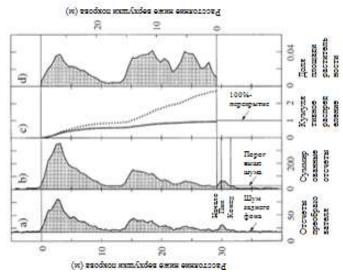


Рис. 2. Схема перевода сигнала лидара в профиль высоты покрова

Профиль высоты покрова является ничем иным, как функцией плотности распределения высот в «пятне» лидара. Далее из профиля высоты извлекаются значения перцентилей функции распределения высот и другая дополнительная информация.

Применение вышеописанных алгоритмов в работе [3] позволило получить по 2 значения биомассы на каждый участок, по которым была построена линейная регрессионная модель.

В других работах по составлению карты плотности углерода проводились аналогичные исследования по установлению связи между полевыми данными биомассы и метриками формы сигнала лидара. В работе [7], в отличие от подхода из [3], при анализе лидарных данных для каждого "пятна" вместо профиля высоты создается цифровая модель земной поверхности с помощью воксельного подхода. А в работе [8] для получения цифровой модели земной поверхности используется метод интерполяции триангулированной нерегулярной сети. Более подробно подход составления цифровой модели высоты покрова описан в [21]. В работе [9] для оценки объема ствола хвойного дерева так же, как и в работе [7], применяется воксельный подход при анализе сигналов лидара. При анализе сигналов лидара в работе [10] используется метод случайного объема над землей (Random Volume over Ground – RvOG), который применяется к полученным с помощью InSAR изображениям. В работе [12] заслуживают внимания приемы обработки лидарных данных. В ней рассказывается об обработке лидарных снимков: здания, линии электропередач и выбросы (высокие точки) фильтруются с помощью ПО Terrascan, LAStools (Rapidlasso GmbH) и ручного редактирования. Приводятся аллометрические уравнения для разнородных лесных участков, а также указаны справочные материалы для определения плотности древесины. Поиск наиболее точных регрессионных моделей производится путем перебора различных комбинаций из 1-3 предикторов.

В работе [14] выполняется классификация травянистой растительности на основании объектно-ориентированного подхода. Для создания детализированной (фракционной) карты болотистой растительности использовались снимки NAIP с разрешением 1 м, после чего данные биомассы с первой карты были использованы для сведения полученных значений к разрешению спутниковых снимков Sentinel (разрешение 30 м). В работе [15], как уже говорилось ранее, обработка лидарных снимков включает в себя стратификацию лидарных снимков, т.е. деления снимков на слои по высоте. Для вычисления общей биомассы используются усредненные значения биомассы по классам. Полученные в работе [15] значения коэффициентов корреляции Пирсона высоты покрова с биомассой возрастают с ростом высоты слоя: для высот 2-5 м коэффициент корреляции равен 0.3, для 5-10 м – 0.5, а для высот более 10 м – 0.7.

Исходя из представленного обзора методов обработки лидарных данных, видно, что во всех случаях применение характеристик сигналов лидара приводит к повышению точности оценки биомассы.

В ряде рассмотренных работ для определения формы растительности используются бортовые лидары [9, 12, 13] или лазерные высотомеры [15]. При этом в работе [13] утверждается, что модели оценки биомассы на основе данных бортовых лидаров показывают более высокую точность, чем модели оценки биомассы на основе данных спутниковых лидаров. В нашем случае, скорее всего, не будет возможности применения бортовых лидаров или лазерных высотомеров, поэтому в нашей задаче придется задействовать данные спутниковых лидаров, прежде всего GLAS.

3. Создание карты биомассы. В работе [3] создание карты плотности углерода сводится к созданию карты лесной биомассы. Разработанные для создания карт биомассы методы включают в себя:

- классификацию типов растительного покрова, где каждому классу присваивается среднее значение плотности биомассы на основе справочных оценок или данных инвентаризации весов;
- определение взаимосвязей между плотностью биомассы и характеристиками пикселей спутниковых изображений, которые могут быть отображены на больших пространствах карты.

В работах [3,16] для создания непрерывных карт использованы изображения со спектрорадиометра MODIS среднего разрешения (500 м). Для получения высококачественных снимков авторы [3] составили композицию из изображений, взятых за период в 2 полных календарных года. После получения свободного от облаков композитного изображения для всех его пикселей были вычислены индексы растительности EVI2 и NDII. Кроме того, для тех же наблюдений извлечены данные о температуре поверхности суши (MODIS LST) и вычислены средние значения. Также применены данные о высоте (SRTM) с разрешением 90 м.

Таким образом, для обучения модели машинного обучения «случайный лес», которая генерирует оценки плотности углерода в каждом пикселе изображения, использовались такие переменные как каналы 1, 2, 4, 5, 6, 7 спутникового изображения MODIS, значения отклонений в 7 канале MODIS, средняя температура и значения ее отклонений (LST), коэффициенты растительности EVI2, NDII и SRTM.

В работе [2] установлено, что каналы 1 (620-670 нм) и 7 (2105-2155 нм) MODIS, скорее всего (sic!), являются наиболее важными переменными для различий в плотности углерода в надземной части. В частности, канал красного цвета позволяет отличать области с растительностью от областей без нее, а канал 7 позволяет идентифицировать регионы с высокой плотностью углерода.

Важность применения именно ИК-изображений для анализа лесного покрова подтверждается и в других работах [18, 19, 20]. В последней [20] есть замечательная иллюстрация (рисунок 3), демонстрирующая разделение наземной растительности от хвойных деревьев.

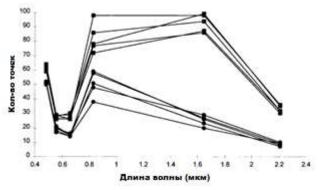


Рис. 3. Разделимость наземной растительности от хвойных деревьев на ИК-каналах На рисунке 3 видно, что наилучшая разделимость хвойной и наземной растительности проявляется на длинах волн ~ 1650 нм.

Помимо прочего, авторы [2] указали общие требования к участкам, на которых проводятся полевые измерения. Так, для всех участков, где проводились измерения, помимо базовой информации (размер, форма, измерения деревьев), необходимо также знать информацию об участках, которые располагаются более чем на одном пикселе изображения. Здесь также говорится, что чем больше изменчивость плотности углерода в пикселе, тем больше участков необходимо взять в пределах данного пикселя. Это актуально для пикселей с изменяющимся ландшафтом (см. рисунок 4).

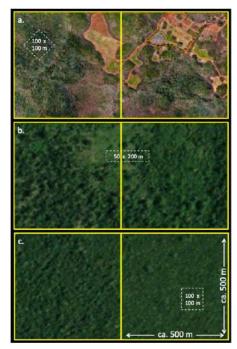


Рис. 4. 3 различных варианта лесного ландшафта (сверху вниз): деградированный лес, деградированный густой лес, нетронутый густой лес

Упоминается и про необходимость использования карт с одинаковым разрешением, поскольку изменение разрешения карт может приводить к ухудшению результатов. Однако на практике доступность карт одного и того же разрешения зависит от их наличия.

Результаты. Как сообщается в приложении к статье [2], полученная модель случайного леса позволила объяснить 83%, 78% и 71% различий в ACD на тестовых данных для тропической Америки, Африки и Азии соответственно.

В работе [6] (оценка биомассы кукурузы) проведено исследование по определению индекса растительности, дающего наибольшее значение R^2 итоговой регрессионной модели, в котором показаны очень высокие значения корреляции индексов растительности друг с другом. Также подтверждается надежность применения лидаров для оценки биомассы ($R^2 = 0.835$), а сочетание лидарных снимков с индексами растительности повышает значение R^2 ($R^2 = 0.883$).

И в работе [7] (оценка биомассы хвойных лесов) сочетание различного рода характеристик сигналов лидара приводит к повышению R^2 : так, на характеристиках лидаров дискретного возврата наибольшее достигнутое значение R^2 равно 0,702, на характеристиках лидара полной волны — 0,760, а на сочетании характеристик лидаров дискретного возврата и полной волны — 0,815.

В работе [8] (оценка надземной и подземной биомассы лесов) наибольшие значения R2 для подземной/надземной/общей биомассы составили $0,742/0,874/0,860,\ 0,513/0,545/0,552$ и 0,785/0,893/0,882 для только лидарных, только гиперспектральных и лидарных + гиперспектральных данных соответственно.

Результаты работы [10] подтверждают результаты предыдущих работ: применение данных TDX (мультиспектральных) и GEDI (лидар) на трех участках позволило получить значения R^2 от 0,82 до 0,90, в то время как только для данных GEDI – от 0,58 до 0,90, что еще раз показывает важность совместного применения лидарных и мультиспектральных снимков для оценки биомассы.

В работе [21] полученные результаты (R^2 -коэффициент) следующие: для уравнений объема ствола с использованием только общей модели покрова, общей модели покрова с

DSM (дискретный возврат) и общей модели покрова с DSM (полная волна) значения составили 0.93, 0.94 и 0.95 соответственно. А для уравнений объема биомассы -0.87, 0.88 и 0.91 соответственно.

В работе [12] применение сегментации с переменным значением масштаба и алгоритма классификации kNN позволило получить значения R^2 -коэффициентов для моделей оценки биомассы в горных районах и низинах, равные 0,93 и 0,89 соответственно.

В работе [13] точность полученных моделей оценки биомассы, по утверждению авторов, не является высокой (значения R^2 -коэффициентов при этом не приведены). Они же утверждают, что углеродные карты на основе данных бортовых лидаров показывают более лучшие результаты, чем углеродные карты на основе данных спутниковых лидаров.

А при оценке биомассы травянистой растительности на болотах в работе [14] результаты показали, что плотность травянистой растительности в 95% случаях не превышает $1,56~\rm kr/m2$ (разумеется, для северного региона данная цифра может отличаться). Значения общей точности классификации растительности составили от 80.5% до 98%. Однако для задачи регрессии полученные значения R^2 невысокие: от 0.36 до 0.61.

В работе [15] для оценки биомассы растительности на городских территориях использовались BRT-модели. Значения R^2 -коэффициентов для 300 BRT-моделей составили 0.77-0.89 для данных ландшафта и 0.42-0.65 для моделей формы города.

Исходя из представленных результатов аналогичных работ, видно, что совместное применение мультиспектральных данных и данных лидара при создании карт плотности углерода приводит к наиболее точным оценкам биомассы, а углеродные карты на основе данных бортовых лидаров имеют более высокую точность. Различий в результатах при использовании различных способов обработки сигналов лидара и моделей регрессии не замечено, поэтому в нашем случае будет необходима проверка этих двух способов на более высокую точность оценки биомассы. При оценке биомассы лесов практически во всех работах применяются регрессионные модели для оценки согласованности сигналов лидара с полевыми измерениями.

4. Адаптация подхода к северному региону. Как говорилось ранее, разрешение снимка в 500 метров оказывается слишком грубым для анализа региона. Поэтому были рассмотрены (с учетом ограничений по длине волны и необходимому разрешению) альтернативные варианты спутниковых снимков, которые могут подойти в нашем случае (таблица 1).

Таблица 1. Альтернативные варианты спутниковых снимков

Спутник	Канал (длина волны, нм)	Разрешение, м
Landsat-7	band 5 (1550-1750)	30
	band 7 (2080-2350)	30
Landsat-8	band 6 (1560-1660)	30
	band 7 (2100-2300)	60
WorldWiew3 (коммерческий)	SWIR-3 (1640-1680)	3,7
	SWIR-5 (2145-2185)	3,7
	CAVIS Snow (1620-1680)	30
	Aerosol-3 (2105-2145)	30
Sentinel 2	B4 (665)	10
	B11 (1610)	20
	B12 (2190)	20

Также следует иметь в виду отличие видов растительности северного региона от видов растительности экваториальных районов Земли, для которых и проводились описанные в работах [2, 3] исследования. Поскольку в экваториальных районах преобладают тропические, мангровые леса, а также пальмы, тогда как в XMAO преобладают лиственные и хвойные леса.

Предлагаемая программа исследований. Исходя из анализа представленной литературы, предлагается выполнение следующих исследований по созданию углеродной карты XMAO:

- 1) исследование лидарных данных GLAS и мультиспектральных данных представленных в таблице 1 спутников. Цель: определение наиболее подходящих и одновременно доступных спутниковых изображений;
- 2) определение классов земного покрова и участков, соответствующих пятнам лидара. Проведение полевых измерений. Цель: определение средних значений биомассы на участках для разных классов земного покрова;
- 3) исследование различных способов обработки сигналов лидара и регрессионных моделей перевода характеристик сигнала в значения биомассы. Цель: получение способа обработки сигналов лидара, дающего наибольшую точность вычисления биомассы;
- 4) исследование моделей классификации земного покрова по мультиспектральным спутниковым изображениям. Цель: получение модели классификации земного покрова с наибольшей точностью и создание на ее основе углеродной карты XMAO.

Заключение. В данной работе проанализирован один из подходов [2-3] к построению карт плотности углерода, которые предназначены для оценки объема растительности и содержащегося в ней углерода. Подход основан на применении биометрических данных, спутниковых снимков, расчете и анализе групп пикселей с помощью множественной линейной регрессии. Данный подход применен для построения карты плотности углерода для экваториальных районов Африки, Азии, Южной Америки.

В работах [2-3] приведено подробное описание используемых математических методов перевода биометрических данных в значения плотности углерода, указаны требования к используемым данным, а также приведены результаты тестирования алгоритма и другие рекомендации по использованию данных.

Помимо указанных работ, проведен детальный анализ аналогичных существующих подходов к оценке биомассы с помощью дистанционного зондирования Земли. На основе анализа определены основные методы и подходы, используемые как для оценки биомассы лесов, так и для оценки биомассы травяной растительности болот и оценки биомассы растительности в городских территориях. Полученный обзор методов и подходов позволил составить программу исследований именно для нашего случая.

Также спланированы шаги по адаптации подхода из работы [3] к одному из регионов Крайнего Севера России — XMAO. Так, был произведен поиск действующих на январь 2022 года спутников, а также подходящих каналов съемки. Что касается лидарных данных, то для XMAO имеется более 5000 файлов со спутника ICESat-2 за более чем 3 года.

Также необходимо учитывать различие в видах растительности для экваториальных лесов и тайги (тундры), в зоне которой расположен XMAO. Для них придется обучать новые регрессионные модели, которые, вероятнее всего, будут отличаться набором переменных и коэффициентами при них.

Список источников

- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». 2021. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2020/?PAGEN_2=2 (дата обращения: 14.01.2022).
- 2. Baccini A. et al. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. Science, 2017, vol. 358, no. 6360, pp. 230-234.
- 3. Baccini A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. Nature climate change, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 182-185.
- 4. NASA: ICESat, 2021, available at: https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php (accessed: 01/20/2022).
- 5. ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 5 | National Show and Ice Data Center, 2021, available at: https://nsidc.org/data/ATL03/versions/5 (accessed: 01/20/2022).
- 6. Wang C. et al. Estimating the biomass of maize with hyperspectral and LiDAR data. Remote Sensing, 2017, vol. 9, no. 1, 11 p.
- 7. Nie S. et al. Above-ground biomass estimation using airborne discrete-return and full-waveform LiDAR data in a coniferous forest. Ecological Indicators, 2017, vol. 78, pp. 221-228.
- 8. Luo S. et al. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation. Ecological Indicators, 2017, vol. 73, pp. 378-387.
- 9. Stovall A. E. L. et al. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. Remote Sensing of Environment, 2017, vol. 200, pp. 31-42.
- 10. Qi W. et al. Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data. Remote Sensing of Environment, 2019, vol. 232, p. 111283.
- 11. Global Ecosystem Dynamics Investigation | Wikipedia, 2022. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Ecosystem_Dynamics_Investigation (accessed: 02/11/2022).
- 12. Pellikka P. K. E. et al. Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afromontane landscape in Kenya. Applied Geography, 2018, vol. 94, pp. 178-189.
- 13. Jucker T. et al. Estimating aboveground carbon density and its uncertainty in Borneo's structurally complex tropical forests using airborne laser scanning. Biogeosciences, 2018, vol. 15, no. 12, pp. 3811-3830.
- 14. Byrd K. B. et al. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, vol. 139, pp. 255-271.
- 15. Mitchell M. G. E. et al. Identification of fine scale and landscape scale drivers of urban aboveground carbon stocks using high-resolution modeling and mapping. Science of the total Environment, 2018, vol. 622, pp. 57-70.
- 16. Drake J. B. et al. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. Remote Sensing of Environment, 2002, vol. 81, no. 2-3, pp. 378-392.
- 17. Harding D. J. et al. Laser altimeter canopy height profiles: Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. Remote Sensing of Environment, 2001, vol. 76, no. 3, pp. 283-297.
- 18. Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-Fir. Remote sensing of environment, 1992, vol. 41, no. 1, pp. 1-17.
- 19. Gemmell F. M. Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site. Remote Sensing of Environment, 1995, vol. 51, no. 2, pp. 291-305.
- 20. Puhr C. B., Donoghue D. N. M. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland. International Journal of Remote Sensing, 2000, vol. 21, no. 4, pp. 633-646.
- 21. Allouis T. et al. Stem volume and above-ground biomass estimation of individual pine trees from LiDAR data: Contribution of full-waveform signals. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 924-934.

Бредихин Арсентий Игоревич. 1996 г.р., аспирант 2 курса ЮГУ направления «Информатика и вычислительная техника» (профиль — «Системный анализ, управление и обработка информации»), инженер-программист УЦР ЮГУ, AuthorID — 1012558, SPIN-код: 9495-5105, a_bredihin@ugrasu.ru, Россия, г. Ханты-Мансийск.

Мельников Андрей Витальевич. 1956 г.р., директор АУ ХМАО-Югры «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», д.т.н., профессор. AuthorID – 179248, melnikovav@uriit.ru, Россия, г. Ханты-Мансийск.

UDC 528.854.4

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.011

An approach to the creation of a carbon density map of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug based on the assessment of biomass using Earth remote sensing data

Arcenty I. Bredikhin¹, Andrey V. Melnikov²

Russia, Khanty-Mansiysk, a_bredihin@ugrasu.ru

Abstract. Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra has a large area of forest territories (more than 90% of the total area of the district). And forest vegetation naturally dies sooner or later, as a result of which carbon dioxide is released into the atmosphere from organic matter and global warming increases.

In order to prevent an increase in global temperature, it is necessary to estimate the carbon stock in the form of the amount of vegetation biomass.

One of the ways to assess vegetation biomass is to create carbon maps using of the Earth remote sensing methods. The use of satellite images obtained with remote sensing methods and methods of their processing will make it possible to obtain a map of the district with full coverage of the entire territory, and the use of machine learning models will make it possible to develop a model with which it will be possible to obtain a carbon map of the district with a given accuracy.

This paper provides an overview of the decisions of foreign scientists over the past 5 years in the field of remote sensing aimed at creating carbon maps. Based on this review, a research program has been proposed that will allow us to develop an approach that allows us to obtain a digital carbon map of the KhMAO with the necessary accuracy.

Keywords: remote sensing, satellite image, carbon, vegetation biomass, machine learning

References

- 1. State Report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020" [Electronic resource]. 2021. Available at: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2020/?PAGEN_2=2 (accessed: 01/14/2022).
- 2. Baccini A. et al. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. Science, 2017, vol. 358, no. 6360, pp. 230-234.
- 3. Baccini A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. Nature climate change, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 182-185.
- 4. NASA: ICESat, 2021, available at: https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php (accessed: 01/20/2022).
- 5. ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 5 | National Show and Ice Data Center, 2021, available at: https://nsidc.org/data/ATL03/versions/5 (accessed: 01/20/2022).
- 6. Wang C. et al. Estimating the biomass of maize with hyperspectral and LiDAR data. Remote Sensing, 2017, vol. 9, no. 1, 11 p.
- 7. Nie S. et al. Above-ground biomass estimation using airborne discrete-return and full-waveform LiDAR data in a coniferous forest. Ecological Indicators, 2017, vol. 78, pp. 221-228.
- 8. Luo S. et al. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation. Ecological Indicators, 2017, vol. 73, pp. 378-387.
- 9. Stovall A. E. L. et al. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. Remote Sensing of Environment, 2017, vol. 200, pp. 31-42.
- 10. Qi W. et al. Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data. Remote Sensing of Environment, 2019, vol. 232, p. 111283.
- 11. Global Ecosystem Dynamics Investigation | Wikipedia, 2022. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Ecosystem_Dynamics_Investigation (accessed: 02/11/2022).
- 12. Pellikka P. K. E. et al. Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afromontane landscape in Kenya. Applied Geography, 2018, vol. 94, pp. 178-189.
- 13. Jucker T. et al. Estimating aboveground carbon density and its uncertainty in Borneo's structurally complex tropical forests using airborne laser scanning. Biogeosciences, 2018, vol. 15, no. 12, pp. 3811-3830.

¹Yugra State University (UGRASU),

²Yugra Research Institute of Information Technologies (URIIT),

- 14. Byrd K. B. et al. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, vol. 139, pp. 255-271.
- 15. Mitchell M. G. E. et al. Identification of fine scale and landscape scale drivers of urban aboveground carbon stocks using high-resolution modeling and mapping. Science of the total Environment, 2018, vol. 622, pp. 57-70.
- 16. Drake J. B. et al. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. Remote Sensing of Environment, 2002, vol. 81, no. 2-3, pp. 378-392.
- 17. Harding D. J. et al. Laser altimeter canopy height profiles: Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. Remote Sensing of Environment, 2001, vol. 76, no. 3, pp. 283-297.
- 18. Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-Fir. Remote sensing of environment, 1992, vol. 41, no. 1, pp. 1-17.
- 19. Gemmell F. M. Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site. Remote Sensing of Environment, 1995, vol. 51, no. 2, pp. 291-305.
- 20. Puhr C. B., Donoghue D. N. M. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland. International Journal of Remote Sensing, 2000, vol. 21, no. 4, pp. 633-646.
- 21. Allouis T. et al. Stem volume and above-ground biomass estimation of individual pine trees from LiDAR data: Contribution of full-waveform signals. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 924-934.

Bredikhin Arcenty Igorevich, born 1996, PhD student of the 2nd year of the UGRASU of the direction "Computer Science and Computer Engineering" (profile – "System analysis, management and information processing"), software engineer of the DDD UGRASU, AuthorID – 1012558, SPIN-code: 9495-5105, a_bredihin@ugrasu.ru, Russia, Khanty-Mansiysk.

Melnikov Andrey Vitalievich, born 1956, Director of the AU KhMAO-Yugra "Yugra Research Institute of Information Technologies", Doctor of Technical Sciences, Professor. AuthorID – 179248, melnikovav@uriit.ru, Russia, Khanty-Mansiysk.

Статья поступила в редакцию 05.04.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 04/05/2022; approved after reviewing 06/09/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 004.822: (620.9 + 504.03) DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.012

Онтологический анализ взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем

Ворожцова Татьяна Николаевна

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск, tnn@isem.irk.ru

Аннотация. В работе рассматривается необходимость интеграции исследований энергетических и социо-экологических систем, обусловленная их взаимным влиянием. Для междисциплинарных исследований в этих областях, предполагающих интеграцию энергетической, экологической и социальной систем, предлагается использование онтологического подхода к выявлению, описанию и структурированию взаимосвязей между этими сложными системами. Рассмотрены взаимосвязи, отражающие как отрицательное, так и положительное влияние функционирования объектов энергетики на соответствующую социо-экологическую систему. Предложены индикаторы устойчивого развития социо-экологических систем. Для сопоставления положительного и отрицательного влияния функционирования объектов энергетики на население рассматриваются индикаторы качества жизни, как способ оценки этого влияния. Представлены онтологии, структурирующие базовые понятия предметной области исследований антропогенного влияния объектов энергетики, качества жизни и отражающие их интеграцию.

Ключевые слова: онтологический подход, антропогенное воздействие, качество жизни, энергетическая система, социо-экологическая система, природная среда, экология

Цитирование: Ворожцова Т.Н. Онтологический анализ взаимосвязей энергетических и социоэкологических систем / Т.Н. Ворожцова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. $-2022.- \mathbb{N} \ 2(26).- \text{C.}\ 127-138.- \text{DOI}:10.38028/\text{ESI}.2022.26.2.012.$

Введение. Актуальность и необходимость исследования взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем в настоящее время обусловлена важностью проблемы обеспечения устойчивого развития общества в целом и устойчивости его технических и социально-экологических систем. Энергетические системы как фактор социального развития рассматривались еще в конце прошлого столетия, т.к. наибольшие эффекты создание энергетических систем приносит не в энергетической, а в социальной и производственной сферах. [1]. Международное определение устойчивого развития подразумевает единую систему социальных, экономических и экологических процессов. Исследованиям устойчивости энергетических систем посвящены работы зарубежных [2, 3] и российских [4, 5] исследователей, в которых рассматривается методология оценки устойчивости энергетической системы, предлагаются индикаторы для учета основных критериев устойчивости в социальных и технических системах. Как правило, такие сложные системы описываются многочисленными параметрами и характеристиками. В связи с этим для поиска, извлечения информации и знаний, верификации данных можно использовать семантические технологии [6, 7]. В рамках выполняемого проекта «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни», поддержанного грантом РФФИ № 20-07-00195, исследуется влияние функционирования объектов энергетики на экологическое состояние элементов природной среды. Эти исследования предполагают интеграцию экологической и социальной составляющих. Анализу влияния энергетики на социальноэкономическую систему страны посвящены, например, работы [8-10]. Для выявления, описания и структурирования взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем разрабатываются онтологии, отражающие эти взаимосвязи и предлагается система взаимосвязанных онтологий, обеспечивающая интеграцию пересекающихся областей знаний.

1. Онтологический анализ предметной области исследований. Онтологическое моделирование, как одно из направлений семантического моделирования, применяется для описания и интеграции знаний предметных областей. Онтология — это способ представления некоторой области знаний в виде концептуальной схемы, которая обеспечивает возможность определения и согласования понятий, описания отношений между понятиями, структурирования знаний и работы со смыслом информации.

При выполнении наших исследований используются онтологии в графическом виде, представляющие собой семантическую (смысловую) сеть, вершинами которой являются объекты или понятия (концепты) взаимосвязанных предметных областей, а дугами – отношения между этими концептами. Это обеспечивает согласование исследований разных предметных областей (энергетики, экологии) в соответствии с целями проекта, доступность и восприятие больших объемов сложно структурированной информации, а также, интеграцию систем и приложений.

Взаимосвязи энергетических и социо-экологических систем обусловлены тем, что энергетика обеспечивает функционирование социальной инфраструктуры и устойчивое развитие региона или государства, но, с другой стороны, является одним из серьезных факторов техногенного или антропогенного воздействия на природу и человека. Базовыми понятиями выполняемых исследований являются понятия, связанные с изучением влияния объектов энергетики на природу и человека.

Энергетическая система — это открытая человеко-машинная производственная система, предназначенная для добычи (производства, получения), переработки (преобразования), транспортирования, хранения и распределения энергоресурсов и снабжения потребителей этой продукцией [11].

Социальная система — это множество элементов (индивидов, групп, общностей), а также совокупность социальных явлений и процессов, которые находятся в отношениях и связи между собой и образуют некоторый социальный объект. Основными элементами социальной системы являются люди, их взаимодействия, отношения и связи [12, 13]. В широком смысле слова понятие «социальный» употребляется как синоним понятия «общественный», когда речь идет о противопоставлении биологическим, природным явлениям.

Экологическая система (экосистема) — совокупность совместно обитающих организмов и условий их существования, находящихся в закономерной взаимосвязи друг с другом и образующих систему взаимообусловленных биотических и абиотических явлений и процессов [14].

Социо-экологическая система — комплексное междисциплинарное понятие, определение которого зависит от направления исследований. Например, философский аспект этого понятия отражен в следующем определении. Социо-экологическая система — это единство природной и социальной подсистем, образующих среду вокруг центрального элемента, человека как биосоциального существа, единство, в котором общество и природа наиболее тесно взаимодействуют в техносфере и культуре [15]. Другое определение социо-экологической системы представлено в работе [16]. Социо-экологическая система — это гармоничное взаимодействие или совместное паритетное развитие человека и его сообщества (то есть антропосистемы) с природной средой в рамках единого целостного образования. Разные определения социально-экологической системы и родственных понятий представлены в работе [17]. По определению нобелевского лауреата Э. Остром, социо-экологическая система — это экологическая система, неразрывно связанная и зависящая от одной или нескольких социальных систем [18].

Социально-экологические и энергетические системы характеризуются высоким уровнем интеграции и взаимозависимости их элементов. Этим определяется высокий уровень неопределенности в таких системах.

Антропогенный фактор — влияние, оказываемое человеком и его деятельностью на организмы, биогеоценозы, ландшафты, биосферу (в отличие от естественных или природных факторов). Антропогенные факторы могут влиять на целые экосистемы и их части (организмы, популяции, сообщества, биоценозы), могут опосредствоваться через влияние биотических факторов (при уничтожении некоторых видов или, напротив, при интродукции видов) и абиотических факторов (влияние на климат, загрязнение атмосферы, воды и др.). В настоящее время антропогенные факторы являются важным фактором нарушения биосферы. Для ограничения их влияния осуществляются экологический мониторинг и экологическое нормирование. Контроль и снижение интенсивности влияния антропогенных факторов являются одним из главных условий построения общества устойчивого развития. [19]

Техногенный фактор — влияние, оказываемое промышленной деятельностью на организмы, биогеоценоз, ландшафт, биосферу (в отличие от естественных, или природных факторов). Поскольку практически все области деятельности человека носят все более индустриальный характер (добывающая и обрабатывающая отрасли, энергетическая отрасль, коммунальное хозяйство и т.п.), техногенный фактор по сути становится синонимом антропогенного фактора. [20]

Загрязнение окружающей среды — это воздействие на биосферу, представляющее опасность для представителей живой природы и устойчивого существования экосистем. Различают природные загрязнения, вызванные естественными причинами, и антропогенные, связанные с деятельностью человека. Практически все виды хозяйственной деятельности сопровождаются увеличением содержания вредных для организмов веществ; появлением новых химических соединений, частиц и чужеродных материалов, токсичных или не способных к утилизации в биосфере; чрезмерным повышением температуры (тепловое загрязнение), шума (шумовое загрязнение), электромагнитного излучения, радиоактивности (радиоактивное загрязнение) и другими изменениями среды [21].

Загрязняющее вещество — это любое химическое вещество или соединение, которое находится в объекте окружающей природной среды в количествах, превышающих фоновые значения и вызывающие тем самым химическое загрязнение. По происхождению загрязняющие вещества делятся на загрязняющие вещества природного происхождения и антропогенного происхождения. По характеру загрязняющие вещества делятся на первичные (поступившие в окружающую среду непосредственно из источников загрязнения) и вторичные, образующиеся из первичных в объектах окружающей среды в результате биогенных и абиогенных трансформаций. Наиболее распространёнными антропогенными загрязняющими веществами являются: в атмосфере — кислые газы (диоксид углерода, диоксид серы, оксиды азота), взвешенные частицы (сажа, аэрозоли кислот и соединений тяжёлых металлов), органические соединения, в том числе формирующие фотохимический смог и разрушающие озоновый слой атмосферы, пары нефтепродуктов; в гидросфере — растворимые соли тяжёлых металлов, органические соединения, нефтепродукты; в литосфере (особенно в почве) — соли тяжёлых металлов, нефтепродукты [22].

Вредное вещество – вещество, которое при контакте с организмом человека в случае нарушений требований безопасности может вызывать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений [23].

На основе ранее выполненных исследований авторами [24] было предложено детализировать следующие понятия:

Антропогенное воздействие — следствие антропогенного фактора, процесс влияния хозяйственной или иной деятельности человека на элементы природной среды.

Антропогенное загрязнение – результат изменения элементов природной среды, вызванный антропогенным воздействием.

2. Принципы устойчивого развития энергетических и социо-экологических систем. В настоящее время одним из мировых принципов устойчивого развития является интеграция социальной, экологической и управленческой ответственности во всех сферах деятельности. В 2014 году сформулированы ESG-принципы в качестве модели устойчивого развития с участием бизнеса, это параметры, в соответствии с которыми компании должны соответствовать стандартам развития в трех категориях: экологической, социальной и управленческой [25, 26].

Environmental означает ответственное отношение к окружающей среде (стремление к сбережению природных ресурсов и уменьшению загрязнения планеты).

Social предполагает высокую социальную ответственность (забота о персонале, его правах, соблюдение норм по охране труда).

Governance – это высокое качество корпоративного управления (объективные критерии управления, качественный аудит и эффективность руководителей).

Управление энергетическими объектами должно соответствовать этим принципам, так как это способствует устойчивому функционированию самих объектов и обеспечению устойчивости социо-экологических систем, тесно с ними связанных.

Для структурирования взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем проанализированы индикаторы устойчивого развития этих систем, включающие три группы показателей — экономические, экологические и социальные. К экономическим показателям относятся валовой региональный продукт на душу населения, бюджетная обеспеченность, индекс цен, уровень безработицы, размер инвестиций в основной капитал на душу населения и другие. Экологические показатели включают, например, количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, размер инвестиций, направленных на охрану и рациональное использование природных ресурсов, текущие затраты на охрану окружающей среды. Социальными индикаторами являются такие, как среднедушевые денежные доходы, статистический показатель степени расслоения общества (коэффициент Джини), доля населения с низкими доходами, ожидаемая продолжительность жизни при рождении, коэффициент естественного прироста населения.

Как для энергетических, так и для социо-экологических систем понятие устойчивого функционирования и существования подразумевает необходимость совместного рассмотрения и учета экологических, социальных и экономических факторов. С учетом основной цели исследования взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем важно рассмотреть взаимосвязи Е-факторов, отражающих влияние на атмосферу, почву, водную среду и S-факторов, учитывающих социально значимые показатели.

Для учета требований к функционированию объектов энергетики, связанных с необходимостью сохранения природной среды и условий проживания населения, предложено использовать понятие «Качество жизни» как совокупную характеристику уровня объективных и субъективных условий жизни населения, определяющих физическое, ментальное, социально-культурное развитие человека, группы или сообщества людей.

3. Основные факторы влияния объектов энергетики на окружающую среду и здоровье человека. Энергетические системы являются критически важной инфраструктурой

страны. С одной стороны, они обеспечивают функционирование всех остальных секторов экономики и социальной инфраструктуры, но, с другой стороны, являются одним из серьезных объектов техногенного или антропогенного влияния на природу и среду обитания человека.

Для выявления связи между антропогенным воздействием энергетической системы или энергетического объекта и социо-экологической системой необходимо выявить влияние загрязняющих веществ на элементы природной среды (атмосферу, водную среду, почву) и здоровье человека.

Основные факторы такого влияния показаны на примере энергоустановки, производящей тепловую и электрическую энергию на рисунке 1.

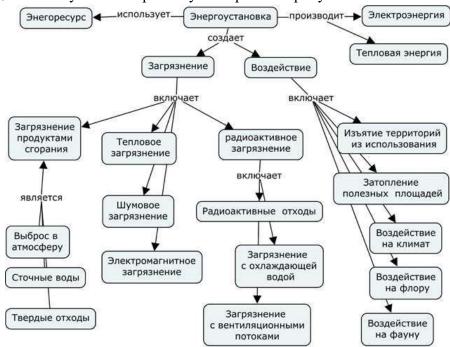


Рис. 1. Онтология факторов воздействия энергоустановки

Положительное влияние функционирования энергетической системы обусловлено обеспечением потребностей рассматриваемого региона в тепловой и электрической энергии. Отрицательное влияние энергетической системы состоит в загрязнении и воздействии на природную среду.

Решающую роль в оценке антропогенной нагрузки от функционирования объектов энергетики занимают вредные вещества, поступающие в элементы природной среды. Определение вредного вещества, сформулированное согласно ГОСТу, было дано выше. Признаки определения класса опасности вредных веществ установлены тем же стандартом. Класс опасности — это условная величина вредного воздействия, предназначенная для классификации потенциально опасных веществ.

При функционировании объектов энергетики образуются вещества разных классов опасности, которые поступают в атмосферу. Воздействие загрязняющих и вредных веществ от объектов теплоэнергетики на элементы природной среды были показаны ранее в работах [27, 28]. Как там было отмечено, наиболее опасен бенз(а)пирен (I класс опасности), который в качестве выбросов поступает непосредственно в атмосферу, кроме того образуются вещества III класса опасности — диоксид серы, оксиды азота, твердые вещества, а также вещества IV класса опасности — оксид углерода, диоксид углерода. Эти вещества влияют на здоровье человека, вызывая различные заболевания.

Практически все загрязняющие вещества от энергетики обладают биологическими, химическими свойствами и способны накапливаться в элементах природной среды (воздух, вода, почвы, живые организмы).

4. Социальная роль энергетики и качество жизни населения. Наблюдается тесная связь между энергетической системой, объекты которой воздействуют на элементы природной среды и социо-экологической системой, центральным элементом которой является человек как биосоциальное существо. Для достижения устойчивости как в социальной, так и в энергетической сфере сформулированы следующие энергетические цели – доступность, наличие и приемлемость энергии. Для достижения этих целей концепция Мирового энергетического совета предлагает комплекс приоритетных задач, решение которых обеспечит устойчивое развитие энергетики в будущем. К ним относятся: участие государства в контроле за энергетическими рынками; обеспечение энергоэффективности и создание льготных условий для инвестиций в энергетику; обеспечение энергией по цене, доступной для бедных; управление энергетикой на принципах открытости и с обеспечением общественного контроля [29]. Критерием оценки деятельности производителей энергоресурсов являются цены для конечных потребителей. подтверждает важность энергетических систем в экономическом и социальном развитии страны.

Понятие «качество жизни» – это совокупная характеристика уровня объективных и субъективных факторов, отражающих удовлетворенность условиями жизни и другие социально-личностные аспекты. Показатель здоровья является одним из основных индикаторов качества жизни населения. Кроме здоровья на качество жизни влияют и другие важные индикаторы, такие как уровень благосостояния, уровень комфортности, доступность образования, социально-культурное развитие, качество отдыха, демографические процессы и другое. Многие из этих показателей напрямую или опосредованно зависят от уровня обеспеченности энергоресурсами. Существуют разные подходы к определению качества жизни. Например, согласно Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) составляющие качества жизни включают экологию, здоровье, социальные отношения, возможность самореализации, финансовое благополучие, безопасность, эмоциональное благополучие. В настоящее время для оценки качества жизни рассматривают объективные, субъективные и интегральные индикаторы качества жизни. Объективные индикаторы отражают природные и социальные аспекты жизни. Субъективные индикаторы характеризуют эмоциональные и когнитивные оценки удовлетворенности жизнью самого человека. Наиболее комплексно отражает качество жизни интегральный индикатор, представленный на рисунке 2.

Ранее в работе [27] была представлена метаонтология базовых индикаторов качества жизни, отражающих их взаимосвязи с энергетикой и экологией, которая показывала, что функционирование объектов энергетики на той или иной территории не только отрицательно влияет на природу и ее экологическое состояние, но, в первую очередь, обеспечивает население тепловой и электрической энергией, непосредственно положительно влияя на условия жизни и труда, здоровье и безопасность. Кроме этого, развитие энергетики способствует экономическому развитию территории, повышая благосостояние, уровень жизни, улучшая социальную сферу и демографические показатели.

Интегральный индикатор качества жизни включает следующие группы показателей, характеризующих социальную систему – демография, благосостояние населения, социальная сфера, здоровье и природные условия.



Рис. 2. Онтология интегрального индикатора качества жизни

Как было отмечено в одном из представленных выше определений, социоэкологическая система представляет собой единство природной, т.е. экологической и социальной подсистем.

Рисунок 3 демонстрирует сложную совокупность взаимосвязей энергетической и социо-экологической систем.

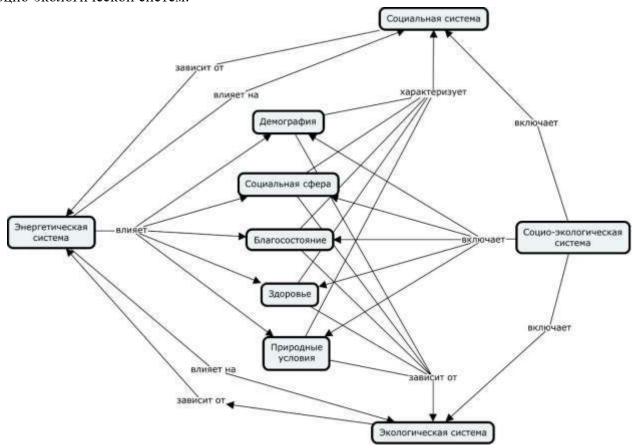


Рис. 3. Взаимосвязи энергетической и социо-экологической систем

Показатели, входящие в состав интегрального индикатора качества жизни отражают основные взаимосвязи рассматриваемых систем. В частности, они характеризуют социальную сторону социо-экологической системы и зависят от ее экологического компонента. В то же время, энергетическая система, функционирующая на рассматриваемой территории, безусловно влияет на все эти показатели качества жизни. Тем самым через

социальные и экологические аспекты отражается взаимное влияние и тесные взаимосвязи энергетических и социо-экологических систем.

Заключение. Для структурирования взаимосвязей энергетических и социоэкологических систем проанализированы принципы устойчивого развития, индикаторы устойчивости энергетических и социо-экологических систем, а также индикаторы качества жизни как показатели, отражающие взаимное влияние рассматриваемых систем.

Для учета требований к функционированию объектов энергетики, связанных с необходимостью сохранения природной среды и условий проживания населения, предложено использовать понятие «Качество жизни».

Взаимосвязи энергетических и социо-экологических систем выражаются посредством взаимного влияния показателей их функционирования. Так, обеспечение потребностей населения в электрической и тепловой энергии отражает связь между энергетической и социальной системами, а состояние элементов природной среды региона (атмосферы, водных объектов, почв, живых организмов) - связь между антропогенным воздействием техногенной системы и качеством жизни населения с учетом природно-климатических условий. Устойчивое функционирование энергетических объектов напрямую связано с устойчивостью социо-экологической системы. Энергетика обеспечивает качество жизни с одной стороны, но создает дополнительные экологические проблемы с другой. Интегральный показатель качества жизни используется для отражения взаимосвязей и взаимного влияния энергетических и социо-экологических систем и является одним из индикаторов их устойчивости. Для выявления, описания и структурирования взаимного энергетических социо-экологических предлагается систем взаимосвязанных онтологий, обеспечивающая интеграцию пересекающихся областей знаний.

Благодарности. Результаты получены в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН АААА-А21-121012090007-7 (проект № FWEU-2021-0007) и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00195.

Список источников

- 1. Макаров А.А. Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство / А.А. Макаров. М.: Энергоатомиздат, 1998. 280 с.
- 2. Xionan Liu, Kai Hou, Hongjie Jia, Jumbo Zhao, Lamine Mili, Yunfei Mu, Jusong Rim, Yunkai Lei. A Resilience Assessment Approach for Power System from Perpectives Of System and Component Levels. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. January, 2020, available at: https://www.researchgate.net/publication/338457248 (дата обращения: 05.05.2022)
- 3. Bernhard-Johannes Jesse, Heidi Ursula Heinrichs, Wilhelm Kuckshinrichs. Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook / Energy, Sustainability and Society, 2019, 9:27, available at: https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0210-7 (дата обращения: 05.05.2022)
- 4. Бобылев С.Н. Индикаторы экологически устойчивого развития: региональное измерение / С.Н. Бобылев, О.В. Кудрявцева, С.В. Соловьева, К.С. Ситкина // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика, 2018. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/indikatory-ekologicheski-ustoychivogorazvitiya-regionalnoe-izmerenie (дата обращения: 04.04.2022).
- 5. Массель Л.В., Комендантова Н.П. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. №4 (16). С. 31-45. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-03.
- 6. Слесарев Е.В. Преимущества семантических технологий: практический аспект. URL: http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Slesarev.pdf (дата обращения: 30.03.2022)
- 7. Хорошевский, В.Ф. Семантические технологии: ожидания и тренды / В.Ф. Хорошевский // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS -2012). Материалы II Международной научно-технической конференции. БГУиР. Минск, 2012. C.143-158.

- 8. Зайцев А.К. Анализ влияния энергетического сектора на социально-экономическую систему государства // Известия СПбГЭУ, 2022. №1(133) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-energeticheskogo-faktora-na-sotsialno-ekonomicheskuyu-sistemu-gosudarstva (дата обращения: 01.04.2022)
- 9. Малый В.И., Гусев В.В. Влияние предприятий энергетики на социально-экономическое развитие и конкурентоспособность региона (на примере Саратовской области) // Вестн. Том. гос. ун-та. Философия. Социология. Политология, 2010. №1(9). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-predpriyatiy-energetiki-na-sotsialno-ekonomicheskoe-razvitie-i-konkurentosposobnost-regiona-na-primere-saratovskoy-oblasti (дата обращения: 05.05.2022).
- 10. Емельянова Л.Л., Латнак Д.В. Оценка влияния отраслей топливно-энергетического комплекса калининградской области РФ на социальную сферу и перспективы экономического развития региона. URL: https://journals. kantiana.ru/upload/iblock/77/yztzkkhqvtwozdwoevqq,%20wmpmxuwluqgs.pdf (дата обращения: 05.05.2022)
- 11. Энергетическая безопасность. Термины и определения / отв. редактор чл.-корр. РАН Воропай Н.И. М.: «ИАЦ Энергия», 2005. 60 с.
- 12. Философский энциклопедический словарь / Гл. редакция: Л. Ф. Ильичёв, П. Н. Федосеев, С. М. Ковалёв, В. Г. Панов. М.: Советская энциклопедия, 1983.
- 13. Андрамонова В.В. Социальная система общества: структура и функционирование. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialnaya-sistema-obschestva-struktura-i-funktsionirovanie/ (дата обращения: 30.03.2022)
- 14. Большая Российская энциклопедия. URL: https://bigenc.ru/biology/text/4927341 (дата обращения: 30.03.2022)
- 15. Василовская, Е. А. Социально-экологическая система: философский анализ / Е. А. Василовская // Наука и современность, 2014. № 27. С. 223—226.
- 16. Бабкин, В. О. Социальная экология новое направление в развитии Единой экологии / В. О. Бабкин // Вестник Оренбургского педагогического университета, 2014. № 4. С. 14–22.
- 17. Стрекалова А.С., Фролов Д.П. Социально-экологическая система как объект экологического маркетинга территорий: анализ и синтез определений / Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 3, Экон. Экол., 2015. № 4(33). DOI: http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu3.2015.4.19
- 18. Anderies, J. M., M. A. Janssen, and E. Ostrom. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. Ecology and Society. 2004, 9(1), vol.18, available at: http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18/ (дата обращения: 05.05.2022)
- 19. Биологический энциклопедический словарь. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic biology/6915/anthropogenic (дата обращения: 05.05.2022)
- 20. Экологический словарь. URL: https://ecolog.academic.ru/1032 (дата обращения: 05.05.2022)
- 21. Большая Российская энциклопедия. URL: https://bigenc.ru/ (дата обращения: 05.05.2022)
- 22. Экология. Справочник. URL: https://ru-ecology.info/term/3832/ (дата обращения: 05.05.2022)
- 23. ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности». URL: https://erpstat.ru/othody/klass-opasnosti-veshchestv-gost.html (дата обращения: 05.05.2022)
- 24. Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. № 1 (17). С. 89-104. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.007
- 25. ESG (Environmental, Social and Governance). URL: https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/other/esg-environmental-social-governance обращения: 05.05.2022) (дата
- 26. Мажорина М.В. ESG принципы в международном бизнесе и «устойчивые контракты» / Актуальные проблемы российского права, 2021. Т.16. №12. С.195-198. DOI: 10.17803/1994-1471.2021.133.12.185-198
- 27. Ворожцова Т.Н., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П. Компонентты онтологического пространства знаний для оценки влияния энергетики на качество жизни населения // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. № 3(23). С. 17-27. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.002
- 28. Vorozhtsova T.N., Ivanova I.Y., Maysyuk E.P. Integration of components of the ontological knowledge space to assess the impact of energy on the quality of life of the population. Energy Systems Research, 2021, vol. 4, no. 4, DOI: 10.38028/esr.2021.04.0003
- 29. Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Региональная составляющая стратегии энергосбережения // Экономика региона, 2007. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-sostavlyayuschaya-strategii-energosberezheniya (дата обращения: 25.04.2022).

Ворожцова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, ведущий инженерисследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, tnn@isem.irk.ru, ORCID: 0000-0002-4022-8937, Россия, Иркутск, Лермонтова д. 130

UDC 004. 822: (620.9 + 504.03) DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.012

Ontological analysis of the interrelationships of energy and socio-ecological systems

Tatyana N. Vorozhtsova

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia, tnn@isem.irk.ru

Abstract. The paper is devoted to the need to integrate studies of energy and socio-ecological systems, due to their mutual influence. To support interdisciplinary research in these areas involving the integration of energy, environmental and social components, it is proposed to use an ontological approach to identifying, describing and structuring the relationships between these complex systems. The interrelations reflecting both negative and positive influence of functioning of power facilities on the corresponding socio-ecological system are considered. The indicators of sustainable development of socio-ecological systems are considered. In order to compare the positive and negative impact of the functioning of energy facilities on the population, quality of life indicators are considered as a way to assess this impact. Ontologies structuring the basic concepts of the subject area of research on the anthropogenic impact of energy facilities, quality of life and reflecting their integration are presented.

Keywords: Ontological approach, anthropogenic impact, quality of life, energy system, socio-ecological system **Acknowledgements:** The result were obtained as part of the implementation of the basic project MESI SB RAS AAAA-A21-121012090007-7, State registration №.FWE U-2021-0007 and supported by the Russian Foundation for Basic Research grant № 20-07-00195.

References

- 1. Makarov A.A. Mirovaya energetika i Evrazijskoe energeticheskoe prostranstvo [World energy and the Eurasian Energy Space]. Moscow, Energoatomizdat, 1998, 280 p.
- Xionan Liu, Kai Hou, Hongjie Jia, Jumbo Zhao, Lamine Mili, Yunfei Mu, Jusong Rim, Yunkai Lei. A Resilience Assessment Approach for Power System from Perpectives Of System and Component Levels. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, January, 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338457248 (accessed: 05/05/2022)
- 3. Bernhard-Johannes Jesse, Heidi Ursula Heinrichs, Wilhelm Kuckshinrichs. Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook. Energy, Sustainability and Society. 2019. 9:27. Available at: https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0210-7_(accessed: 05/05/2022)
- 4. Bobylev S.N., Kudryavceva O.V., Solov'eva S.V., Sitkina K.S. Indikatory ekologicheski ustojchivogo razvitiya: regional'noe izmerenie [Indicators of environmentally sustainable development: regional dimension]. Bulletin of the Moscow University. Series 6. Economics, 2018, no. 2. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/indikatory-ekologicheski-ustoychivogo-razvitiya-regionalnoe-izmerenie (accessed: 04/04/2022).
- 5. Massel' L.V., Komendantova N.P. Ocenka riskov prirodnyh i tekhnogennyh ugroz ustojchivosti energeticheskih, ekologicheskih i social'nyh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij [Risk assessment of natural and man-made threats to the sustainability of energy, environmental and social systems based on intelligent information technologies]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 4(16), pp. 31-45. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-03.
- 6. Slesarev E.V. Preimushchestva semanticheskih tekhnologij: prakticheskij aspekt [Advantages of semantic technologies: practical aspect]. Available at: http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Slesarev.pdf (accessed: 03/30/2022)

- 7. Horoshevskij V.F. Semanticheskie tekhnologii: ozhidaniya i trendy [Semantic technologies: expectations and trends]. Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem (OSTIS -2012). Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii [Open semantic technologies for designing intelligent systems. Materials of the II International Scientific and Technical Conference], 2012, pp. 143-158.
- 8. Zajcev A.K. Analiz vliyaniya energeticheskogo sektora na social'no-ekonomicheskuyu sistemu gosudarstva [Analysis of the impact of the energy sector on the socio-economic system of the state]. Izvestiya SPbGEU, 2022, no. 1(133). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-energeticheskogo-faktora-na-sotsialno-ekonomicheskuyu-sistemu-gosudarstva (accessed: 04/01/2022)
- 9. Malyj V.I., Gusev V.V. Vliyanie predpriyatij energetiki na social'no-ekonomicheskoe razvitie i konkurentosposobnost' regiona (na primere Saratovskoj oblasti) [The influence of energy companies on the socio-economic development and competitiveness of the region (on the example of the Saratov region)]. Tomsk State University Journal of Philosophy, Sociology and Political Science, 2010, no. 1(9). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-predpriyatiy-energetiki-na-sotsialno-ekonomicheskoe-razvitie-i-konkurentosposobnost-regiona-na-primere-saratovskoy-oblasti (accessed: 05/05/2022).
- 10. Emel'yanova L.L., Latnak D.V. Ocenka vliyaniya otraslej toplivno-energeticheskogo kompleksa kaliningradskoj oblasti RF na social'nuyu sferu i perspektivy ekonomicheskogo razvitiya regiona [Assessment of the impact of the branches of the fuel and energy complex of the Kaliningrad region of the Russian Federation on the social sphere and prospects for economic development of the region]. Available at: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/577/yztzkkhqvtwozdwoevqq,%20wmpmxuwluqgs.pdf (accessed: 05/05/2022)
- 11. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya [Energy security. Terms and definitions]. Editor-in-chief of the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Voropaj N.I, Moscow, « IAC Energiya», 2005, 60 p.
- 12. Filosofskij enciklopedicheskij slovar' [Philosophical Encyclopedic Dictionary, Chief Editorial Office: L. F. Il'ichyov, P. N. Fedoseev, S. M. Kovalyov, V. G. Panov, Moscsow, Sovetskaya enciklopediya, 1983.
- 13. Andramonova V.V. Social'naya sistema obshchestva: struktura i funkcionirovanie [The social system of society: structure and functioning]. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialnaya-sistema-obschestva-struktura-i-funktsionirovanie/ (accessed: 03/30/2022)
- 14. Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya [The Great Russian Encyclopedia]. Available at: https://bigenc.ru/biology/text/4927341 (accessed: 03/30/2022)
- 15. Vasilovskaya, E. A. Social'no-ekologicheskaya sistema: filosofskij analiz [Socio-ecological system: philosophical analysis]. Nauka i sovremennost' [Science and modernity], 2014, no. 27, pp. 223–226.
- 16. Babkin, V. O. Social'naya ekologiya novoe napravlenie v razvitii Edinoj ekologii [Social ecology is a new direction in the development of a Unified ecology]. Vestnik of Orenburg State Pedagogical University, 2014, no. 4, pp. 14–22.
- 17. Strekalova A.S., Frolov D.P. Social'no-ekologicheskaya sistema kak ob"ekt ekologicheskogo marketinga territorij: analiz i sintez opredelenij [Socio-ecological system as an object of ecological marketing of territories: analysis and synthesis of definitions]. Vestn. Volgogr. gos. un-ta. Ser. 3, Ekon. Ekol [Journal of Volgograd State University. Economics. Ecology], 2015, no. 4(33). DOI: http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu3.2015.4.19
- 18. Anderies, J. M., M. A. Janssen, and E. Ostrom. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. Ecology and Society, 2004, no. 9(1): 18. Available at: http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18/ (accessed: 05/05/2022)
- 19. Biologicheskij enciklopedicheskij slovar' [Biological encyclopedic dictionary]. Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/6915/anthropogenic (accessed: 05/05/2022)
- 20. Ekologicheskij slovar' [Ecological Dictionary]. Available at: https://ecolog.academic.ru/1032 (accessed: 05/05/2022)
- 21. Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya [The Great Russian Encyclopedia]. Available at: https://bigenc.ru/(accessed: 05/05/2022)
- 22. Ekologiya. Spravochnik [Ecology. Guide]. Available at: https://ru-ecology.info/term/3832/ (accessed: 05/05/2022)
- 23. GOST 12.1.007-76 «Vrednye veshchestva. Klassifikaciya i obshchie trebovaniya bezopasnosti» [Harmful substances. Classification and general safety requirements]. Available at: https://erpstat.ru/othody/klass-opasnosti-veshchestv-gost.html (accessed: 05/05/2022)
- 24. Vorozhcova T.N., Majsyuk E.P., Ivanova I.Yu. Sistema ontologij dlya issledovaniya antropogennogo vliyaniya ob"ektov energetiki na okruzhayushchuyu sredu [Ontology system for the study of anthropogenic impact of energy facilities on the environment]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 1(17), pp. 89-104. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.007

- 25. ESG (Environmental, Social and Governance). Available at: https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/other/esg-environmental-social-governance (accessed: 05/05/2022)
- 26. Mazhorina M.V. ESG principy v mezhdunarodnom biznese i «ustojchivye kontrakty» [ESG principles in international business and "sustainable contracts"]. Actual Problems of Russian Law Journal, 2021, vol. 16, no. 12, pp. 195-198. DOI: 10.17803/1994-1471.2021.133.12.185-198
- 27. Vorozhcova T.N., Ivanova I.Yu., Majsyuk E.P. Komponentty ontologicheskogo prostranstva znanij dlya ocenki vliyaniya energetiki na kachestvo zhizni nasedeniya [Components of the ontological knowledge space for assessing the impact of energy on the quality of life of the population]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 3(23), pp. 17-27. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.002
- 28. Vorozhtsova T.N., Ivanova I.Y., Maysyuk E.P. Integration of components of the ontological knowledge space to assess the impact of energy on the quality of life of the population. Energy Systems Research, 2021, vol. 4, no. 4. DOI: 10.38028/esr.2021.04.0003
- 29. Danilov N.I., Shchelokov Ya.M. Regional'naya sostavlyayushchaya strategii energosberezheniya [Regional component of the energy saving strategy]. Economy of regions, 2007, no. 3. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-sostavlyayuschaya-strategii-energosberezheniya (accessed: 04/25/2022).

Tatiana N. Vorozhtsova, Ph.D, Leading Research Engineer of the Department of Artificial Intelligence Systems in Energy, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, tnn@isem.irk.ru, ORCID: 0000-0002-4022-8937, Russia, Irkutsk, Lermontova d. 130

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 20.05 2022.

The article was submitted 05/06/2022; approved after reviewing 05/16/2022; accepted for publication 05/20/2022.

УЛК 004.822+629.7.021

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.013

Онтологическое моделирование аппаратов на динамической воздушной подушке

Аршинский Леонид Вадимович¹, Скоробогатова Марина Викторовна²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, larsh@mail.ru

Аннотация. В работе на основе онтологического моделирования отражаются основные особенности такой предметной области, как летательные аппараты на динамической воздушной подушке. Показана связь онтологий с различными задачами предметной области, включая задачи оптимизации формы крыла конечного размаха, движущегося на сверхмалых отстояниях от опорной поверхности. Выделены особенности постановок задач оптимального проектирования низколетящих крыльев. Отмечено, что соответствующие онтологии можно развивать и они могут использоваться для классификации и систематизации различных задач, позволяя явно сформулировать идеи и концепции, лежащие в основе получаемых решений.

Ключевые слова: онтологическое моделирование, аппараты на динамической воздушной подушке, низколетящее крыло, оптимальное проектирование

Цитирование: Аршинский Л.В. Онтологическое моделирование аппаратов на динамической воздушной подушке / Л.В. Аршинский, М.В. Скоробогатова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 139-146. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.013.

Введение. Как представляется, полезность онтологического моделирования заключается не только в том, что с его помощью можно представить основные концептуальные понятия предметной области и отношения между ними, но и в том, что общее описание предметной области, как системы, позволяет глубже понять какие задачи в ней существуют и как их можно решать.

Одной из интересных и практически востребованных предметных областей являются летательные аппараты (ЛА), движущиеся на малых и сверхмалых относительных отстояниях от твёрдой поверхности (вода, грунт). Эти аппараты, называемые аппаратами на динамической воздушной подушке (АДП), характеризуются высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с привычными транспортными средствами (ТС): скоростью, грузоподъёмностью, относительной амфибийностью. Вместе с тем разработка таких ТС нетривиальна. Проблемы связаны с тем, что т.н. опорная поверхность – граница раздела сред крылом – существеннейшим образом влияет на поведение аппарата: аэродинамические характеристики (АДХ), динамику и статику полёта, и т.д. Это нужно учитывать при проектировании. Авторы продолжительный срок занимались задачами оптимизации изолированного низколетящего крыла для АДП и обратили внимание, что порой даже специалисты из родственных предметных областей (например, в области самолётостроения и эксплуатации самолётов), не всегда понимают особенности движения таких ТС (например, определяющую роль нижней поверхности крыла в формировании АДХ, возможность кратного, а не в единицах, процентов, изменения значений АДХ при изменении формы крыла, и так далее). В этих задачах опорная поверхность приводит к нетрадиционным, по сравнению с безграничной жидкостью, постановкам, из-за чего возникают вопросы у тех, кто не знаком с ними. Одним из способов преодолеть подобное недопонимание является онтологическое моделирование (улучшение взаимопонимания

между специалистами – одна из традиционных целей онтологий). Оно же позволяет внимательнее взглянуть и на классификацию задач проектирования АДП, а также на методы их решения.

² Московский государственный университет гражданской авиации, Иркутский филиал, Россия, Иркутск, *marina.vik@mail.ru*

Следует отметить, что несмотря на наличие работ по онтологическому моделированию ЛА и связанных с этим вопросов (см. напр. [1-5]), онтологий, посвящённых именно АДП, авторам встретить не удалось. Возможно это связано с достаточно ограниченным кругом специалистов, работающих сегодня в этой области.

1. Описание предметной области. АДП – это особый класс ЛА (также говорят о судах на динамической воздушной подушке – морская терминология здесь тоже применяется), интерес к которым сформировался ещё в 30-х годах прошлого века и не спадает до сих пор [6-9]. Их отличительной чертой является конструктивное использование т.н. «эффекта экрана», когда между крылом низколетящего ЛА и твёрдой поверхностью (грунт, вода) возникает дополнительное давление, воздействующее на крыло и повышающее, например, его подъёмную силу. Оно может быть столь велико, что подъёмная сила крыла возрастает кратно по сравнению с безграничным потоком [6, 7]. Существенно меняются и другие АДХ. Это позволяет, к примеру, проектировать суда с высокой грузоподъёмностью и аэродинамическим качеством (отношением подъёмной силы к аэродинамическому сопротивлению) при скоростях движения, как у небольших самолётов. Т.к. эксплуатировать подобные аппараты предполагается в основном над водной поверхностью, их проектированием часто занимаются не авиационные, а «водные» инженеры, отсюда же и судовая терминология (пример – известные разработки Р.Е. Алексеева [8, 9]).

Условия обтекания АДП порождают явления, отсутствующие в безграничной жидкости. Например, проблему их статической устойчивости (без преувеличения можно сказать, что это, пожалуй, главное препятствие к повсеместному распространению подобных ТС: в отличие от ЛА в безграничной жидкости здесь существуют два аэродинамических фокуса — фокус по тангажу и фокус по отстоянию, учёт взаимного расположения которых крайне важен, ошибки могут привести к аварии или катастрофе [10-12]). Имеются и другие проблемы. В частности, на полёт влияет форма опорной поверхности, когда аппарат движется над водой, осложнена его горизонтальная циркуляция и т.д. Это делает соответствующие задачи системными по своей сути: слишком велико здесь взаимное влияние частей. Сама система по существу сводится к трём основным составляющим: крылонабегающий поток-опорная поверхность. Их взаимосвязь, а также взаимосвязь более мелких компонентов определяют весь облик предметной области.

Как показали исследования, влияние твёрдой поверхности тем явственнее, чем меньше относительная высота полёта, измеряемая в длинах хорды или размаха. При этом существенно меняется математика предметной области. В частности, традиционные в аэродинамике интегро-дифференциальные модели превращаются в дифференциальные уравнения в частных производных [13-16]. Это несколько упрощает моделирование (хотя модели остаются достаточно сложными, нелинейными), позволяя отойти от прямых численных методов, которые не очень подходят, например, для обратных задач (к ним отностятся и задачи оптимизации).

Известно, что оптимизационные задачи часто требуют аналитических или квазианалитических решений, получить которые можно, как правило, идя на разные упрощения асимптотического характера. Пониманию того, чем можно пожертвовать и от чего отказаться, способствуют опыт исследователя и знание им предметной области. Однако упрощения порой носят случайный, бессистемный характер, зависящий от конкретных обстоятельств. Инструментом их систематизации могут послужить онтологии. Они позволят эти представления формализовать и перевести на более высокий уровень. С их же помощью удобно разьяснять смежным специалистам, привыкшим к своим постановкам и

формулировкам, особенности именно данной предметной области. Как показывает опыт, проблема взаимопонимания – это действительно актуальная проблема.

2. Онтологическое моделирование АДП. В основе онтологического моделирования лежит формальное описание предметной области системой концептов (понятий), отношений между ними и аксиом предметной области. В этом смысле, согласно Груберу, онтология представляет собой «спецификацию концептуализации» [17]. Концептуализация предполагает выделение в предметной области элементов, которые необходимы для данной области [18]. Онтологии делятся на «тяжёлые» и «лёгкие» [18]. Первые определяются как:

$$O = \langle C, P, R, A \rangle$$
,

где C — конечное множество концептов, P — конечное множество свойств концептов, R — конечное множество отношений, A — конечное множество аксиом (функций интерпретации). Вторые — содержат только концепты и отношения. Они определяются как:

$$O = \langle C, R \rangle$$
.

Для описания «тяжелых» онтологий, как правило, используются специальные языки.

Разрабатываемая онтология системы «крыло-набегающий поток-опорная поверхность» реализуется в классе лёгких и может представляться графом с вершинами-концептами и дугами-отношениями между концептами. Сначала рассмотрим проблему в более общем контексте всего АДП в целом – рисунок 1.

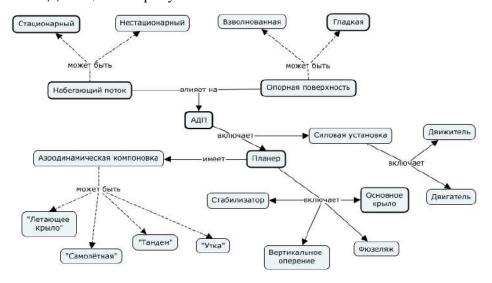


Рис. 1. Онтология АДП в целом

Данная онтология содержит главные составляющие, влияющие на АДХ. Иные элементы (например, шасси, бортовое оборудование – авионику и т.д.) опускаем. Это – метаонтология, отражающая контекст проблемы проектирования АДП. В частности – проблемы оптимизации изолированного низколетящего крыла, которая исследовалась авторами (см., напр. [19-22]).

Отношения «включает» и «влияет на» конъюнктивные (сплошная линия), «может быть» – исключающее ИЛИ (XOR) (пунктирная линия).

Онтология на рис. 1 имеет иллюстративный, не исчерпывающий характор. Однако уже на её основе можно выделить важные классы задач, связанных с АДП:

1. Задачи статической устойчивости – концепты «Аэродинамическая компоновка», «Основное крыло», «Стабилизатор», «Фюзеляж», «Набегающий поток» («Стационарный»), «Опорная поверхность» («Гладкая»).

- 2. Задачи динамической устойчивости концепты «Аэродинамическая компоновка», «Основное крыло», «Стабилизатор», «Фюзеляж», «Набегающий поток» («Нестационарный»), «Опорная поверхность» («Гладкая» или «Взволнованная»).
- 3. Задачи оптимальной компоновки концепты «Аэродинамическая компоновка», «Основное крыло», «Стабилизатор», «Фюзеляж», «Силовая установка», «Набегающий поток» («Стационарный»), «Опорная поверхность» («Гладкая»).
- 4. Задачи движения крыла над взволнованной поверхностью концепты «Основное крыло», «Набегающий поток», «Опорная поверхность» («Взволнованная»).
- 5. Задачи движения АДП над взволнованной поверхностью концепты «Аэродинамическая компоновка», «Основное крыло», «Стабилизатор», «Фюзеляж», «Набегающий поток» («Стационарный»), «Опорная поверхность» («Взволнованная»).
- 6. Задачи оптимизации основного крыла концепты «Основное крыло», «Набегающий поток» («Стационарный»), «Опорная поверхность» («Гладкая»).

Онтологию можно развивать и дополнять с учётом решаемых задач.

В работах авторов рассматривается шестой класс задач — оптимизации формы (изолированного) крыла, движущегося в стационарном потоке над гладкой поверхностью (на рис. 2 выделено). Т. е. рассматривается главный элемент любого ЛА — основное крыло. Несмотря на то, что набегающий поток и опорная поверхность воздействуют на АДП в целом, главный элемент влияния со стороны набегающего потока и опорной поверхности — именно основное крыло (в аэродинамической компоновке «Самолётная» стабилизатор, например, вообще вынесен из зоны влияния опорной поверхности). На нём создаётся основная подъёмная сила и другие связанные с ним аэродинамические характеристики.

Крыло, как конструктивный элемент, можно описать онтологией на рисунке 2.

Здесь, как и на рис. 1, отношение «включает» конъюнктивное, отношение «может быть» – исключающее ИЛИ. Иные составляющие и их особенности, вроде средств механизации и т.п., не рассматриваем.

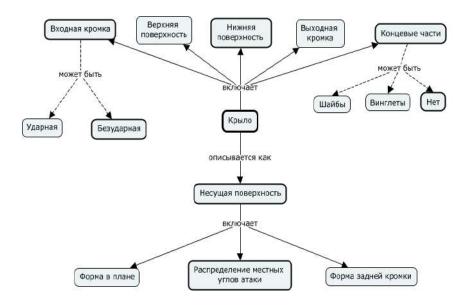


Рис. 2. Основное крыло применительно к рассматриваемой задаче

Рисунок 2 систематизирует представление об основных конструктивных особенностях низколетящего крыла при его оптимизации. При разработке математической модели для таких задач исходят из того, что крыло – это основа АДП, причём на сверхмалых отстояниях несущая поверхность крыла фактически совпадает с его нижней поверхностью [7, 16, 23].

Это означает, что проектировать нужно именно нижнюю поверхность (в отличие от безграничной жидкости, где основной вклад вносит верхняя поверхность крыла). Входную кромку целесообразно пректировать как безударную (обеспечивающую безударный вход крыла в поток). Это снижает общее аэродинамическое сопротивление [16]. Концевые части часто полагают «простыми» (нет шайб, винглетов и т.п.). Крыло можно оптимизировать комплексно, с учётом формы в плане, формы задней кромки и распределения местных углов атаки, как в [16, 19, 20, 23], а можно только для местных уголов атаки при заданной форме в плане и задней кромки, как в [21, 22]. Допустимы различные комбинации в зависимости от сложности решаемых задач. В последнем случае эффекта добиваются за счёт «местной крутки» крыла. На рис. 1 и 2 соответствующие концепты выделены. Именно в таких постановках авторами решались задачи о крыле с максимальной подъёмной силой и крыле с максимальным градиентом подъёмной силы по отстоянию ([19, 20] и др.), крыле с минимальным абсолютным значением аэродинамической производной момента тангажа по отстоянию и крыле с максимальным значением аэродинамической производной подъёмной силы по отстоянию при фиксированном значении аэродинамической производной момента тангажа по отстоянию ([21, 22] и др.). Интересно, что соответствующие формы крыльев в этих постановках оказались качественно близки друг другу.

Заключение. В работе представлены онтологии АДП и его основного крыла, взятые за основу в работах авторов по оптимизации несущего крыла такого типа ТС. Показана связь онтологий с различными задачами предметной области, включая задачи оптимизации формы крыла конечного размаха, движущегося на сверхмалых отстояниях от опорной поверхности. Выделены особенности постановок задач оптимального проектирования таких крыльев, используемые в подобных работах.

Отмечено, что соответствующие онтологии могут использоваться для классификации и систематизации задач в рассмотренной предметной области и позволяют явно сформулировать идеи и концепции, лежащие в основе их решения.

Список источников

- 1. Боргест Н.М. Онтология проектирования: теоретические основы. Часть 1. Понятия и принципы. Самара: СГАУ, 2010. 88 с.
- 2. Лебедев С.В. Онтолого-ориентированное проектирование подсистемы оценки обстановки интеллектуального агента реального времени / С.В. Лебедев, М.Г. Пантелеев // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» (9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия) : Труды семинара. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С. 83-90.
- 3. Павлов П.Ю., Онтологическая структуризация в параллельном инжиниринге проектирования сборочных приспособлений для летательных аппаратов / П.Ю. Павлов, П.И. Соснин, А.В. Лебедев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2016. Т. 18, No1(2). С. 373-377
- 4. Гришин М.В. Применение прецедентно-ориентированного метода в задачах поддержки жизненного цикла авиационного изделия / М.В. Гришин, А.Г. Берг, А.С. Кузнецов, [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2018. −Т. 20, −№ 4(3). −С. 391-398. Лукашевич Н.В., Невзорова Н.А. АвиаОнтология: анализ современного состояния ресурса. https://www.dialog-21.ru/media/2545/lukashevich.pdf.
- 5. Белавин Н.И. Экранопланы / Н.И. Белавин. Л.: Судостроение, 1977. 230 с.
- 6. Панченков А.Н. Экспертиза экранопланов / А.Н. Панченков, П.Т. Драчев, В.И. Любимов. Нижний Новгород: Поволжье, 2006.-656 с.
- 7. Жуков К. 9 этапов развития экранопланов, 2015. URL: https://warspot.ru/2356-9-etapov-razvitiya-ekranoplanov
- 8. Морские монстры: экранопланы СССР и России, 2017. https://life.ru/p/991585

- 9. Иродов Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана / Р.Д. Иродов // Ученые записки ЦАГИ, 1970. T.1. № 4. C. 63-72.
- 10. Суржик В.В. Структурно-параметрический синтез математических моделей экранопланов / В.В. Суржик. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012 196 с.
- 11. Белецкая С.Б. Оптимизация конструктивных параметров несущих гидродинамических комплексов скоростных судов : специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика», 05.08.03 «Проектирование и конструкция судов» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Белецкая Светлана Борисовна; Нижегородский государственный технический университет. Нижний Новгород, 1999. 188 с.
- 12. Панченков А.Н. Основы квадрупольной теории крыла вблизи твёрдой границы / А.Н. Панченков // Асимптотические методы в теории систем. Иркутск, 1974. С. 68-98.
- 13. Панченков А.Н. Квадрупольная теория крыла // А.Н. Панченков // Асимптотические методы в динамике систем. Новосибирск: Наука, 1980. С. 5-116.
- 14. Шлаустас Р.Ю. Второе приближение квадрупольной теории крыла в теории несущей поверхности / Р.Ю. Шлаустас // Методы возмущений в механике. Новосибирск: Наука, 1982. С. 56-69.
- 15. Панченков А.Н. Теория оптимальной несущей поверхности / А.Н. Панченков. Новосибирск: Наука, 1983. 256 с.
- 16. Gruber T. R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference, 1991, pp. 601-602.
- 17. Гаврилова Т.А. Инженерия знаний. Модели и методы / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев. СПб : Издательство «Лань», 2016. 324 с.
- 18. Аршинский Л.В. Оптимизация геометрии крыла вблизи опорной поверхности : специальность 01.02.05 «Механика жидкостей, газа и плазмы» : диссертация на соискание учёной степени кандидата физикоматематических наук /Аршинский Леонид Вадимович; Институт теоретической и прикладной механики. Новосибирск, 1990. 190 с.
- 19. Аршинский Л.В., Борисюк М.Н. Оптимизация несущих поверхностей экранопланов // Панченков А.Н.: физик, математик, инженер / Сб.тр. под общей ред. проф. Данеева А.В. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. С. 292-309.
- 20. Скоробогатова М.В. Методика численного определения оптимальной формы низколетящего крыла как элемента системы «Летательный аппарат-поверхность» / М.В. Скоробогатова, Л.В. Аршинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017. №3 (55). С. 168-174.
- 21. Скоробогатова М.В. Сравнительный анализ оптимальной геометрии нижней поверхности низколетящего крыла, полученной в результате решения оптимизационной задачи аналитическим и численным методами / М.В. Скоробогатова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017. №3(7). С. 75-85.
- 22. Борисюк М.Н. Исследование оптимальных соотношений крыльев вблизи твёрдой границы / М.Н. Борисюк // Асимптотические методы в динамике. Новосибирск: Наука, 1980. С. 116-126.

Аршинский Леонид Вадимович. 1957 г. рождения, окончил Иркутский государственный университет в 1979 г., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, д.т.н., доцент, Author ID: 520252, SPIN-код: 9286-4084, ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru.

Скоробогатова Марина Викторовна. 1972 г. рождения, окончила Иркутский государственный университет в 1994 г., старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Иркутского филиала Московского государственного технического университета Гражданской авиации, AuthorID: 946198, SPIN-код: 3032-7523, marina.vik@mail.ru.

UDC 004.822+629.7.021

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.013

Ontological modeling of vehicles of dynamic air cushion

Leonid V. Arshinskiy¹, Marina V. Skorobogatova¹

¹ Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, larsh@mail.ru

Abstract. The work discusses of ontological modeling of such a subject area as vehicles of dynamic air cushion. The connection of ontologies with various tasks of this subject area is shown. The optimization of the shape of a wing of finite span moving at ultra-small distances from the ground surface is discusses too. In context of ontologies, the features of the formulation of optimal design problems of low-flying wings are highlighted. It is noted that the corresponding ontologies can be used to classify and systematize various tasks in this subject areas. They allow to explicitly formulate the ideas and concepts underlying the corresponding solutions.

Keywords: ontological modeling, dynamic air-cushion vehicles, ground effect wing, optimal design

References

- 1. N.M. Borgest. Ontology of Designing (theoretical basis). Part 1. Concepts and Principles. Samara: Published at Samara Space University, 2011, 88 p.
- 2. Lebedev S.V., Panteleev M.G. Ontologo-orientirovannoe proektirovanie podsistemy ocenki obstanovki intellektual'nogo agenta real'nogo vremeni [Ontology-oriented design of a subsystem for assessing the situation of an intelligent real-time agent]. The second All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence (BTS-II-2015)" (October 9, 2015, St. Petersburg, Russia), Proceedings of the seminar, St. Petersburg: Publishing House "Polytechnic-service", 2015, pp. 83-90.
- 3. Pavlov P.Yu., Sosnin P.I., Lebedev A.V. Ontologicheskaya strukturizaciya v parallel'nom inzhiniringe proektirovaniya sborochnyh prisposoblenij dlya letatel'nyh apparatov [Ontological structuring in parallel engineering of designing assembly devices for aircraft]. Izvestiya of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Science, 2016, vol. 18, no 1(2), pp. 373-377.
- 4. Grishin M.V., Berg A.G., Kuznetsov A.S., Lebedev A.V., Pavlov P.V. Primenenie precedentno-orientirovannogo metoda v zadachah podderzhki zhiznennogo cikla aviacionnogo izdeliya [Application of the precedent-oriented method in the tasks of supporting the life cycle of an aircraft product] // Izvestiya of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Science, 2018, vol. 20, no. 4(3), pp. 391-398.
- 5. Lukashevich N.V., Nevzorova O.A. AviaOntologiya: analiz sovremennogo sostoyaniya resursa [AviaOntology: analysis of the current state resource]. <u>Available_at https://www.dialog-21.ru/media/2545/lukashevich.pdf</u> (accessed 09 June 2022).
- 6. Belavin N.I. Ekranoplany [Ground-effect vehicles]. Leningrad, Sudostroenie, 1977, 230 p.
- 7. *Panchenkov* A.N., Drachev P.T., Lyubimov V.I.. Ekspertiza ekranoplanov [Expertise of g*round-effect vehicles*]. Nizhnij Novgorod, Povolzh'e, 2006, 656 p.
- 8. Zhukov K. 9 etapov razvitiya ekranoplanov [9 stages of development of ground-effect vehicles], 2015, available at: https://warspot.ru/2356-9-etapov-razvitiya-ekranoplanov (accessed 27 April 2012).
- 9. Morskie monstry: ekranoplany SSSR i Rossii [Sea monsters: ground-effect vehicles of USSR and Russia], 2017, available at: https://life.ru/p/991585 (accessed 27 April 2022).
- 10. Irodov R.D. Kriterii prodol'noj ustojchivosti ekranoplana [Criteria of longitudinal stability of ground-effect vehicles]. Uchenye zapiski TsAGI [TsAGI Science Journal], 1970, vol. 1, no 4, pp. 63-72.
- 11. Surzhik V.V. Strukturno-parametricheskij sintez matematicheskih modelej ekranoplanov: monografiya [Structural-parametric synthesis of mathematical models of g*round-effect vehicles*]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2012, 196 p.

² Irkutsk Branch of the Moscow State University of Civil Aviation, Russia, Irkutsk, marina.vik@mail.ru

- 12. Beletskaya S.B. Optimizaciya konstruktivnyh parametrov nesushchih gidrodinamicheskih kompleksov skorostnyh sudov [Optimization of the design parameters of the lifting hydrodynamic complexes of high-speed vessels]. Ph.D. thesis, Nizhnij Novgorod, 1999, 188 p.
- 13. Panchenkov A.N. Osnovy kvadrupol'noj teorii kryla vblizi tvyordoj granicy [Fundamentals of the quadrupole theory of a wing near a solid boundary]. Asimptoticheskie metody v teorii system [Asymptotic methods in systems theory]. Irkutsk, 1974, pp. 68-98.
- 14. Panchenkov A.N. Kvadrupol'naya teoriya kryla [Quadrupole theory of a wing]. Asimptoticheskie metody v dinamike system [Asymptotic methods in the dynamics of systems]. Novosibirsk, Nauka, 1980, pp. 5-116.
- 15. Shlaustas R.Yu. Vtoroe priblizhenie kvadrupol'noj teorii kryla v teorii nesushchej poverhnosti [The second approximation of the quadrupole theory of the wing in the theory of the lifting surface]. Metody vozmushchenij v mekhanike [Perturbation methods in mechanics]. Novosibirsk, Nauka, 1982, pp. 56-69.
- 16. Panchenkov A.N. Teoriya optimal'noj nesushchej poverhnosti [Theory of optimal lifting surface]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 256 p.
- 17. Gruber T. R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference, 1991, pp. 601-602.
- 18. Gavrilova T.A., Kudryavcev D.V., Muromcev D.I. Inzheneriya znanij. Modeli i metody [Knowledge engineering. Models and methods]. SPb, Izdatel'stvo «Lan'», 2016. 324 p..
- 19. Arshinskiy L.V. Optimizaciya geometrii kryla vblizi opornoj poverhnosti [Optimization of the geometry of the wing near the ground]. Ph.D. thesis, Novosibirsk, 1990, 190 p.
- 20. Arshinskiy L.V., Borisyuk M.N. Optimizaciya nesushchih poverhnostej ekranoplanov [Optimization of the lifting surfaces of ground-effect vehicles]. Panchenkov A.N.: fizik, matematik, inzhener [Panchenkov A.N.: physicist, mathematician, engineer]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 2005, pp. 292-309.
- 21. Skorobogatova M.V., Arshinskiy L.V. Metodika chislennogo opredeleniya optimal'noj formy nizkoletyashchego kryla kak elementa sistemy «Letatel'nyj apparat-poverhnost'» [Method for numerical determination of the optimal shape of a low-flying wing as an element of the "Aircraft-surface" system]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017, no. 3(55), pp. 168-174.
- 22. Skorobogatova M.V. Sravnitel'nyj analiz optimal'noj geometrii nizhnej poverhnosti nizkoletyashchego kryla, poluchennoj v rezul'tate resheniya optimizacionnoj zadachi analiticheskim i chislennym metodami [Comparative analysis of the optimal geometry of the lower surface of a low-flying wing obtained as a result of solving the optimization problem by analytical and numerical methods]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2017, no. 3 (7), pp. 75-85.
- 23. Borisyuk M.N. Issledovanie optimal'nyh sootnoshenij kryl'ev vblizi tvyordoj granicy [Investigation of optimal wing ratios near a solid boundary]. Asimptoticheskie metody v dinamike [Asymptotic methods in dynamics]. Novosibirsk, Nauka, 1980, pp. 116-126.

Arshinsky Leonid V. Born in 1957, Graduated from Irkutsk State University in 1979, Professor of the Department "Information Systems and Information Security" of Irkutsk State Transport University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Author ID: 520252, SPIN-code 9286-4084, ORCID 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru.

Skorobogatova Marina V. Born in 1972, Graduated from Irkutsk State University in 1994, Senior lecturer of the Department "Natural Sciences" of the Irkutsk branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Author ID: 946198, SPIN-code: 3032-7523, marina.vik@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 28.04.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 04/28/2022; approved after reviewing 06/09/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 681.5

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.014

Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы управления автономным мобильным роботом

Баканов Максим Витальевич, Данеев Алексей Васильевич, Сизых Виктор Николаевич Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, *daneev@mail.ru*

Аннотация. В статье разработаны математические модели трехколесного мобильного робота на основе аппарата переменных состояния и в операторном виде, на основе которых осуществляется синтез его адаптивной системы управления по методике построения модальных ПИД-регуляторов и по методу обратных задач динамики. Математическая модель позволяет без аппаратной реализации мобильного робота проанализировать работу создаваемой системы управления и при необходимости внести необходимые коррекции. Математическая модель мобильного робота состоит из кинематической и динамической моделей. Кинематическая модель является простейшим описанием поведения мобильного робота и допускает исследование его свойств. Динамическая модель является более подробным описанием мобильного робота и учитывает силомоментные воздействия, произведённые исполнительными механизмами. Для того чтобы математически описать мобильный робот, введен ряд условий, сформулированных в виде следующих допущений: 1) мобильный робот рассматривается при условии, что его механизм является жёстко связанным; 2) колёса являются недеформируемыми и находятся в точечном контакте с поверхностью; 3) движение робота осуществляется без проскальзывания; 4) платформа рассматривается как твёрдое тело, на котором закреплена колёсная система. В работе приведены следующие результаты исследования: разработаны математические модели мобильного робота в пространстве состояний и в операторной форме; синтезирован алгоритм управления движением робота на основе метода обратных задач динамики; разработана Simulink-модель управляемого мобильного робота на основе методики модального ПИД- регулирования. Устойчивость системы управления обеспечивается за счет введения внешней отрицательной обратной связи по угловой скорости движения платформы робота. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с точной непрерывной математической моделью управления робота погрешности по координатам, угловым и линейным скоростям и моментам составляют 5-7 %, что позволяет сделать вывод о соответствии разработанной цифровой модели робота, ее точному непрерывному аналогу.

Ключевые слова: автономный мобильный робот, математические модели в пространстве состояний и в операторном виде, модальный ПИД-регулятор, метод обратных задач динамики

Цитирование: Баканов М.В. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы управления автономным мобильным роботом / М.В. Баканов, А.В. Данеев, В.Н. Сизых // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. - N = 2(26). - C. 147-160. - DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.014.

Введение. Для описания поведения мобильного робота необходимо разработать его математическую модель. Это позволит без аппаратной реализации мобильного робота проанализировать работу создаваемой системы управления и при необходимости внести необходимые коррекции. Математическая модель мобильного робота состоит из кинематической и динамической моделей. Кинематическая модель является простейшим описанием поведения мобильного робота и допускает исследование его свойств. Динамическая модель является более подробным описанием мобильного робота и учитывает силомоментные воздействия, произведённые исполнительными механизмами.

Приводимое математическое описание движения мобильного робота справедливо для случая движения робота по горизонтальной плоскости. Для того, чтобы математически описать мобильный робот, необходимо ввести ряд условий, сформулированных в виде следующих допущений [1]:

1) будем рассматривать мобильный робот при условии, что его механизм является жёстко связанным;

- 2) колёса являются недеформируемыми и находятся в точечном контакте с поверхностью;
- 3) движение робота осуществляется без проскальзывания;
- 4) платформа рассматривается как твёрдое тело, на котором закреплена колёсная система.
- 1. Кинематическая модель мобильного робота. Поскольку движение робота осуществляется в горизонтальной плоскости, то достаточно рассмотреть плоский случай. На рис. 1 изображен мобильный робот с соответствующими системами координат [2, 3]. В точках L и R расположены колеса, оси вращения которых совпадают с отрезком LR длины l. Свяжем с роботом систему координат $O_0X_0V_0$, расположив точку O_0 посередине отрезка LR и направив ось X_0 перпендикулярно LR в направлении движения. Тогда положение основания робота как твердого тела задается тройкой чисел φ , x, y, где φ угол между осями X и X_0 ; x, y координаты точки O_0 в абсолютной системе координат OXV.

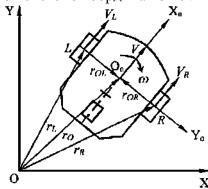


Рис. 1. Кинематическая схема мобильного робота

Положение точек робота O_0 , L и R в абсолютной системе соответствует радиусвекторам r_O , r_L и r_R . При этом, положение точки O_0 может быть получено из следующих выражений

$$r_O = r_R + r_{OR}, r_O = r_L + r_{OL}.$$
 (1)

Из кинематики плоского движения известно, что скорость движения любой точки некоторого твёрдого тела может быть представлена в виде

$$V_A = V_O + \omega \times r_{OA}, \tag{2}$$

где V_A — скорость поступательного движения произвольной точки A;

 V_{O} – скорость поступательного движения полюса твёрдого тела;

 ω – скорость вращательного движения твёрдого тела относительно полюса O;

 r_{OA} — радиус-вектор, определяющий положение точки A относительно полюса O.

Таким образом, в соответствии с рис. 1 скорость движения правого и левого колес мобильного робота может быть получена из следующих выражений:

$$\begin{cases} V = V_R + \omega \times r_{OR} \\ V = V_L + \omega \times r_{OL} \end{cases}$$
 (3)

Раскрывая векторное произведение в выражениях (3), при условии $r_{OR}=r_{OL}$ получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \omega = \frac{1}{l} (V_R - V_L) \\ V = \frac{1}{2} (V_R + V_L) \end{cases}$$
(4)

где l — длина оси между колесами.

Введем в рассмотрение декартову прямоугольную систему координат x, y, φ . Тогда

$$\begin{cases}
\dot{x} = V\cos\varphi, \\
\dot{y} = V\sin\varphi, \\
\dot{\varphi} = \omega.
\end{cases}$$
(5)

Подставляя уравнения (4) в выражения (5), окончательно получим

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{1}{2}(V_R + V_L)\cos\varphi, \\ \dot{y} = \frac{1}{2}(V_R + V_L)\sin\varphi, \\ \dot{\varphi} = \frac{1}{l}(V_R - V_L). \end{cases}$$
(6)

Здесь x, y — координаты платформы робота на плоскости, φ — угол поворота платформы. Соотношения (6) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка относительно фазового вектора с компонентами (x, y, φ) . Скаляры V_R и V_L , заданные тем или иным образом (как функции времени или фазовых координат), определяют движение платформы. Таким образом, соотношения (6) можно рассматривать как кинематическую модель мобильного трехколесного робота. Линейная и угловая скорости робота определяются из выражения (4).

2. Динамическая модель мобильного робота. Прежде чем перейти к выводу уравнений движения, рассмотрим более детально связи, наложенные на перемещение робота. Мобильный робот осуществляет движение по плоскому рельефу, имея два ведущих колеса радиуса ρ . Колеса вращаются без проскальзывания, и оси их вращения совпадают с линией LR (рис. 2). Это условие устанавливает ограничения на координаты и скорости, и представляет собой одно из уравнений связи, геометрическая интерпретация которого состоит в том, что вектор скорости $V=(x',y')^T$ перпендикулярен орту y_0 . Таким образом, налагаемая связь является неголономной [4, 6].

Рассмотрим теперь условия непроскальзывания. Мы рассматриваем робот как систему трех твердых тел, включающую платформу и два ведущих колеса. Положение этой системы задается следующим набором параметров: x, y, φ — координаты положения платформы; q_L , q_R — углы поворота правого и левого колеса соответственно. Условия непроскальзывания получим, воспользовавшись соотношениями (6), а также тем обстоятельством, что

$$V_R = \rho \dot{q}_R, \qquad (7)$$

$$V_L = \rho \dot{q}_L.$$

Последнее уравнение в соотношениях (6) интегрируется

$$\varphi = \frac{\rho}{l}(\dot{q}_R - \dot{q}_L) + C,\tag{8}$$

где С – некоторая постоянная. Окончательно уравнения связи (6) принимают вид

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\rho}{2} (\dot{q}_R + \dot{q}_L) \cos \varphi, \\ \dot{y} = \frac{\rho}{2} (\dot{q}_R + \dot{q}_L) \sin \varphi, \\ \varphi = \frac{\rho}{l} (q_R - q_L) + C. \end{cases}$$
(9)

Тогда рассматриваемая система имеет три обобщенные координаты (x, y, φ) и две степени свободы. При составлении динамической модели будем пренебрегать моментами инерции колёс и других вращающихся частей привода, так как они значительно меньше соответствующих моментов платформы, приведённых к валу электрического двигателя.

Теперь перейдём к выводу уравнения движения. Для вывода уравнений движения воспользуемся уравнением Лагранжа II рода [7, 8]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial q_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i , i=1,2,...n, \tag{10}$$

где n — число обобщенных координат; E_k — кинетическая энергия; q_i — обобщенные координаты; Q_i — обобщенные силы.

Рассматриваемый мобильный робот имеет два независимых ведущих колеса. Поскольку колёса находятся в точечном контакте и осуществляют движение без проскальзывания, то вращающий момент τ_i может быть представлен в виде силы $F_i = \tau_i/\rho$, приложенной к оси этого ведущего колеса. Таким образом, наша система может быть представлена в виде твёрдого тела, осуществляющего плоскопараллельное движение под воздействием системы сил (рис. 2).

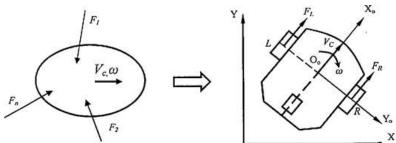


Рис. 2. Движение мобильного робота под воздействием системы сил

Уравнение кинетической энергии платформы как твёрдого тела имеет вид

$$E_k = \frac{mV_c^2}{2} + \frac{J_c\omega^2}{2},\tag{11}$$

где m — масса платформы; V_c — скорость центра масс платформы; J_c — момент инерции платформы относительно центра масс; ω — угловая скорость платформы.

Запишем уравнение кинетической энергии платформы с учётом обобщённых координат (x, y, φ)

$$E_k = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{J_c}{2}\varphi^2. \tag{12}$$

В соответствии с уравнением Лагранжа II рода, выполнив ряд преобразований, получим систему уравнений вида

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (F_R + F_L)\cos\varphi, \\ m\ddot{y} = (F_R + F_L)\sin\varphi, \\ J\ddot{\varphi} = \frac{l}{2}(F_R - F_L). \end{cases}$$
(13)

Система дифференциальных уравнений (13), описывающая движение платформы в абсолютной системе координат XOY под воздействием сил F_R и F_L , соответствует уравнениям плоскопараллельного движения, описывающим перемещение центра масс твёрдого тела под воздействием системы внешних сил.

Возводя в квадрат и складывая правые и левые части первых двух уравнений системы (13) с учетом выражений для управляющих моментов правого и левого колес робота ($\tau_R = F_R \rho$, $\tau_L = F_L \rho$, $V = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}$, $\omega = \dot{\varphi}$), окончательно получим

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} = \frac{l}{2\rho I_C} (\tau_R - \tau_L). \end{cases}$$
(14)

Соотношения (14) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно фазового вектора с компонентами $(V,\omega)^T$, а τ_R , τ_L - компоненты вектора управления, порождающие движение системы.

Таким образом, нелинейная математическая модель автономного мобильного робота может быть описана системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \varphi, \\ \dot{y} = V \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} = \frac{l}{2\rho J_c} (\tau_R - \tau_L). \end{cases}$$
(15)

Далее исследуем уравнения движения мобильного робота с учетом динамики следящих приводов. Рассмотрим случай, когда колёса платформы через редукторы управляются непосредственно двигателями постоянного тока с независимым возбуждением (рис.3).

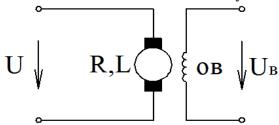


Рис. 3. Схема замещения электродвигателя

Покажем, что учёт наличия следящих приводов не влечёт принципиальных сложностей. Известно, что составленное по II закону Кирхгофа уравнение баланса напряжений одного электродвигателя (ЭД) постоянного тока имеет вид

$$L\dot{I} + RI + K_W \omega_W = U, \tag{16}$$

где L — индуктивность цепи якоря; I — ток, протекающий в обмотке якоря; R — активное сопротивление обмотки якоря; ω_w — угловая скорость вращения вала ЭД; U — напряжение питания обмотки якоря.

Угловые скорости вращения вала ЭД ω_m и колес связаны соотношением

$$\omega_m = \omega_W i_p \,, \tag{17}$$

где i_p — передаточные отношения редукторов.

Выражение для момента т, развиваемого ЭД, имеет вид

$$\tau = K_M I. \tag{18}$$

Здесь K_M , K_w – приведенные конструктивные постоянные ЭД по электромагнитному моменту и угловой скорости его вращения. Тогда, учитывая соотношения (17)-(18), представим уравнение (16) в виде

$$\dot{\tau} = -\frac{R}{L}\tau - \frac{K_M K_W i}{L}\omega_w + \frac{K_M}{L}U. \tag{19}$$

Так как для правого и левого колес отдельно используются два ЭД постоянного тока, то имеем

$$\begin{cases} \dot{\tau}_L = -\frac{R}{L} \tau_L - \frac{K_M K_W i}{L} \omega_L + \frac{K_M}{L} U_L, \\ \dot{\tau}_R = -\frac{R}{L} \tau_R - \frac{K_M K_W i}{L} \omega_R + \frac{K_M}{L} U_R. \end{cases}$$
(20)

Формулы (20) записаны в предположении, что характеристики правого и левого ЭД одинаковы, что на практике совсем не обязательно. Выразим теперь угловые скорости вращения колес ω_L и ω_R через фазовые координаты. Для этого воспользуемся соотношениями (4) с учетом того, что $V_L = \omega_L \rho$ и $V_R = \omega_R \rho$:

$$\omega_R = \frac{1}{\rho} \left(V + \frac{\omega l}{2} \right),$$

$$\omega_L = \frac{1}{\rho} \left(V - \frac{\omega l}{2} \right).$$
(21)

Подставим уравнения (21) в соотношения (20) и пополним систему уравнений (15). В результате получим полную математическую модель динамики мобильного робота с учетом следящих приводов

$$\dot{x} = V\cos\varphi,
\dot{y} = V\sin\varphi,
\dot{\varphi} = \omega,
\dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L),
\dot{\omega} = \frac{l}{2\rho J_c} (\tau_R - \tau_L),
\dot{\tau}_L = -\frac{R}{L} \tau_L - \frac{K_M K_W i}{\rho L} \left(V - \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L} U_L,
\dot{\tau}_R = -\frac{R}{L} \tau_R - \frac{K_M K_W i}{\rho L} \left(V + \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L} U_R.$$
(22)

Модель динамики (22) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений седьмого порядка с фазовым вектором $(x,y,V,\varphi,\omega,\tau_L,\tau_R)^T$ и вектором управления $(U_L,U_R)^T$ и может быть непосредственно использована при моделировании на любом алгоритмическом языке программирования. Однако для синтеза законов управления роботом необходимы другие формы представления его математической модели.

3. Синтез алгоритмов управления движением мобильного робота по методу обратных задач динамики. Заметим, что в системе уравнений (22) только четыре последние уравнения являются зависимыми между собой, а три первые уравнения представляют собой уравнения связи. Продифференцируем шестое и седьмое уравнения в системе (22) и с учетом подстановки в них четвертого и пятого уравнений получим

$$\begin{cases} \ddot{\tau}_{L} + a_{11}\dot{\tau}_{L} + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} - \frac{l^{2}}{4\rho J_{c}}\right)\tau_{R} + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^{2}}{4\rho J_{c}}\right)\tau_{L} = b_{11}\dot{U}_{L}, \\ \ddot{\tau}_{R} + a_{11}\dot{\tau}_{R} + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^{2}}{4\rho J_{c}}\right)\tau_{R} + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} - \frac{l^{2}}{4\rho J_{c}}\right)\tau_{L} = b_{11}\dot{U}_{R}, \end{cases}$$
(23)

где обозначено: $a_{11} = \frac{R}{L}$, $a_{12} = \frac{K_M \cdot K_W \cdot i_p}{\rho L}$, $b_{11} = \frac{K_M}{L}$, τ_L , τ_R — моменты, развиваемые соответственно левым и правым колесом робота (переменные состояния); \dot{U}_L , \dot{U}_R — скорости изменения напряжения питания (управляющий параметр).

Конструктивные параметры трехколесного автономного мобильного робота (рис.4) представлены в табл. 1.



Рис. 4. Внешний вид робота

	гаолица 1 . Конструктивные параметры мооильного рос								
Параметры	т, кг	J_C ,	ρ, м	<i>l</i> , м	K_W	<i>R</i> , Ом	L, Гн	$i_{ m P}$	
		кГсм ²							
Числовые значения	1	2,25	0,0325	0,135	0,0209	0,36	1,23	55,74	
		10-4					10-3		

Таблица 1. Конструктивные параметры мобильного робота

 $x10^{-4}$ В табл. 1 обозначены: R, L — активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря ЭД постоянного тока; l — длина оси; ρ — радиус колес; m — масса платформы; i_p — передаточное число редуктора; J_C — момент инерции платформы относительно центра масс. При синтезе законов управления по методу обратных задач динамики [9] математическая модель робота (23) принимается за объект управления.

В матричном виде система уравнений (23) имеет вид

$$\ddot{X} + C\dot{X} + DX = Bu, \qquad (24)$$

где $X = (\tau_L, \tau_R)$ – вектор состояния системы;

 $u = (\dot{U}_L, \dot{U}_R)$ – вектор управления;

$$\mathcal{C} = egin{bmatrix} a_{11} & 0 \ 0 & a_{11} \end{bmatrix} = diag\{a_{11}, a_{11}\}$$
— диагональная матрица;

$$D = \begin{bmatrix} a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} \end{bmatrix} - \text{симметричная матрица } (D^{-1} = D^T);$$

$$B = egin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{11} \end{bmatrix} = diag\{b_{11}, b_{11}\}$$
 — диагональная матрица эффективности управления.

Таким образом, в этом случае мобильный робот как объект управления является многосвязной (число входов m=2), многомерной (n=2) системой.

Сформулируем теперь задачу синтеза управлений стабилизации (гашения) угловых скоростей мобильного робота на интервале времени $[t_0,t_{\rm K}]$, полагая $t_0=0$, а момент $t_{\rm K}$ нефиксированной величиной.

Пусть в текущий момент времени $t=t_0=0$ состояние управляемой по моментам $\tau_1=\tau_L, \tau_2=\tau_R$ системы (22) или (23) характеризуется значениями $\tau_i(0)=\tau_{i0}(i=1,2)$. Требуется найти такие управляющие воздействия $\dot{U}_i(\dot{U}_1=\dot{U}_L,\,\dot{U}_2=\dot{U}_R)$, при которых система (24) переходит из исходного состояния τ_{i0} в новое состояние τ_{i3ag} (в общем случае $\tau_{i3ag}=\tau_{i3ag}(t)$ определяет задаваемые моменты вращения колёс мобильного робота во времени) и находится в этом состоянии бесконечно долго. При этом необходимо, чтобы моменты вращения управляемого движения по каждой степени свободы с требуемой точностью следовали за моментами, определяемыми эталонной моделью

$$\ddot{X}_{\mathfrak{I}Ti} + C_i \dot{X}_{\mathfrak{I}Ti} + D_i X_{\mathfrak{I}Ti} = D_i \tau_{i\mathfrak{I}\mathfrak{I}\mathfrak{I}}, \tag{25}$$

где коэффициенты C_i , D_i определялись ранее.

Заданное эталонное движение определяется из условия заданного изменения напряжения питания на зажимах обмотки якоря правого и левого ЭД

$$B_i \dot{U}_{i3a\pi} = D_i \tau_{i3a\pi}, i = 1,2.$$
 (26)

Изменение напряжения питания осуществляется с помощью ШИМ путем изменения скважности импульсов. Считается, что эталонное движение устойчиво $X_{\Im Ti} \to \tau_{i \Im a J}$ при $t \to \infty$.

Степень приближения управляемого процесса к эталонной модели $X_{\mathrm{3T}i}(t) \to au_{i\mathrm{3ag}}$ оценивается функционалом

$$G(\dot{U}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2} [\ddot{X}_{\partial Ti} - \ddot{X}_{i}(t, \dot{U}_{i})]^{2},$$
(27)

который характеризует изменение момента вращения колёс мобильного робота в окрестности изменения эталонного момента вращения.

Законы управления $\dot{U}_i(X)$ по каждой степени свободы вращения колёс определяем по схеме простого градиента

$$\frac{\partial \dot{U}_i(X)}{\partial t} = -\sum_{i=1}^2 r_{ij} \frac{\partial G(\dot{U})}{\partial \dot{U}_j}, \qquad r_{ij} = const$$
 (28)

В соответствии с формулами (24), (27) компоненты градиента в (28) равны

$$\frac{\partial G(\dot{U})}{\partial \dot{U}_j} = -b_{11}(\ddot{X}_{\mathfrak{I}J} - \ddot{X}_j), \quad j = 1,2; \tag{29}$$

Отсюда следует, что

$$\ddot{U}_i(X) = \sum_{j=1}^2 r_{ij} b_{11} (\ddot{X}_{\Im Tj} - \ddot{X}_j)$$
(30)

Интегрируя по времени обе части последнего выражения, окончательно получим требуемый закон управления (регулирования), питающего цепь якоря электродвигателей, напряжения

$$U_i = \sum_{i=1}^{2} r_{ij} b_{11} (X_{\Im Tj} - X_j), \qquad i = 1, 2;$$
(31)

где требуемые значения моментов $X_{\Im Tj}$ вычисляются по формуле (25). Структура матрицы $R = \|r_{ij}\|$ определяется характером перекрёстных связей по переменной X_j в формуле (22) или (23)

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix},$$

причём $r_{12} = r_{21}$. Принимаем $R = R^T > 0$, тогда $G(\dot{U}) < 0$ и замкнутая регулятором (31) система (22) асимптотически устойчива по Ляпунову: $\ddot{X}_{\partial T_i} \to \ddot{X}_i$ при $t \to \infty$.

- **4.** Управление движением мобильного робота по методике модального ПИДрегулирования. Для применения методики синтеза модального ПИД-регулятора [10] и построения Simulink-моделей в среде программирования Matlab необходимо привести математическую модель робота (23) к операторному виду [11, 12].
 - а) Частный случай операторной модели робота.

Пусть в исходной модели (23) выполняется условие синхронизации движения колес: $\tau_R = \tau_L$. Тогда задается угловая скорость $\omega = \omega_{3AД} = const$, а угол поворота колес вен $\varphi = \omega t$. Это условие выполняется, если в уравнениях (23) модели робота положить

$$d_{12} = a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho I_c} = 0.$$

При конструировании робота здесь возможны два подхода:

1. Используются стандартные ЭД постоянного тока. Тогда из условия синхронизации целесообразно выбрать длину оси передних ведущих колес робота

$$l = \sqrt{\frac{4K_M^2 i_{pJc}}{\rho Lm}}$$

2. Длина оси передних ведущих колес l жестко задана и требуется выбрать характеристики ЭД постоянного тока. Тогда из условия синхронизации выбираются обмоточный коэффициент и конструктивные параметры ЭД

$$K_M = K_W = \frac{l^2}{4i_{nlc}}.$$

В обоих случаях уравнения в модели (23) могут быть рассмотрены независимо ($\tau = \tau_R = \tau_L$)

$$\ddot{\tau} + a_{11}\dot{\tau} + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho_{IC}}\right)\tau = b_{11}\dot{U}$$

где $\dot{U}_{\it R} = \dot{U}_{\it L} = \dot{U}$.

Далее последнее уравнение через замену переменных приводится к нормальной форме Коши ($\tau=x_1,\,\dot{\tau}=x_2$)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C}\right)x_1 - a_{11}x_2 + b_{11}\dot{U} \end{cases}$$
(32)

или в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$
 где $x = (x_1, x_2)^{\mathrm{T}}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}) & -a_{11} \end{bmatrix}, B = (0, b_{11})^{\mathrm{T}}, \quad u = \dot{U}.$

Применим к уравнениям (32) непрерывное преобразование Лапласа:

$$A^*(p)x(p) = Bu(p),$$

где

$$A^*(p) = (Ip - A) = \begin{bmatrix} p & -1 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & p + a_{11} \end{bmatrix}$$
(33)

Решение системы алгебраических операторных уравнений определяем по формулам Крамера

$$x_{ij}(p) = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta(p)} u_j(p), \qquad i = 1, n; j = 1, m.$$

В нашем случае n=2, m=1. Поэтому система является многомерной (n=2), но односвязной (m=1). Её детерминант не равен нулю

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} p & -1 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & p + a_{11} \end{vmatrix} = p^2 + a_{11}p + a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} \neq 0$$

и поэтому система имеет единственное решение (матрица $A^*(p)$ невырожденная).

В рассматриваемом случае частные определители и передаточные функции равны:

$$\Delta_{11}(p) = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ b_{11} & p + a_{11} \end{vmatrix} = b_{11}, \ \Delta_{21}(p) = \begin{vmatrix} p & 0 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & b_{11} \end{vmatrix}$$

$$= pb_{11}$$

$$W_{11}(p) = W_{\frac{\tau}{U}}(p) = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}},$$

$$W_{21}(p) = W_{\frac{\tau}{U}}(p) = pW_{11}(p) = pW_{\frac{\tau}{U}}(p),$$

$$\dot{U} = \frac{2}{\rho m} \tau, \quad W_{\frac{\tau}{\dot{U}}}(p) = \frac{\frac{2}{\rho m} b_{11}}{p^2 + a_{11}p + a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho l_0}}$$

б) Общий случай операторной модели робота.

Аналогично частному случаю приведем матричные уравнения (24) к нормальной форме Коши через замену переменных $(x = x_1, \dot{x} = x_2)$

$$\begin{cases} \dot{x_1} = x_2, \\ \dot{x_2} = -Dx_1 - Cx_2 + bu. \end{cases}$$

В блочной форме последние формулы принимают вид

$$\dot{Y} = AY + Bu$$

где $Y = (x_1, x_2)^{\mathrm{T}} - \text{ обобщенный вектор состояния размера (4x1);}$

 $u = (\dot{U}_L \dot{U}_R)$ — вектор управления размерности 2х1;

$$A = \begin{bmatrix} O_{(2\times2)} & I_{(2\times2)} \\ -D_{(2\times2)} & -C_{(2\times2)} \end{bmatrix}$$
 — блочная матрица при векторе состояния размера 4х4; $B = \begin{bmatrix} O_{(2\times2)} \\ b_{(2\times2)} \end{bmatrix}$ — блочная матрица при векторе управления размера 4х2.

$$B = \begin{bmatrix} O_{(2 \times 2)} \\ b_{(2 \times 2)} \end{bmatrix}$$
 — блочная матрица при векторе управления размера 4x2.

Преобразуем систему дифференциальных уравнений в алгебраические уравнения, используя преобразование Лапласа

$$A^{**}(p)Y(p) = Bu(p),$$
 где $A^{**}(p) = (Ip - A) = \begin{bmatrix} I_{(2\times 2)}p & -I_{(2\times 2)} \\ D & I_{(2\times 2)}p + C \end{bmatrix}, I_{(2\times 2)} -$ единичная матрица размера 4x4.

Так как $\Delta(p) = det A^{**}(p) \neq 0$, то система является невырожденной и имеет единственное решение, определяемое через наибольший общий делитель нуля [13-14]

$$Y_{ij}(p) = \frac{\Delta_{ij}(p) \text{HOA}_{j}(p)}{\Delta(p)} u_{j}(p), i = 1, n; j = 1, m.$$

В нашем случае n=4, m=2. Поэтому робот как объект управления является многомерным и многосвязным (многоконтурным). Здесь частный определитель равен $\Delta_{ii}(p) =$ $det A_{ii}^*(p)$, а матрица $A_{ii}^*(p)$ определяется через замену в матрице $A^{**}(p)$ i- го столбца на j-ый столбец свободных членов. Общее решение при т управляющих воздействиях можно получить как суперпозицию частных решений

$$x_i(p) = \sum_{j=1}^m x_{ij}(p) = \sum_{j=1}^m \frac{\Delta_{ij}(p) \text{HOAJ}_j(p)}{\Delta(p)} u_j = \sum_{j=1}^m W_{ij}(p) u_j,$$

где $HOД_i(p)$ — наибольший общий делитель по *j*-ому входу управления. Таким образом, здесь нужно говорить об обобщенном управлении и и матричных передаточных функциях числителя и знаменателя.

Передаточные функции от управляющих воздействий к моментам правого и левого колеса определяются по формулам:

$$W_{\frac{\tau_R}{U_P}}(p) = \frac{\Delta_{11} \text{HOД}_1(p)}{\Delta(p)},$$

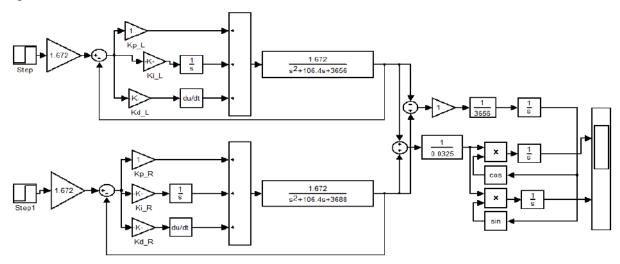
где $\Delta_{11} = b_{11}$,

$$ext{HOД}_1(p) = ext{HOД}_L(p) = p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12} = p^2 + a_{11}p + rac{l^2}{2
ho_{JC}};$$
 $W_{\overline{U}_L}(p) = rac{\Delta_{12} ext{HOД}_2(p)}{\Delta(p)},$

где $\Delta_{12} = b_{11}$,

$$\begin{split} \text{HOД}_2(p) &= \text{HOД}_R(p) = p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12} = p^2 + a_{11}p + \frac{2a_{12}}{2\rho m};\\ \Delta(p) &= \text{HOД}_1(p)\text{HOД}_2(p) = (p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12}) \times \\ \times (p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12}) &= \left(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{2K_W^2i_p}{\rho^2Lm}\right) \left(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{l^2}{2\rho J_C}\right).\\ W_{\frac{\tau_L}{U_L}}(p) &= \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12}} = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + \frac{l^2}{2\rho J_C}};\\ W_{\frac{\tau_R}{U_R}}(p) &= \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12}} = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + \frac{2K_W^2i_p}{L\rho^2m}}. \end{split}$$

На основе математической модели (23) и полученных передаточных функций была разработана Simulink-модель управляемого мобильного робота (рис. 5) с параметрами, выбранными из табл. 1.



Puc. 5. Simulink-модель автономного мобильного робота

Коэффициенты модального ПИД-регулятора выбирались по методике, изложенной в работе [15]: Kp=1, Ki=55.24, Kd=0.008 — для управления левым колесом; Kp=1, Ki=39.28, Kd=0.006 — для управленияправым колесом робота. Графики переходных процессов управляющих моментов τ_L , τ_R от времени tпредставлены на рис. 6.

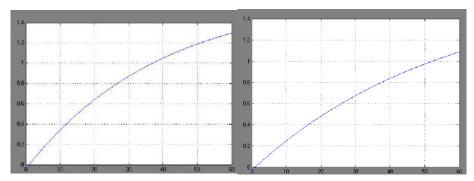


Рис. 6. Управляющие моменты колесной парой мобильного робота

Заключение. Таким образом, в работе получены следующие основные результаты: разработаны математические модели мобильного робота в пространстве состояний и в операторной форме; синтезирован алгоритм управления движением робота на основе метода обратных задач динамики: разработана Simulink-модель управляемого мобильного робота на основе методики модального ПИД- регулирования.

Список источников

- 1. Сизых В.Н. Алгоритмы управления мобильным роботом по методу обратных задач динамики / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта. Нижний Новгород, 2019. С. 139-144.
- 2. Антошкин С.Б. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики / С.Б. Антошкин, М.В. Баканов, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019. 2 (62). С. 15-23.
- 3. Ким Д.П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления / Д.П. Ким // Мехатроника, автоматизация, управление, 2011. № 1. С. 9-15.
- 4. Сизых В.Н. Модальное управление мобильным роботом при дифференциальном отклонении колесной пары / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2019. № 1 (2). С. 62-71.
- 5. Сизых В.Н. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. Материалы I международной научно-практической конференции, 2018. С. 9-18.
- 6. Данеев А.В.. К апостериорному моделированию нестационарных гиперболических систем / А.В. Данеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2018. N 1 (81). C. 106-113.
- 7. Сизых В.Н. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей / В.Н. Сизых, А.Ю. Мухопад // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2014. № 1(54). С. 34-45.
- 8. Сизых В.Н. Алгоритмы управления мобильным роботом на основе метода обратных задач динамики / В.Н. Сизых, М.В. Баканов, И.И. Белобров [и др.] // Транспортная инфраструктура Сибирского региона, 2019. Т. 1. С. 284-288.
- 9. Булгаков В.В. Сравнительный анализ формализованных методов синтеза регулятора следящей системы / В.В. Булгаков., В.С. Кулабухов // Приборы, 2013. № 1(151). С. 39-44.
- 10. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proc. IFAC Workshop. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
- 11. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers .Trans. ASME, 1942, no. 64, pp. 759-768.
- 12. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method . European Scientific Journal Edition, 2013, no. 9(15), pp. 181-190.
- 13. Ануфриев И.Е. МАТLAВ 7 / И.Е. Ануфриев., А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. С. 386-403.
- 14. Лазарев Ю.Н. Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю.Н. Лазарев. СПб.: Питер, 2005. 512 с.
- 15. Агеев А.М. Синтез оптимальных регуляторов системы управления самолетом через решение обратной задачи АКОР / А.М. Агеев, В.Н. Сизых // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2014. № 3 (56). С. 7-22.

Баканов Максим Витальевич, аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, тахітывакапоу@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Данеев Алексей Васильевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, daneev@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Сизых Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, sizykh_vn@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 681.5

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.014

Algorithmic support of an adaptive control system for an autonomous mobile robot

Maxim V. Bakanov, Aleksey V. Daneev, Victor N. Sizykh

Irkutsk State transport University, Russia, Irkutsk, daneev@mail.ru

Abstract. The article develops mathematical models of a three-wheeled mobile robot based on the apparatus of state variables and in operator form, on the basis of which the synthesis of its adaptive control system is carried out using the method of constructing modal PID controllers and the method of inverse problems of dynamics. The mathematical model allows, without hardware implementation of a mobile robot, to analyze the work of the created control system and, if necessary, make the necessary corrections. The mathematical model of a mobile robot consists of kinematic and dynamic models. The kinematic model is the simplest description of the behavior of a mobile robot and allows the study of its properties. The dynamic model is a more detailed description of the mobile robot and takes into account the force and moment effects produced by the actuators. In order to mathematically describe the mobile robot, a number of conditions are introduced, formulated as the following assumptions: 1) the mobile robot is considered under the condition that its mechanism is rigidly connected; 2) the wheels are non-deformable and are in point contact with the surface; 3) the movement of the robot is carried out without slipping; 4) the platform is considered as a solid body on which the wheel system is fixed. The paper presents the following results of the study: developed mathematical models of a mobile robot in the state space and in operator form; the robot motion control algorithm was synthesized based on the method of inverse problems of dynamics; a Simulink model of a controlled mobile robot was developed based on the modal PID control technique. The stability of the control system is ensured by introducing an external negative feedback on the angular velocity of the robot platform. The simulation results show that, compared with an accurate continuous mathematical model of robot control, the errors in coordinates, angular and linear velocities and moments are 5-7%, which allows us to draw a conclusion on the acceptability of the developed digital robot model, its accurate continuous analogue.

Keywords: autonomous mobile robot, mathematical models in the state space and in operator form, modal PID controller, method of inverse problems of dynamics

References

- Sizykh V.N., Bakanov M.V. Algoritmy upravleniya mobil'nym robotom po metodu obratnykh zadach dinamiki [Algorithms for controlling a mobile robot by the method of inverse dynamics problems]. Infrastruktura i ekspluatatsiya nazemnogo transporta [Infrastructure and operation of ground transport]. Nizhny Novgorod, 2019, pp. 139-144.
- 2. Antoshkin S.B., Bakanov M.V., Sizykh V.N. Sistema upravlenija avtonomnogo robota na osnove metoda obratnyh zadach dinamiki [Control system of an autonomous robot based on the method of inverse problems of dynamics]. Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2019, 2 (62), pp. 15-23.
- 3. Kim D.P. Algebraicheskij metod sinteza linejnyh nepreryvnyh sistem upravlenija [Algebraic method of synthesis of linear continuous control systems]. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie [Mechatronics, automation, control], 2011, no. 1, pp. 9-15.
- 4. Sizykh V.N., Bakanov M.V. Modal'noe upravlenie mobil'nym robotom pri differencial'nom otklonenii kolesnoj pary [Modal control of a mobile robot with differential deflection of a wheelset]. Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2019, no. 1 (2), pp. 62-71.
- 5. Sizykh V.N., Bakanov M.V. Matematicheskaja model' dlja adaptivnogo upravlenija trjohkoljosnym mobil'nym robotom [Mathematical model for adaptive control of a three-wheeled mobile robot]. Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. Materialy I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj kon-

- ferencii [Transport, mining and construction engineering: science and production. Materials of the I International Scientific and Practical Conference], 2018, pp. 9-18.
- 6. Daneev A.V., Rusanov V.A., Rusanov M.V., Sizykh V.N. K aposteriornomu modelirovaniju nestacionarnyh giperbolicheskih system [To a posteriori modeling of nonstationary hyperbolic systems]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 1 (81), pp. 106-113.
- 7. Sizykh V.N., Mukhopad A. Yu. Associativnyj avtomat adaptivnogo upravlenija tehnologicheskimi processami na osnove nejronnyh setej [Associative automaton of adaptive control of technological processes based on neural networks]. Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2014, no. 1(54), pp. 34-45.
- 8. Sizykh V.N., Bakanov M.V., Belobrov I.I. Algoritmy upravlenija mobil'nym robotom na osnove metoda obratnyh zadach dinamiki [Algorithms for controlling a mobile robot based on the method of inverse dynamics problems]. Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, vol. 1, pp. 284-288.
- 9. Bulgakov V.V., Kulabukhov V.S. Sravnitel'nyj analiz formalizovannyh metodov sinteza reguljatora sledjashhej sistemy [Comparative analysis of formalized synthesis methods the regulation of the tracking system]. Pribory [Devices], 2013, no. 1(151), pp. 39-44.
- 10. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proc. IFAC Workshop. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
- 11. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers. Trans. ASME, 1942, no. 64, pp. 759-768.
- 12. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method .European Scientific Jour-nal Edition, 2013, no. 9(15), pp.181-190.
- 13. Anufriev I.E., Smirnov A.B., Smirnova E.N. MATLAB 7. SPb., BHV-Petersburg, 2005, pp. 386-403.
- 14. Lazarev Yu.N. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB [Modeling of processes and systems in MATLAB]. St. Petersburg, Peter, 2005, 512 p.
- 15. Ageev A.M., Sizykh V.N. Sintez optimal'nyh reguljatorov sistemy upravlenija samoletom cherez reshenie obratnoj zadachi AKOR [Synthesis of optimal regulators of the aircraft control system through the solution of the inverse AKOR problem]. Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2014, no. 3 (56), pp. 7-22.

Bakanov Maxim Vitalievich, post-graduate student, Irkutsk State University of Railways, maximbakanov@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Daneev Aleksey Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Information Systems and Information Security", Irkutsk State University of Communications, daneev@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Sizykh Viktor Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State University of Railways, sizykh_vn@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Статья поступила в редакцию 16.04.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 04/16/2022; approved after reviewing 05/20/2022; accepted for publication 06/14/2022.

УДК 681.571

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.015

Разработка библиотеки планирования и управления движениями коллаборативного робота Kuka iiwa

Лаптев Никита Витальевич, Кравченко Андрей Александрович, Гергет Ольга Михайловна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск, nikitalaptev77@gmail.com

Аннотация. В статье представлена клиент-серверная библиотека для взаимодействия коллаборативного робота Kuka LBR ііwа (на операционной системе KUKA Sunrise.OS) с удаленным персональным компьютером (ПК). Интуитивно понятная высокоуровневая библиотека, реализована в программном пакете Matlab. Включает в себя сервер для контроллера Kuka ііwa, а также клиента на базе среды MathWorks Matlab. Набор инструментов библиотеки включает более 30 функций, охватывающих такие операции как, расчет прямой и обратной кинематики, управление роботом в декартовом пространстве и при помощи наборов изгибов осей, планирование траекторий, графическое отображение и обратная связь. Разработанное программное обеспечение (ПО) работает на удаленном компьютере, подключенном к контроллеру робота через протокол TCP/IP. В статье приведены разработанные методы и возможные примеры управления роботом из библиотеки.

Ключевые слова: Коллаборативный робот, iiwa, KUKA Sunrise.OS, Matlab

Цитирование Лаптев Н.В. Разработка библиотеки планирования и управления движениями коллаборативного робота Кика iiwa / Н.В. Лаптев, А.А. Кравченко, О.М. Гергет // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 2(26). − С. 161-168. − DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.015.

Введение. В настоящее время рынок роботов представлен множеством производителей, каждый из которых предлагает свои роботизированные решения, а также низкоуровневое ПО для управления роботом. Предлагаемое производителями роботов ПО требует знания различных языков программирования, таких как, Java, C++, Python, включая специальные функции робота, что может стать препятствием для многих разработчиков. Еще одним недостатком использования контролера робота является то, что данные и информация от робота доступны только локально в системе, во время выполнения приложений. Это делает невозможным реализацию приложений с удаленным контролем необходимых для решения задач телемедицины [1], адаптивных роботизированных ячеек [2] и дистанционного управления с применением VR/AR технологий [3]. В связи с этим в рамках работы коллектива исследователей по разработке прототипа роботизированного медицинского инструмента (для репозиции костей таза при нестабильных переломах), была реализована клиент-серверная библиотека планирования и управления движениями робота. Библиотека предназначена для взаимодействия коллаборативного робота Kuka LBR iiwa [4] на операционной системе KUKA Sunrise.OS [5] с удаленным ПК на базе программного пакета Matlab от MathWorks [6].

В робототехнике нередко используется внешний компьютер, работающий вместе с роботом-контроллером, где ПК может использоваться для выполнения вычислительно затратных операций, для обработки данных с датчиков и для реализации алгоритмов управления. В качестве ПО для разработки моделей и алгоритмов управления часто используется программный пакет МАТLAB. Этот пакет является важным инженерным инструментом, используемым для разработки высокотехнологичных приложений, и широко используется в образовании, исследованиях и промышленности. Например, в работе [7] реализовано приложение с применением библиотеки Simulink, для реализации контроллера динамической ходьбы для двуногого робота размером с человека. Приложения Кика Control Toolbox (КСТ) [8] и JOpen-ShowVar [9,10] применяются для управления роботами КUKA с 6 степенями свободы из MATLAB/Java. Однако КСТ и JOpenShowVar поддерживают только промыш-

ленный контроллер KRC [11], поэтому их нельзя использовать для управления роботами KUKA iiwa (поставляемыми с более новым контроллером Sunrise). В статье [12] представлена библиотека KUKA Sunrise Toolbox (KST). Это набор инструментов MATLAB и сервер для Sunrise.OS, который позволяет управлять роботами KUKA iiwa с внешнего компьютера. KST реализует интернет-протокол управления передачей (TCP/IP) для соединения с роботом. Он объединяет несколько функций, включая сетевые функции, функции базового планирования движений, функции управления в режиме реального времени, установки и получения параметров робота, функции общего назначения, функции физического взаимодействия. Однако данная библиотека ограничена в возможности подключения внешней автоматики и инструментов, а также не может планировать сложные траектории из множества различных перемещений. В работе [1] авторы использовали библиотеку ROS [13], для управления роботом iiwa, задачи автономного УЗИ под МРТ-наведением, а в работе [14] авторы представили KUKA-IIWA-API, интерфейс для управления iiwa с помощью ROS. Этот интерфейс обеспечивает функции сбора данных и движения «точка-точка» (РТР), но не поддерживает функцию управления в режиме реального времени.

В результате оценки представленных в открытых источниках приложений для планирования и управления коллаборативных роботов и специфики решаемых научным коллективом задач была разработана собственная библиотека удаленного управления Kuka LBR iiwa. Разработанная библиотека имеет расширенные возможности по управлению роботом в режиме планирования траектории, в том числе и смешивание различных видов движений в один пакет, более современные и быстрые способы коммуникации с роботом со стороны клиента, а также гибкость в работе с портами Ю. Библиотека также позволяет расширять свою функциональность за счет модульной архитектуры.

1. Описание используемых инструментов. KUKA iiwa — это легкий коллаборативный манипулятор с семью осями, каждая ось которого оснащена силомоментным датчиком, а также датчиком абсолютного положения. Данные с осей, а также высокая скорость обновления (с интервалами обновления до миллисекунд) позволяют роботу своевременно реагировать на внешние воздействия, что делает робота подходящим для взаимодействия с людьми без использования дополнительных средств безопасности. Робот KUKA iiwa может быть запрограммирован для решения различных задач с помощью среды KUKA Sunrise.OS. Она включает в себя операционную систему "KUKA Sunrise.OS", которая может выполнять программы, написанные на языке Java, а также контроллер "KUKA Sunrise Cabinet". Хотя язык Java является распространенным языком, для программирования робота и использования его функциональности требуется глубокое знание системы Sunrise и различных методов библиотек (API системы).

Из «коробки» робот может управляться только через программу, запущенную на контроллере, а все данные обратной связи недоступны для чтения или изменения извне системы Sunrise.OS. Несмотря на то, что удаленное управление роботом и данные обратной связи можно передавать на удаленный компьютер с помощью пакета FRI, необходимость в совместимости со вспомогательными системами и программным пакетом Matlab привела нас к разработке собственного решения.

2. Описание библиотеки. Сервер библиотеки написан на языке Java и использует Sunrise.OS API 1.7 для реализации функций библиотеки. Сервер основан на базе асинхронного однопоточного TCP-сокета, и поддерживает работу с несколькими клиентами. На стороне клиента MATLAB используются встроенные синхронные Java-сокеты, обеспечивая задержку при обмене информацией менее 1 мс и общую скорость обмена данными порядка 15 кГц. Тем не менее, для обратной совместимости и для случаев, где нужна наибольшая надежность

работы, предусмотрена возможность соединения с сервером, используя встроенные классы MATLAB, такие, как tcpclient и tcpip.

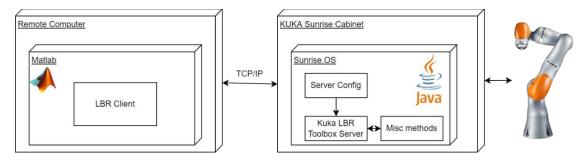


Рис. 1. Архитектура библиотеки, схема связи

Схема связи разработанной библиотеки представлена на рисунке 1, библиотека имеет 35 методов для взаимодействия с роботом. Большинство методов имеют развитую систему входных аргументов, позволяющую гибко настраивать те или иные параметры действия робота. Также библиотека имеет дополнительный класс для описания движения робота, который позволяет задать различные параметры движения, такие, как тип, скорость, ускорение, условия останова и прочее.

Методы логически разделены на 5 главных категорий:

- 1. Методы получения информации: к данной группе относятся методы обратной связи, позволяющие получать данные по положению робота, его инструмента, данные кинематики или усилий на роботе.
- 2. Методы манипулирования роботом: методы, позволяющие получать или изменять параметры робота. К ним относятся методы работы с инструментами (в частности, программное подключение инструмента, смена его фреймов, получение данных о текущем инструменте и инструментах, доступных на роботе), работа с портами ввода-вывода.
- 3. Методы управления движениями робота: к этой группе относятся команды базового контроля положения (через базовые операции перемещений, таких, как точка-точка или линейное перемещение), а также метод перемещения, принимающий на вход последовательность движений, созданную пользователем с помощью класса описания движений.
- 4. Методы сетевого контроля: к этой группе относятся группы контроля связи с роботом замеры скорости реакции контроллера на команды, метод проверки связи.
- 5. Вспомогательные методы: методы, не взаимодействующие в ходе своей работы с роботом, но предоставляющие пользователю некоторые методы для упрощения программирования под робота.

Для работы с кинематикой были написаны собственные реализации алгоритмов прямой-обратной кинематики, а также добавлена возможность вызова встроенной в Sunrise. ОЅ функции расчёта обратной кинематики. Алгоритм обратной кинематики основан на собственной реализации алгоритма обратной кинематики прямого и обратного следования.

(FABRIK) [15]. Собственная реализация нечувствительна к кинематическим сингулярностям, по сравнению со встроенной в Sunrise.OS API.

Методы движения допускают группировку различных перемещений в одну последовательность, к примеру, одновременное использование перемещений точка-точка (PTP / Point-To-Point), линейное (LIN / Linear), точка-точка в пределах одного пакета. Это позволяет строить сложные траектории и выполнять их в одно движение. Данное действие возможно за счет наследования различных типов движений от единого родительского класса в иерархии

Sunrise.OS, что позволяет впоследствии поместить собранный массив движений в один пакет движений. Подобные пакеты могут содержать до нескольких сотен движений.

В сравнении с Kuka Sunrise Toolbox, библиотека позволяет получать некоторые данные из памяти робота, такие, как данные по имеющимся в базе инструментам, их матрицам трансформации, данные по сохраненным точкам, а также данные по сохраненным в системе объектам и заготовкам. Стоит также отметить, что библиотека не привязана к портам вводавывода фланца, и может работать с различными группами IO, после указания групп в конфигурационном классе сервера.

Библиотека запускается на удаленной системе, взаимодействуя с роботом через протокол TCP\IP, используя порт X66 на контроллере робота. Система поддерживает всю линейку роботов Kuka LBR iiwa. Для работы не требуются дополнительные программные пакеты.

Так как MATLAB является кроссплатформенной средой, библиотека может работать в различных операционных системах, таких, как Windows, Linux и macOS. При этом возможен порт библиотеки в свободную среду GNU Octave или реализация клиентов в других языках и средах программирования.

Исходный код сервера, клиента, а также примеры работы с библиотекой доступны для скачивания на GitHub-странице пакета [16].

3. Примеры использования библиотеки. В качестве примера работы со встроенными функциями прямой-обратной кинематики предлагается рассмотреть код (листинг 1). В примере продемонстрирован расчёт обратной кинематики для робота, в целях описания окружности, после расчета координат робот двигается по полученной траектории, используя набор конфигураций.

Листинг 1. Пример кода

```
% Подключение к роботу
lbr = iiwa("ip", "172.31.1.147");
% Центр окружности в координатах 700, 200, 600 мм
o = [700; 200; 600];
% Фланец робота направлен по оси Х перпендикулярно плоскости YZ
orient = deg2rad([0;90;0]);
ang=[];
plt = figure; hold on; axis equal
for i = 1:100
    T = o + [0; 100*sin(2*pi/batchSize*i); 150*cos(2*pi/batchSize*i)];
    % Отображаем целевую координату
    lbr.drawPosition(plt.CurrentAxes, T, "data", "coords", "symbol", 'o');
    % Расчёт обратной кинематики с использованием встроенного алгоритма
    % относительно фланца
    [angles, status] = lbr.getInverseKinematics(T', orient', ...
        "useLocalSolver", true, "toolRelated", false);
    % Если решения существуют - записываем конфигурацию и проверяем её
    % прямой кинематикой
    if status == 0
        res = lbr.getForwardKinematics(angles(1,:), "toolRelated",false, ...
            "useLocalSolver",true);
        % Отображаем координату, полученную через прямую кинематику
        lbr.drawPosition(plt.CurrentAxes, res.Flange, "data", "transMatrix", 'sym-
bol', '+');
        ang(end+1,:)=angles(1,:);
    end
end
% Отображаем конфигурацию робота в последней точке
lbr.drawPosition(plt.CurrentAxes, ang(end,:), "data", "angles", ...
```

```
'symbol', '+', 'drawRobotPose', true);
% Совершаем пакетное движение, в качестве траектории - набор конфигураций
% робота, полученных ранее
[status, msg] = lbr.splineJP(ang);
```

На рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** продемонстрирована описываемая роботом траектория, а также конфигурация расположения осей робота, которую он примет в конце движения.

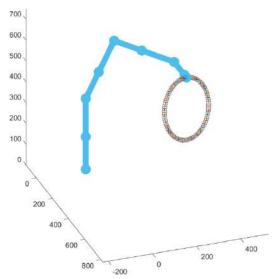


Рис. 2. Визуализация траектории движения и конфигурации робота

Прямая-обратная кинематика может быть использована для предварительного расчёта траектории движения, или создания своей собственной траектории, которую робот выполнит через сглаженное движение по набору конфигураций осей (SplineJP). Эти методы могут быть применимы для расчёта траекторий, обхода коллизий на этапе планирования движений, предварительного расчёта конфигураций робота и для оценки области движения робота.

Ниже приведён пример программного кода, представляющий возможность работы со смешанным типом движений (листинг 2). Пример демонстрирует подключение инструмента, хранящегося в памяти робота, с последующим перемещением по трем точкам, сохраненным в контроллере, в режиме сплайн – линейное перемещение – сплайн.

Листинг 2. Пример кода

```
% Подключение к роботу
lbr = iiwa("ip", "172.31.1.147");
% Получаем список доступных инструментов из системы и подсоединяем первый
tools = lbr.getToolsAvailable();
lbr.toolAttach(tools(1));
% Получаем список сохраненных точек
points = lbr.getPoints();
% Создаем 3 движения из 3 точек, устанавливаем ограничение по скорости робота
point1 = motion("spl", points(1).coord, points(1).orient);
point1.setCartVel(0.2);
point2 = motion("lin", points(2).coord, points(2).orient);
point2.setCartVel(0.5);
point3 = motion("spl", points(3).coord, points(3).orient);
point3.setCartVel(0.1);
% Совершаем движение в режиме Spline по трем созданным движениям
[status, msg] = lbr.complexMove("spline",[point1 point2 point3]);
% Отсоединяем инструмент
lbr.toolDeattach();
```

При подсоединении инструмента робот передает клиенту координаты и другие параметры по отношению к инструменту, если в методе явно не задано обратное. При создании смешанных типов движений на пакет накладываются ограничения в соответствии с ограничениями Sunrise.OS API. В примере, в режиме сглаживания движений (Spline) невозможно создать движение вида Точка-Точка, а в режиме SplineJP создать траекторию из точек в декартовом пространстве: для этого необходимо задание углов поворота осей.

Таким образом были продемонстрированы примеры взаимодействия с основными функциями библиотеки.

Заключение. В статье представлен набор инструментов MATLAB для общего управления роботом. Обсуждаются основные компоненты и рабочий процесс библиотеки планирования и управления перемещением коллаборативного робота. Представлены примеры, демонстрирующие работу платформы.

Данная библиотека разработана в рамках работы по прототипу роботизированного медицинского инструмента для репозиции костей таза при нестабильных переломах. Библиотека позволяет выполнить полный спектр задач, связанных с манипулированием роботом и его перемещением. Использование библиотеки позволяет писать основной код алгоритмов в среде MATLAB, что упрощает работу для коллектива. За счет расширенных возможностей по работе с IO-группами и движениями была достигнута требуемая гибкость применения системы.

В рамках развития библиотеки планируется добавление режима управления роботом в реальном времени, а также расширение возможностей по тонкой настройке движений робота.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90055 «Аспиранты» и государственного задания «Наука» №FFSWW-2020-0014.

Список источников

- 1. Hennersperger C. et al. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study, IEEE Trans. Med. Imaging, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 538–548.
- 2. Obal P., Gierlak P. EGM Toolbox—Interface for Controlling ABB Robots in Simulink. Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, vol. 21, no. 22, pp. 7463.
- 3. Ostanin M., Yagfarov R., Klimchik A. Interactive Robots Control Using Mixed Reality. IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, no. 13, pp. 695–700.
- 4. LBR iiwa | KUKA in Malaysia. available at: https://www.kuka.com/en-my/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa (accessed: 19.04.2022).
- 5. KUKA Sunrise.OS | KUKA. available at: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/system-software/sunriseos (accessed: 04.05.2022).
- 6. De Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments. Journal of Intelligent & Robotic Systems, Theory Appl, 2012, vol. 65, no. 1–4, pp. 247–264.
- 7. Hubicki C. et al. Walking and running with passive compliance: Lessons from engineering: A live demonstration of the atrias biped. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 23–39.
- 8. Chinello F. et al. Kuka control toolbox. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 69-
- 9. Sanfilippo F. et al. JOpenShowVar: an open-source cross-platform communication interface to kuka robots. 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2014, pp. 1154–1159.
- 10. Sanfilippo F. et al. Controlling Kuka industrial robots: Flexible communication interface JOpenShowVar. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 96–109.
- 11. KUKA KR C4 | KUKA AG. available at: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/robot-controllers/kr-c4 (accessed: 04.05.2022).
- 12. Safeea M., Neto P. Kuka sunrise toolbox: Interfacing collaborative robots with matlab. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 91–96.
- 13. ROS: Home. available at: https://www.ros.org/ (accessed: 04.05.2022).

- 14. Mokaram S. et al. A ROS-integrated API for the KUKA LBR iiwa collaborative robot. IFAC-PapersOnLine. Elsevier, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 15859–15864.
- 15. Kolpashchikov D. et al. FABRIK-Based Inverse Kinematics For Multi-Section Continuum Robots. Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics, 2018
- 16. GitHub small23/Kuka_LBR_Toolbox. available at: https://github.com/small23/ Kuka_LBR_Toolbox (accessed: 04.05.2022).

Лаптев Никита Витальевич, 1995г. рождения, аспирант ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Инженер лаборатории НОЛ ОАБД ИШИТР, AuthorID: 1084295, SPIN-код: 2735-2600, ORCID: 0000-0003-0709-9974, nikitalaptev77@gmail.com.

Кравченко Андрей Александрович, 1998г. рождения, магистрант ФГАОУ ВО НИ ТПУ, AuthorID: 1091199, SPIN-код: 9114-4226, ORCID: 0000-0001-6828-3279, aak224@tpu.ru.

Гергет Ольга Михайловна, 1974г. рождения, д.т.н., профессор ФГАОУ ВО НИ ТПУ, профессор отделения информационных технологий, AuthorID: 115286, SPIN-код: 9352-4215, ORCID: 0000-0002-6242-9502, olgagerget@mail.ru.

UDC 681.571

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.015

Development of a library for planning and controlling the movements of the collaborative robot Kuka iiwa

Nikita V. Laptev, Andrey A. Kravchenko, Olga M. Gerget

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, nikitalaptev77@gmail.com

Abstract. The article presents a client-server library for the interaction of the Kuka LBR iiwa collaborative robot (on the KUKA Sunrise.OS operating system) with a remote PC. An intuitive high-level library implemented in the Matlab software package. Includes a server for the Kuka iiwa controller, as well as a client based on the MathWorks Matlab environment. The library's tool set includes more than 30 functions covering such operations as calculating forward and inverse kinematics, controlling the robot in Cartesian space and using sets of axis bends, path planning, graphical display and feedback. The developed software runs on a remote computer connected to the robot controller via the TCP/IP protocol. The article presents the developed methods and possible examples of robot control from the library.

Keywords: Collaborative robot, iiwa, KUKA Sunrise.OS, Matlab

Acknowledgement: The study has been funded with support from the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 20-37-90055 and Russian Federation Governmental Program 'Nauka' no. FFSWW-2020-0014.

References

- 1. Hennersperger C. et al. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study, IEEE Trans. Med. Imaging, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 538–548.
- 2. Obal P., Gierlak P. EGM Toolbox—Interface for Controlling ABB Robots in Simulink. Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, vol. 21, no. 22, pp. 7463.
- 3. Ostanin M., Yagfarov R., Klimchik A. Interactive Robots Control Using Mixed Reality. IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, no. 13, pp. 695–700.
- 4. LBR iiwa | KUKA in Malaysia. available at: https://www.kuka.com/en-my/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa (accessed: 19.04.2022).
- 5. KUKA Sunrise.OS | KUKA. available at: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/system-software/sunriseos (accessed: 04.05.2022).
- 6. De Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments. Journal of Intelligent & Robotic Systems, Theory Appl, 2012, vol. 65, no. 1–4, pp. 247–264.
- 7. Hubicki C. et al. Walking and running with passive compliance: Lessons from engineering: A live demonstration of the atrias biped. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 23–39.
- 8. Chinello F. et al. Kuka control toolbox. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 69–79.

- 9. Sanfilippo F. et al. JOpenShowVar: an open-source cross-platform communication interface to kuka robots. 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2014, pp. 1154–1159.
- 10. Sanfilippo F. et al. Controlling Kuka industrial robots: Flexible communication interface JOpenShowVar. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, vol. 22, № 4. P. 96–109.
- 11. KUKA KR C4 | KUKA AG. available at: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/robot-controllers/kr-c4 (accessed: 04.05.2022).
- 12. Safeea M., Neto P. Kuka sunrise toolbox: Interfacing collaborative robots with matlab. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 91–96.
- 13. ROS: Home. available at: https://www.ros.org/ (accessed: 04.05.2022).
- 14. Mokaram S. et al. A ROS-integrated API for the KUKA LBR iiwa collaborative robot. IFAC-PapersOnLine. Elsevier, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 15859–15864.
- 15. Kolpashchikov D. et al. FABRIK-Based Inverse Kinematics For Multi-Section Continuum Robots. Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics, 2018
- 16. GitHub small23/Kuka_LBR_Toolbox. available at: https://github.com/small23/ Kuka_LBR_Toolbox (accessed: 04.05.2022).
- Nikita V. Laptev, born in 1995, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineer of Research Laboratory for Processing and Analysis of Big Data, AuthorID: 1084295, SPIN-code: 2735-2600, ORCID: 0000-0003-0709-9974, nikitalaptev77@gmail.com
- Andrey A. Kravchenko, born in 1998, undergraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, Student of Division for Information Technology, AuthorID: 1091199, SPINcode: 9114-4226, ORCID: 0000-0001-6828-3279, aak224@tpu.ru.
- Olga M. Gerget, born in 1974, professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Professor of Division for Information Technology, AuthorID: 115286, SPIN-code: 9352-4215, OR-CID: 0000-0002-6242-9502, olgagerget@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 08.05.2022; одобрена после рецензирования 06.06.2022; принята к публикации 10.06.2022.

The article was submitted 05/08/2022; approved after reviewing 06/06/2022; accepted for publication 06/10/2022.

