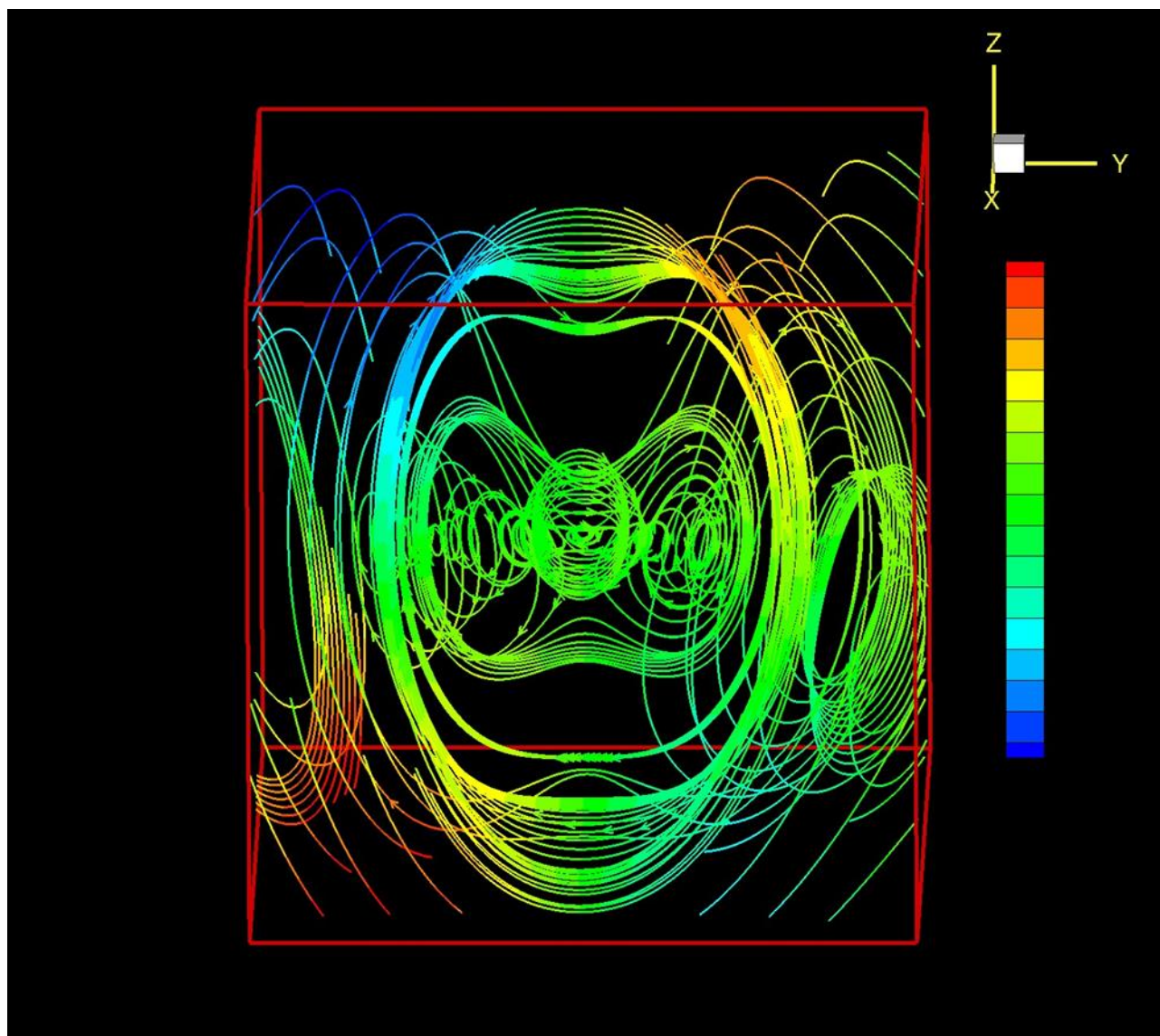




ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 22, № 2

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Сургут
2023**

Учредитель и издатель

Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор

Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора

Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь

Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:

Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

Хасанова А. Ш.

Редактор

Манаева Л. И.

Верстка

Мельниковой Е. А.

Переводчик

Петрова А. В.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».
С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Dreys Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Khasanova A. Sh.

Editor

Manaeva L. I.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Petrova A. V.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;
2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate El No. FS77-83015 dated on 31.03.2022.
Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenina pr., 1
Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Алексеев М. М., Семенов О. Ю.

Применение системы компьютерного зрения для экспериментального изучения движения фронта пламени	6
---	---

Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В., Буслаев А. Б.

Применение программируемых логических интегральных схем в системах многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации	13
---	----

Дубанов А. А.

Модель согласованного группового преследования с распределением по целям	21
--	----

Кузин Д. А., Безуевская В. А.

Информационная система мониторинга региональных проектов	30
--	----

Попов Ю. Б., Давыдюк Г. П., Попова К. Ю., Белагина А. А.

Контроль параметров состояния катодной защиты магистральных трубопроводов с использованием беспроводного доступа	37
--	----

Саввин Н. Ю., Гарбузов Д. Д.

Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией	46
--	----

Сысоев С. М., Петров Е. А., Джариев И. Э.

Исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения	59
--	----

Швец Е. С.

Анализ результатов исследований методом кривой падения давления после гидро-разрыва пласта	68
--	----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Елисеев А. В., Кузнецов Н. К.

Развитие рычажных представлений в оценке динамических состояний механических колебательных систем в условиях связанных вибрационных нагрузений	75
--	----

Назин А. Г.

Модифицированный алгоритм минимизации дизъюнктивной нормальной формы	87
--	----

**Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Грибкова Ю. В., Сарычева И. А.,
Голицына Е. В., Шушкова К. А.**

Математическое моделирование сушки плотного слоя кусков угля, продуваемогоходящими газами котлоагрегатов	92
--	----

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Alekseev M. M., Semenov O. Yu.</i>	
Applying a computer vision system for studying flame front propagation in an experiment ...	6
<i>Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V., Buslaev A. B.</i>	
Applying field programmable gate arrays in systems of multichannel digital processing of satellite navigation signals	13
<i>Dubanov A. A.</i>	
A model of cooperated group pursuit with distribution by targets	21
<i>Kuzin D. A., Bezuevskaya V. A.</i>	
Information system for regional drafts monitoring	30
<i>Popov Yu. B., Davydyuk G. P., Popova K. Yu., Belagina A. A.</i>	
Wireless monitoring of parameters of cathode protection for gas transmission pipelines	37
<i>Savvin N. Yu., Garbuzov D. D.</i>	
Mathematical simulation of frequency converter with space vector pulse width modulation ...	46
<i>Sysoev S. M., Petrov E. A., Dzhariev I. E.</i>	
Studying the gas hydrate dissociation model in a reservoir under the action of microwave radiation	59
<i>Shvets E. S.</i>	
Analyzing results of the well testing using pressure draw-down curve method after hydraulic fracturing	68

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Eliseev A. V., Kuznetsov N. K.</i>	
Developing a level concept in assessment of the dynamic state of mechanical oscillatory systems subjected to connected vibrational loadings	75
<i>Nazin A. G.</i>	
A modified algorithm for minimizing the disjunctive normal form	87
<i>Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Gribkova Yu. V., Sarycheva I. A., Golitsyna E. V., Shushkova K. A.</i>	
Mathematical modeling of drying dense coal layer ventilated by boiler units' exhaust gases ...	92

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 004.93+520.33+536.46
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

Максим Михайлович Алексеев¹, Олег Юрьевич Семенов²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Аннотация. В работе описан метод обработки видеозаписей распространения фронта пламени в узких каналах с помощью библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Результаты автоматизированной обработки использованы для получения новых сведений об устойчивости и топологии пламени в плоском канале типа Хеле-Шоу. Получена зависимость видимой скорости от ширины зазора канала, свидетельствующая об увеличении скорости распространения пламени при увеличении зазора вследствие меньшего влияния вязкости и теплопотерь.

Ключевые слова: горение, компьютерное зрение, фотографирование, визуализация, канал Хеле-Шоу, ячеистые пламена, OpenCV, экспериментальная установка

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Применение системы компьютерного зрения для экспериментального изучения движения фронта пламени // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 6–12. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12.

Original article

APPLYING A COMPUTER VISION SYSTEM FOR STUDYING FLAME FRONT PROPAGATION IN AN EXPERIMENT

Maksim M. Alekseev¹, Oleg Yu. Semenov²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Abstract. The article describes a method for processing of video recordings of flame front propagation in narrow channels using a computer vision library based on the open source code OpenCV. Using the results of machine processing, new data on flame sustainability and topology in a two-dimensional Hele-Shaw channel were obtained. The dependence of apparent speed on the channel gap width demonstrates that the wider the gap, the faster the flame propagation growth due to reduced influence of viscosity and heat loss.

Keywords: combustion, computer vision, photoshooting, visualization, Hele-Shaw channel, cellular flame, OpenCV, test setup

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Applying a computer vision system for studying flame front propagation in an experiment. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):6–12. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12.

ВВЕДЕНИЕ

Программные средства обработки цифровых изображений позволяют использовать

новые возможности исследования процесса распространения фронта пламени. К таким возможностям относятся, например, обработ-

ка распределений интегральной энергетической светимости, высокоскоростная съемка фиксации формы и получение мгновенных положений фронта пламени.

Распространение пламени в каналах и камерах сгорания различной геометрии привлекало внимание многих исследователей. Одним из способов, который упрощает изучение распространения предварительно перемешанного пламени, заключается в использовании ячейки Хеле-Шоу в качестве камеры сгорания. Ячейка Хеле-Шоу представляет собой две параллельные пластины, разделенные малым зазором. Подобные ячейки используются для аналогового моделирования фильтрационных течений в пористых средах. Двумерная геометрия канала Хеле-Шоу приводит к формированию квазидвумерного фронта пламени, что позволяет регистрировать и визуализировать его эволюции более подробно, чем в полных трехмерных конфигурациях. Теория ячеистого распространения пламени в двумерном канале была развита в работах [1, 2], где анализировалось влияние потерь тепла и импульса на неустойчивость и скорость пламени, изучение влияния числа Льюиса проводилось в работах [3–7].

В дополнение к изучению общей динамики пламени и развития неустойчивости были также проведены эксперименты с ячейкой Хеле-Шоу для анализа колебательного пове-

дения пламени [8] и взаимодействия виброакустических волн с пламенем [9]. Воспламенение газовой смеси в разных точках канала способствует изменению импульса и теплоотдачи, приводящее к значительным возмущениям поля течения, растяжению, деформации или разделению на ячейки фронта пламени, увеличивающие площадь его поверхности [10]. При исследовании пламени также необходимо учитывать его собственные неустойчивости различных типов (Дарье – Ландау, диффузионно-тепловые и др.) [11–14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для изучения движения фронта пламени в узком зазоре между параллельными пластинами и эволюции его ячеистой структуры, формирующейся вследствие развития различных неустойчивостей. Стенки канала образованы двумя параллельными прозрачными стеклянными дисками диаметром 60 см. В центре нижнего диска находилось отверстие, предназначенное для установки системы подачи газовой смеси и электродов ее воспламенения. Ширина зазора между дисками менялась в экспериментах в диапазоне от 2,0 до 4,4 мм. Расстояние между дисками выставлялось с точностью до 0,001 мм с помощью калиброванных шайб, помещенных между дисками на их краях.

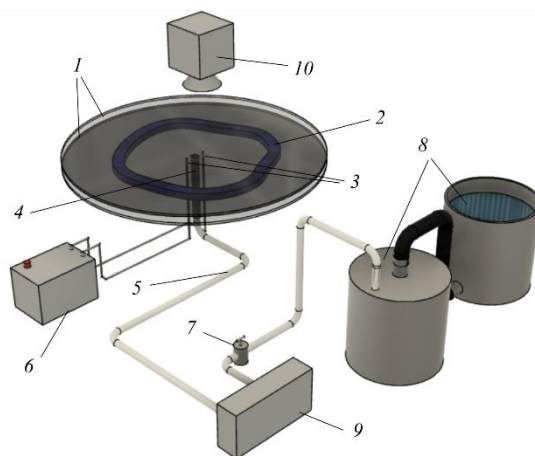


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – прозрачные диски, 2 – фронт пламени, 3 – искровые электроды,
4 – входное сопло с пламегасителем, 5 – шланг подачи смеси, 6 – искровой разрядник, 7 – вентиль,
8 – газометр вытеснения, 9 – расходомер-счетчик газа, 10 – видеокамера

Примечание: составлено авторами.

Эксперименты проводились со стехиометрическими и богатыми топливными смесями пропана-воздуха (коэффициент избытка горючего находился в диапазоне $\varphi = 1,00\text{--}1,25$). Горючая смесь необходимой концентрации готовилась в газометре вытеснения. Пространство между параллельными пластинами заполнялось смесью через шланг, прикрепленный к центральному отверстию, который оборудован пористым пламегасителем. Для измерения объема подаваемого газа между пластинами применялся расходомер газа РГС-2 с относительной точностью 2 %.

Для получения детальной картины формирования и движения фронта пламени в плоском канале фото- и видеокамеры размещались непосредственно над прозрачной пластиной. Все эксперименты проводились в темном помещении без фонового света. Движение фронта пламени регистрировалось видеокамерой Xiaomi Yi. Видеокамера оснащена 16-мегапиксельным $6,17 \times 4,55$ мм CMOS-датчиком изображения, который позволяет снимать видео с частотой 120 кадров в секунду с разрешением $1\,280 \times 720$ точек. Видеокамера устанавливалась на высоте 455 мм над дисками. Дополнительно над дисками устанавливалась фотокамера Canon EOS 30D на высоте 840 мм. Фотоаппарат Canon EOS 30D имеет $22,5 \times 15,0$ мм CMOS-датчик с эффективным разрешением 8,2 мегапикселя. Фотокамера использовалась в двух режимах – с краткосрочной экспозицией ($1/500$ с), чтобы производить фотосъемку

мгновенного положения и формы фронта пламени, и в режиме с длительной выдержкой, что позволяло получить след на изображении от движения фронта пламени в течение времени, при котором открыт затвор камеры. Последний режим позволил проследить эволюцию ячеистой структуры пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Горизонтальная ячейка Хеле-Шоу, образованная двумя стеклянными дисками, позволяла получать цилиндрические пламена, инициированные искровым зажиганием. С помощью методики визуализации, основанной на методе прямого фотографирования с длительной выдержкой, были зафиксированы не только мгновенная форма фронта пламени, но и траектории движения узловых точек, разделяющих соседние ячейки фронта пламени. Из фотографий, полученных этим способом, можно увидеть, что средний горизонтальный размер ячейки возмущения, развивающейся в пламени стехиометрической смеси, примерно в 10 раз превышает ширину зазора между пластинами. Обращает на себя внимание тот факт, что при центральном зажигании смеси ячеистый фронт пламени сохраняет симметрию. Типичное изображение с камеры Canon EOS 30D, иллюстрирующее применение этого метода и эволюцию роста и гибели возмущений на поверхности фронта, показано на рис. 2.

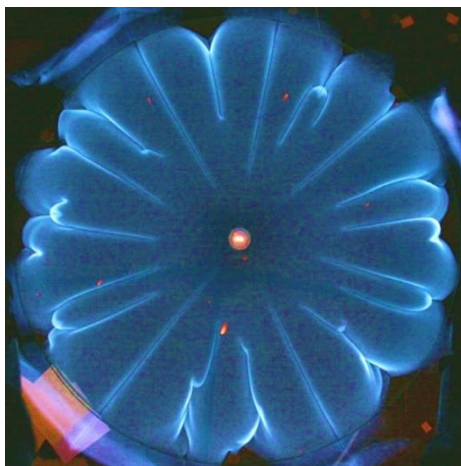


Рис. 2. Фотографирование газозвушного пламени с длительной выдержкой
(расстояние между дисками 4,5 мм)

Примечание: фото авторов.

Яркие линии на фотографии, расходящиеся от центра дисков, являются траекториями движения границ между ячейками на поверхности фронта. Раздвоение (бифуркация) линий или их смыкание свидетельствуют о факте рождения или гибели возмущений. По траекториям движения складок между ячейками видно, что процесс роста-гибели

возмущений является непрерывным – гибель возмущений происходит по всей плоскости канала, что обусловлено смещением возмущений к стенкам канала из-за кривизны фронта пламени. В то же время рост новых возмущений связан, очевидно, с появлением участков, в которых происходит локальное повышение температуры (рис. 3).

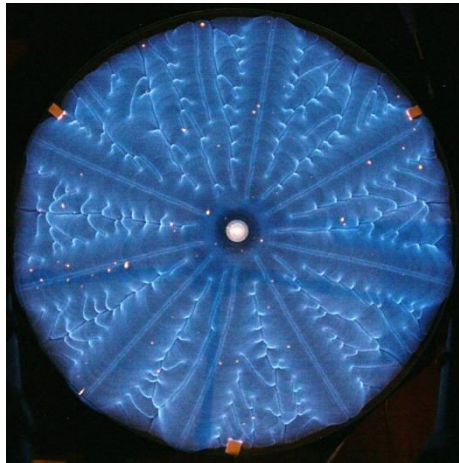


Рис. 3. Фотография фронта пламени между дисками на расстоянии 3 мм между ними, полученная при длительной экспозиции

Примечание: фото авторов.

Для получения количественных характеристик движения фронта пламени и эволюции возмущений на нем каждая из видеозаписей с камеры Xiaomi Yi для разных величин зазора между дисками преобразовывалась в набор кадров и обрабатывалась с использованием алгоритмов библиотеки OpenCV [15]. Цель такой обработки – получение координат точек фронта пламени в виде функции в полярных координатах $r = f(\varphi)$, где r – это расстояния до точек фронта пламени от точки зажигания (начала координат), а φ – полярный угол, отсчитываемый от нулевого луча (горизонтальная линия на фотографиях, проходящая через точку зажигания). Фронт пламени, представленный в виде массива координат его точек, позволяет в дальнейшем проводить автоматизированную обработку его параметров.

Видеокадры, полученные в условиях низкой освещенности, подвержены высоким уровням «шума», поэтому изображения предварительно «размывались» с помощью билатерального фильтра (bilateral filter), который довольно эффективен в удалении шумов.

При этом еще и позволяет сохранить четкие границы объектов на фотографиях. Фотографии из цветового пространства RGB преобразовывались в цветовое пространство в градациях серого с последующим применением фильтра по порогу интенсивности (threshold by intensity filter). Результатом этого шага является черно-белое изображение, на котором каждому пикселю фронта пламени присваивается значение, соответствующее белому цвету, а пикселю фона – черному цвету. Пороговое значение для этого фильтра подбиралось вручную для данной серии экспериментов (для серии, из которой был взят кадр, представленный на рис. 4, пороговое значение равно 30). Эти два шага позволяют удалить любой фоновый шум и посторонние объекты на изображениях и оставить только фронт пламени. После удаления шума и фона производилось определение координат внешнего контура фронта пламени с помощью функции findContours() библиотеки OpenCV. Пример кадра с изображением фронта пламени и результат его обработки приведен на рис. 4.

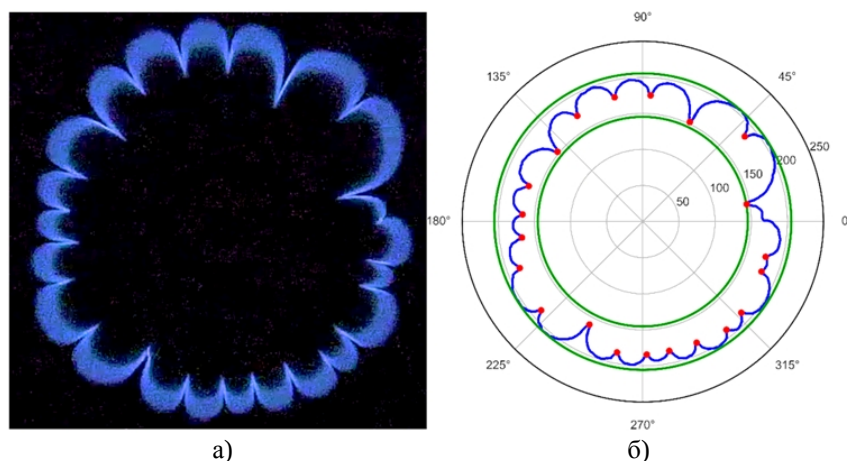


Рис. 4. Видеокادر фронта пламени, распространяющегося в зазоре (а), и рисунок обработанного внешнего края фронта пламени, край представлен кривой в полярных координатах (б)
Примечание: фото авторов.

Величины амплитуд (радиальные размеры) возмущений были получены как разность радиусов наименьшей описанной и наибольшей вписанной окружностей фронта пламени. На рис. 4б представлена в полярных координатах функция $r = f(\varphi)$, соответствующая точкам фронта пламени, вписанная и описанная окружности. Радиус самой большой вписанной окружности для каждого фронта пламени был получен в качестве абсолютного минимума функции $r = f(\varphi)$, задающей форму фронта пламени. Радиус наименьшей окружности, в которую помещается фронт пламени, определен с помощью функции `minEnclosingCircle()`, примененной к массиву координат, соответствующих внешнему контуру фронта пламени.

Размеры возмущений в тангенциальном направлении к фронту пламени получены путем нахождения координат узловых точек или «складок» на фронте пламени. Такие «складки» на поверхности пламени также соответствуют локальным минимумам функции $r = f(\varphi)$. Красными точками на рис. 4 показаны определенные таким образом положения узловых точек и одновременно минимумов функции $r = f(\varphi)$.

График зависимости видимой скорости распространения пламени от расстояния между дисками показан на рис. 5. Средние скорости фронта пламени при различных зазорах найдены методом наименьших квадратов как коэффициенты наклона прямых, аппроксимирующих зависимости радиуса фронта пламени

от времени, после автоматизированной обработки видеозаписей указанным выше способом. За радиус фронта пламени была взята наименьшая описанная вокруг фронта окружность (рис. 4). Автоматизированная обработка множества видеозаписей позволила получить детальную зависимость скорости фронта пламени от величины зазора канала. Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод, что скорость пламени с увеличением зазора растет нелинейно и резко увеличивается, когда ширина зазора начинает превышать 4 мм. На графике (рис. 5) погрешности, указанные для точек скоростей распространения, соответствуют среднеквадратичной ошибке.

Для оценки повторяемости результатов проведена дополнительная серия экспериментов. В этой серии тесты повторялись с той же концентрацией и шириной промежутка, но результаты обрабатывались вручную путем нахождения вписанных и описанных окружностей фронта пламени на десяти выбранных точках, затем скорость пламени была найдена с помощью линейной регрессии. Полученные результаты показаны на рис. 5 крестиками. Видно, что для ширины зазора 2:4–3:3 мм повторяемость очень хорошая (в пределах 1 %), при дальнейшем увеличении ширины зазора до 3,6 мм разница увеличивается примерно до 10 %, а для более широких зазоров (более 3,8 мм) повторяемость ухудшается, для самого широкого зазора 4,4 мм результаты снова довольно хорошо совпадают.

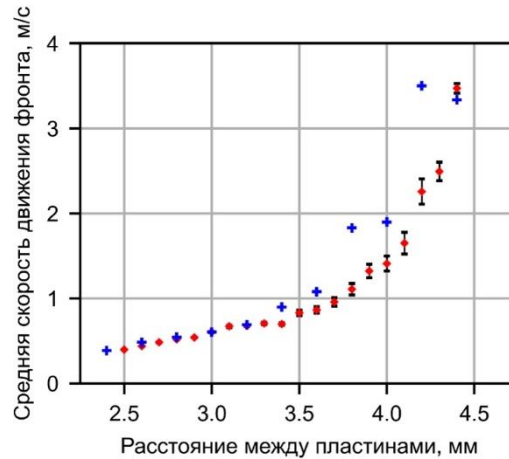


Рис. 5. График зависимости скорости пламени от расстояния между дисками

Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты автоматизированной обработки изображений фронта пламени в узком плоском канале Хеле-Шоу с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Автоматизация измерений позволила обработать большое количество видеозаписей и кадров фронта пламени при его распространении в узком канале. Совместное использование метода моментальной фотосъемки и метода длительной экспозиции позволяет выявить законо-

мерности эволюции возмущений на поверхности фронта пламени.

Показано, что особенностью распространения фронта пламени в узком канале является формирование ячеистой структуры пламени, которая наблюдается при горении смесей как с избытком, так и с недостатком воздуха. С помощью методов компьютерного зрения определены детальные зависимости амплитуды, тангенциальные размеры возмущений, скорости распространения расходящегося пламени в узком канале от его ширины.

Список источников

1. Joulin G., Sivashinsky G. I. Influence of momentum and heat losses on the large-scale stability of quasi-2D premixed flames. *Combust Sci Technol.* 1994;98:11–23.
2. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies.* 2023;16(3):1516.
3. Wongwiwat J., Gross J., Ronney P. D. Flame propagation in narrow channels at varying Lewis number. In: *Proceedings of the 25th ICDERS*, Leeds, UK, August 2–7, 2015. p. 3–8.
4. Almarcha C., Radisson B., Al Sarraf E. et al. Interface dynamics, pole trajectories, and cell size statistics. *Phys Rev E.* 2018;98:030202.
5. Tayyab M., Radisson B., Almarcha C. et al. Experimental and numerical Lattice-Boltzmann investigation of the Darrieus – Landau instability. *Combust Flame.* 2020;221:103–109.
6. Alexeev M. M., Semenov O. Y., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combust Sci Technol.* 2018;191(7):1256–1275.

References

1. Joulin G., Sivashinsky G. I. Influence of momentum and heat losses on the large-scale stability of quasi-2D premixed flames. *Combust Sci Technol.* 1994;98:11–23.
2. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies.* 2023;16(3):1516.
3. Wongwiwat J., Gross J., Ronney P. D. Flame propagation in narrow channels at varying Lewis number. In: *Proceedings of the 25th ICDERS*, Leeds, UK, August 2–7, 2015. p. 3–8.
4. Almarcha C., Radisson B., Al Sarraf E. et al. Interface dynamics, pole trajectories, and cell size statistics. *Phys Rev E.* 2018;98:030202.
5. Tayyab M., Radisson B., Almarcha C. et al. Experimental and numerical Lattice-Boltzmann investigation of the Darrieus – Landau instability. *Combust Flame.* 2020;221:103–109.
6. Alexeev M. M., Semenov O. Y., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combust Sci Technol.* 2018;191(7):1256–1275.

7. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps. *Proc Combust Inst.* 2019;37(2):1861–1868.
8. Veiga-López F., Martínez-Ruiz D., Fernández-Tarrazo E. et al. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end. *Combust Flame.* 2019;201:1–11.
9. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys Rep.* 2000;325(4–5):115–237.
10. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu Rev Fluid Mech.* 2007;39:163–191.
11. Zeldovich Y. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B. et al. The mathematical theory of combustion and explosions. New York: Springer; 1985. 619 p.
12. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of vibro-acoustic waves with premixed flame. *Phys Rev Fluids.* 2019;4(12):121201.
13. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V. N., Ronney P. D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates. *Combust Flame.* 2018;190:133–145.
14. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters.* 2012;38(11):1010–1012.
15. Suarez O. D., Garcia G. B., Aranda J. L. E. et al. Learning image processing with OpenCV. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2015. p. 232.
7. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps. *Proc Combust Inst.* 2019;37(2):1861–1868.
8. Veiga-López F., Martínez-Ruiz D., Fernández-Tarrazo E. et al. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end. *Combust Flame.* 2019;201:1–11.
9. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys Rep.* 2000;325(4–5):115–237.
10. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu Rev Fluid Mech.* 2007;39:163–191.
11. Zeldovich Y. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B. et al. The mathematical theory of combustion and explosions. New York: Springer; 1985. 619 p.
12. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of vibro-acoustic waves with premixed flame. *Phys Rev Fluids.* 2019;4(12):121201.
13. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V. N., Ronney P. D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates. *Combust Flame.* 2018;190:133–145.
14. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters.* 2012;38(11):1010–1012.
15. Suarez O. D., Garcia G. B., Aranda J. L. E. et al. Learning image processing with OpenCV. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2015. p. 232.

Информация об авторах

М. М. Алексеев – кандидат физико-математических наук, доцент.

О. Ю. Семенов – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

M. M. Alekseev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

O. Yu. Semenov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья
УДК 621.396.946
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В СИСТЕМАХ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Андрей Вячеславович Богословский¹, Сергей Николаевич Разиньков²,
Элеонора Викторовна Сёмка^{3✉}, Алексей Борисович Буслаев⁴

^{1, 2, 3, 4} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Минобороны России, Воронеж, Россия

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

⁴ bus-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1777-4921>

Аннотация. Проведен анализ систем многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации для беспилотных летательных аппаратов. Показано, что для повышения помехоустойчивости навигационного оборудования на основе адаптивного изменения параметров настроек целесообразно применять программируемые логические интегральные схемы для реализации вариативных алгоритмов обработки сигналов без реконфигурации структуры оборудования при изменениях радиоэлектронной обстановки.

Выполнена разработка помехоустойчивого навигационного комплекса для беспилотного летательного аппарата на базе программируемой логической интегральной схемы с функциями одновременного приема сигналов спутниковых систем навигации ГЛОНАСС, GPS, QZSS, BeiDou, Galileo, NavIC по четырем независимо настраиваемым каналам и их цифровой обработки с использованием алгоритмов адаптивной фильтрации. С использованием программ электродинамического моделирования адаптивных антенных решеток SolidWorks, Altium Designer, Quartus исследованы закономерности пространственной избирательности приема сигналов и возможности адаптации навигационного оборудования в условиях помех.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система спутниковой навигации, помехоустойчивость навигационного оборудования, программируемая логическая интегральная схема, адаптивная антенная решетка

Для цитирования: Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В., Буслаев А. Б. Применение программируемых логических интегральных схем в системах многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 13–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20.

Original article

APPLYING FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS IN SYSTEMS OF MULTICHANNEL DIGITAL PROCESSING OF SATELLITE NAVIGATION SIGNALS

Andrey V. Bogoslovsky¹, Sergey N. Razinkov², Eleonora V. Syomka^{3✉}, Aleksey B. Buslaev⁴

^{1, 2, 3, 4} Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. The study analyzes multichannel digital satellite navigation signal processing systems for unmanned aerial vehicles. To advance interference insusceptibility of navigation equipment on the basis of

adaptive change in settings, it is advisable to apply a field programmable gate arrays in order to implement variations of algorithms of signal processing without reconfiguring the equipment's structure in changes in radioelectronic settings.

A navigation complex with the function of interference insusceptibility is developed based on the field programmable gate arrays. It may simultaneously receive signals from such satellite navigation systems as GLONASS, GPS, QZSS, BeiDou, Galileo, and NavIC via four independently tuned channels and their digital processing using adaptive filtering algorithms. Patterns in spatial selectivity of signals are studied, as are the possibilities for navigation equipment adaptability in interference settings using programs for electrodynamic modeling of adaptive antenna arrays – SolidWorks, Altium Designer, and Quartus.

Keywords: unmanned aerial vehicle, satellite navigation system, interference insusceptibility of a navigation equipment, field programmable gate array, adaptive antenna array

For citation: Bogoslovsky A. V., Tazinkov S. N., Syomka E. V., Buslaev A. B. Applying field programmable gate arrays in systems of multichannel digital processing of satellite navigation signals. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):13–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение условий применения, комплексирование функций и расширение перечня задач, решаемых радиотехническими комплексами с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) [1, 2], определяют необходимость повышения помехоустойчивости их навигационного оборудования [3, 4].

Одним из эффективных технических способов защиты систем спутниковой навигации от преднамеренных и случайных помех является пространственная селекция в адаптивных антенных решетках [5, 6]. Главное преимущество пространственной селекции излучений по сравнению с временной селекцией заключается в возможности реализации при отсутствии априорных сведений о частотно-временных параметрах обрабатываемых процессов [5, 7], что позволяет выполнять режекцию помех различного происхождения при изменениях степени проявления демаскирующих признаков в складывающейся радиоэлектронной обстановке [6].

Пространственная селекция помех в адаптивных антенных решетках осуществляется за счет корректировки комплексных амплитуд или фаз сигналов на антенных элементах [8] для достижения максимального отношения сигнал/(помеха + шум) на входе приемника системы спутниковой навигации [1, 5]. Диаграммы направленности антенных решеток формируются таким образом, чтобы источники помех располагались в секторах наименьшего усиления их излучений при наиболее высоких уровнях полезных сигналов навигационного оборудования.

Для достижения помехоустойчивости навигационного оборудования БЛА, позволяющей снизить риски подмены сигналов глобальных спутниковых навигационных систем при спуфинг-атаках, целесообразно организовать получение навигационной информации одновременно в различных диапазонах частот. По результатам оценивания отношения сигнал/(помеха + шум) в независимо настраиваемых приемных каналах выполняется автоматическое подключение оборудования к тому из них, где указанный показатель имеет наибольшее значение [3, 7].

Техническая реализация мер помехозащитности при рациональном расходовании информационного ресурса навигационной системы базируется на построении алгоритмов цифровой обработки принимаемых радиоизлучений микроконтроллерами с установленной при проектировании схмотехнической структурой и фиксированной топологией связей [9].

Такие специализированные устройства [9, 10], ориентированные на выполнение задач навигации в детерминированных условиях, обладают высокими показателями быстродействия, определяемыми производительностью логических элементов, и характеризуются отсутствием аппаратной избыточности при регламентированной загрузке каждого компонента схемы [10].

Вместе с тем недостатком цифровых систем с жесткой логикой функционирования является отсутствие возможности настройки целевых функций при адаптации к условиям выполнения целевых задач, поскольку для из-

менения алгоритмов защиты от помех требуются трансформация структуры и изменение логических правил взаимодействия ее компонентов. По результатам летных экспериментов [11] установлено, что при потере сигналов глобальных спутниковых систем навигации автономный полет БЛА реализовать достаточно трудно, а при воздействии преднамеренных помех регистрируются отказы не только основных, но и резервных систем навигации [1, 2].

Поэтому при создании помехоустойчивой аппаратуры спутниковой навигации для БЛА предлагается применять лишенные указанного недостатка универсальные программируемые адаптивные системы с вариативными алгоритмами обработки сигналов [2, 3, 7]. Робастные свойства алгоритмов навигационного обеспечения объектов сохраняются при изменениях параметров радиоэлектронной обстановки без коррекции структуры и состава оборудования путем настройки ее параметров по управляющим командам [3, 4].

Перспективные направления развития спутниковой навигации связаны с построением аппаратуры на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), в которых логика обработки данных (сигна-

лов), в отличие от микросхем, не устанавливается на этапе изготовления, а программируется [3, 7, 12].

Цель работы – разработка помехоустойчивого навигационного комплекса для БЛА на компонентной базе ПЛИС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Анализ современных разработок помехоустойчивых навигационных систем для беспилотных летательных аппаратов.

Натурные и стендовые эксперименты показывают, что наиболее высокие показатели устойчивости работы навигационной аппаратуры из состава бортового оборудования БЛА «Орлан-10» и «Грант-М» в условиях помех достигаются за счет применения адаптивной антенной решетки «Комета-М» (разработчик – ОАО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары).

На рис. 1 представлены общий вид четырехэлементной антенной решетки с диапазоном рабочих частот 1 575–1 610 МГц и вид антенного элемента в форме патч-антенны Ceramic Patch Antenna Taoglas CGGP.18.4.C.02. Тактико-технические характеристики решетки обеспечивают прием сигналов глобальных навигационных систем GPS, GLONASS, Galileo.

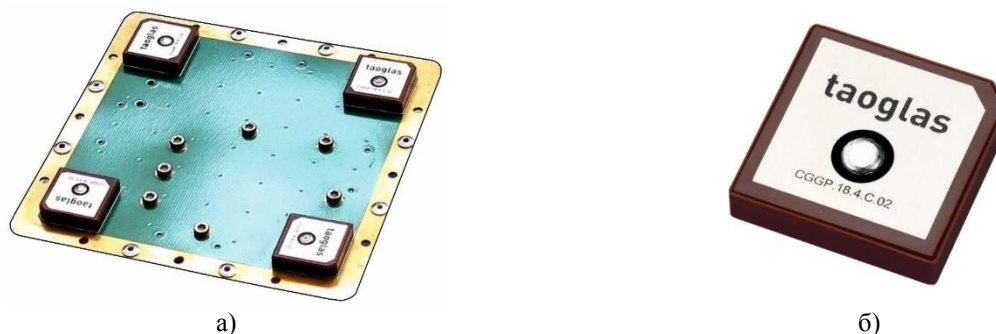


Рис. 1. Адаптивная антенная решетка «Комета-М»:

а) общий вид антенной решетки, б) вид антенного элемента

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В [4] на основании модельных экспериментов по защите навигационной аппаратуры от преднамеренных помех путем формирования диаграмм направленности адаптивной антенной решетки «Комета-М» установлено, что при исключении приема в трех направлениях, равномерно распределенных по азимуту, утрачивается способность пространственной

режекции мешающих излучений. Адаптивная антенная решетка переходит в состояние перегрузки, характеризуемое нейтрализацией функционала полной помехозащищенности [4, 13].

Таким образом, вопросы разработки помехоустойчивых устройств для комплексной обработки навигационной информации от группы спутников остаются открытыми.

2. Разработка помехоустойчивого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе программируемых логических интегральных схем.

Структурная схема разрабатываемого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе ПЛИС представлена

на рис. 2. Пунктиром обозначен созданный проект платы, связывающий его элементы в единое целое. Основное аппаратное обеспечение включает модуль PCB NT1065 FMC V3, ПЛИС ALTERA FPGA CYCLONE II, плату сопряжения с USB 3.0.

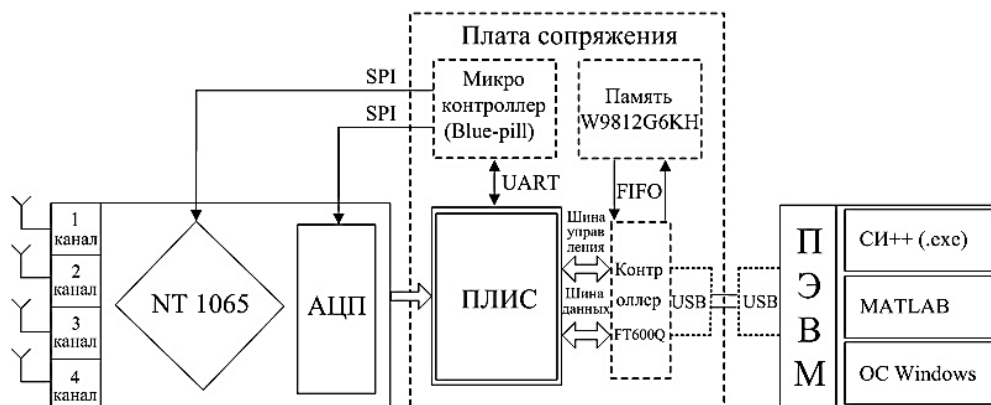


Рис. 2. Структурная схема комплекса

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Платформа на основе микросхемы NT1065 с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) LTC2174CUKG-12-PBF с режимами последовательного и параллельного программирования, выполненная по технологии программно-определяемого радио SDR (Software Defined Radio) [14], позволяет производить четырехканальный прием сигналов в диапазонах частот системы дифференциального сервиса OmniSTAR (1 539,9 МГц и 1 558,7 МГц) и глобальных спутниковых навигационных систем:

ГЛОНАСС L1, L2, L3, L5;

GPS L1, L2, L5;

QZSS L1, LEX, L2, L5;

BeiDou B1-C, B1-A, B3, B2b, B2a, B1, B3-A;

Galileo E1, E6, E5b, E5a;

NavIC L5.

Центральным элементом помехоустойчивого комплекса является ПЛИС производства Altera на основе микросхемы FPGA серии Cyclone, имеющей необходимое количество выводов LDVS, обеспечивающих низковольтную дифференциальную передачу сигналов на высоких частотах. Для создания и отладки проектов применялась система автоматизированного проектирования цифровых устройств Quartus [15].

Управление микросхемой NT1065 с установлением режимов ее работы, а также

настройка АЦП происходит согласно протоколу SPI по линиям CSN, SCLK, MOSI, MISO в соответствии с картой управляющих кодов [16], корректировка настройки может осуществляться контрольными сигналами ПЛИС по интерфейсу UART.

Для визуализации в среде MATLAB, контроля, настройки параметров и обеспечения функционирования навигационного комплекса по заданному алгоритму разработан проект платы сопряжения (переходной платы). Плата содержит ПЛИС, микроконтроллер AT89C5130A-PUTUM, микросхему энергонезависимой памяти W9812G6KH и контроллер USB 3.0 FT600Q для организации управления с персональной ЭВМ.

Проектирование переходной платы осуществлялось с применением программного комплекса Altium Designer, содержащего средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников с учетом требований, предъявляемых современными технологиями разработок. Работа над проектом проводилась в единой управляющей оболочке Design Explorer, что позволило контролировать его целостность на всех этапах синтеза.

На рис. 3 представлены электронный проект разработанной платы (а) и ее изготовленный образец со стороны пайки (б).

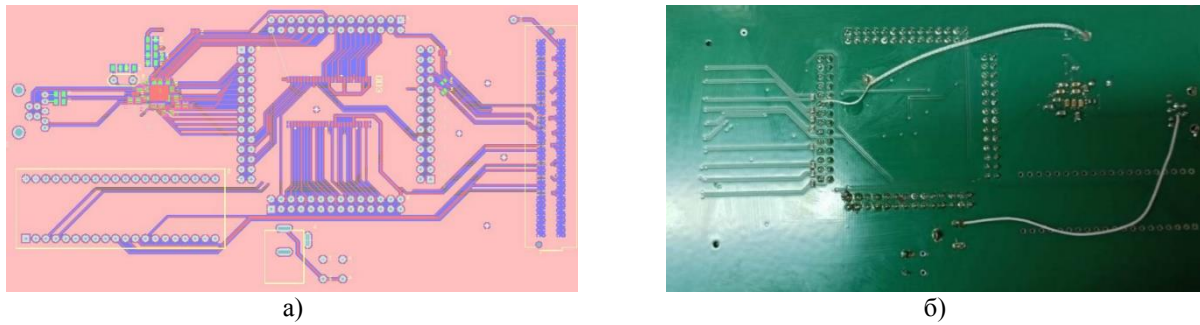


Рис. 3. Плата сопряжения:

а) электронный проект, б) действующий образец

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Особое внимание при создании платы уделялось качеству трассировки, поскольку оно может существенно ухудшить характеристики проекта по сравнению с показателями, доступными в ПЛИС – объем логических ресурсов, емкость внутренней памяти, общее число пользовательских блоков ввода/вывода, системная производительность [12].

Монтаж печатной платы и проверка ее работоспособности выявили трудности с запуском внутреннего генератора контроллера USB 3.0 FT600Q при подключении к нему кварцевого резонатора на частоте 30 МГц, обеспечивающего его устойчивое функционирование. Применение резонаторов разных производителей не помогло преодолеть указанные сложности.

В ходе серии экспериментов для запуска генератора контроллера FT600Q был при-

менен внешний источник тактового сигнала, формируемого с помощью модуля PLL на базе ПЛИС ALTERA FPGA CYCLONE II, который преобразовывал сигнал с частотой 50 МГц в 30 МГц. Проведена доработка схемы, прошивки ПЛИС и самой платы по месту. На рис. 3б изображены соединительные провода, обеспечивающие передачу тактового сигнала 30 МГц с ПЛИС на вход контроллера FT600Q.

Дополнительно к имеющимся возможностям NT1065 разработанная плата позволяет осуществлять цифровую обработку сигналов с выхода АЦП по алгоритмам адаптивной нелинейной фильтрации и трансляцию результатов на персональную ЭВМ.

На рис. 4 представлена блок-схема передачи данных с ПЛИС на ЭВМ по интерфейсу USB 3.0 в рабочем окне программы Quartus.

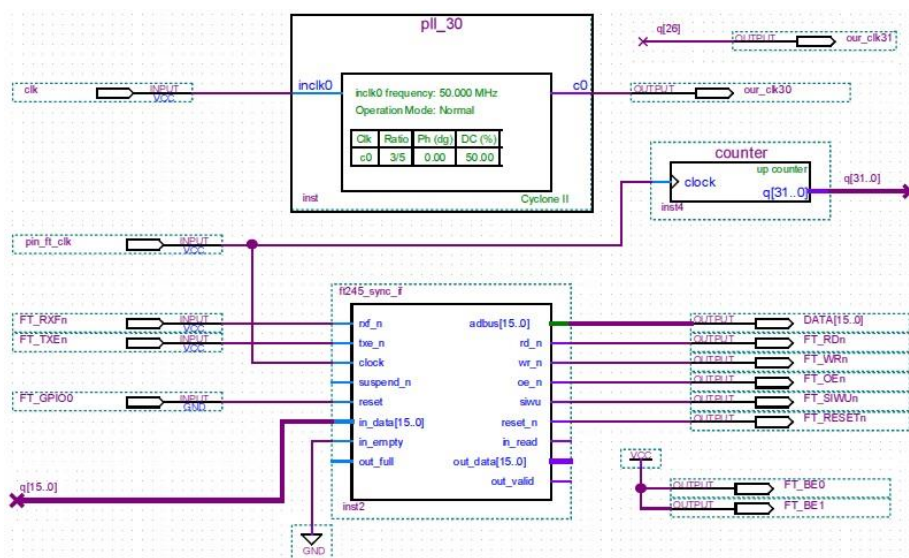


Рис. 4. Блок-схема передачи данных с ПЛИС на ЭВМ по интерфейсу USB 3.0

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Используемые основные порты микросхемы имеют следующее назначение [17]:

- CLK выполняет параллельный вывод тактового сигнала шины FIFO на главную шину FIFO;
- RXF_N обеспечивает синхронный режим с приемом данных от внешних устройств;
- TXE_N предназначен для определения состояния сигнала тайминга;
- GPIO0...1 осуществляет конфигурацию микросхемы в соответствии с таблицей истинности;
- DATA_0...15 представляют собой биты ввода-вывода данных по параллельной шине;
- RD_N используется для включения считывания входного сигнала;
- WR_N отвечает за разрешение записи входного сигнала, запрос на транзакцию данных;

- OE_N предназначен для включения (отключения) вывода данных на внешние устройства;

- SIWU_N применяется для внешней синхронизации;

- BE_0..1 представляет собой бит ввода-вывода 0...1;

- RESET_N реализует функции сброса микросхемы в начальное состояние.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 представлен внешний вид изготовленного помехоустойчивого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе ПЛИС со стороны компонентов (а) и со стороны, где подводится общее питание к изделию (б).

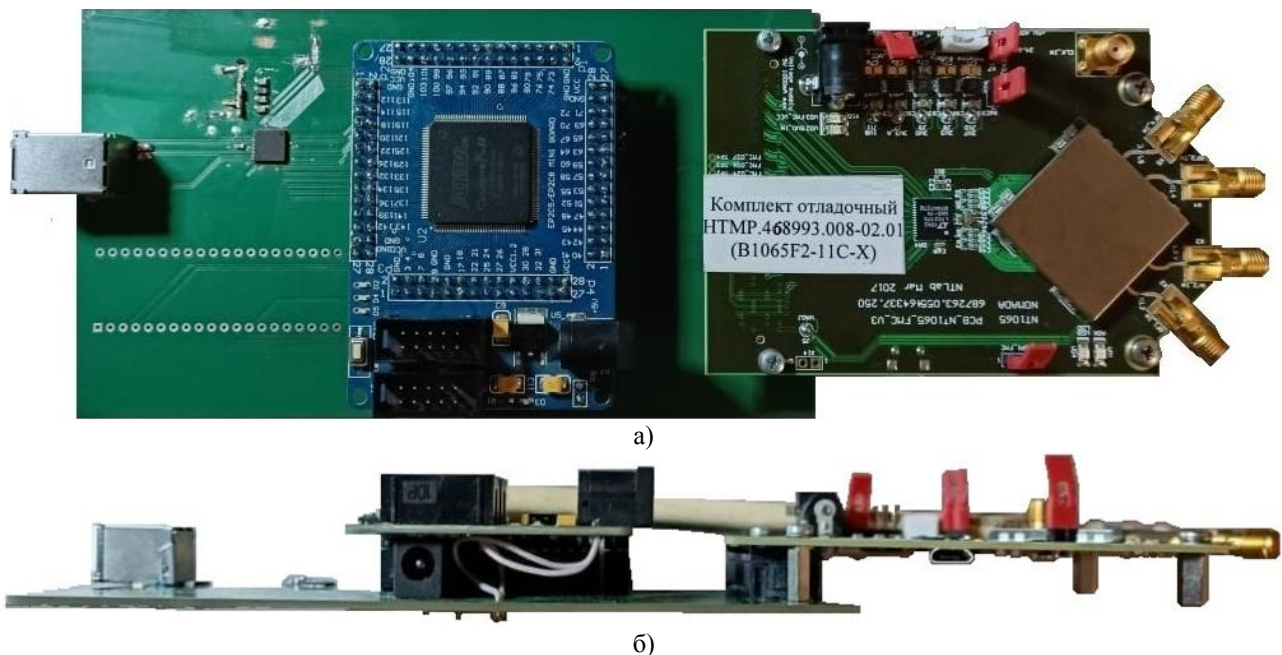


Рис. 5. Внешний вид комплекса:

а) со стороны компонентов, б) со стороны разъема питания

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На высокоуровневом языке программирования общего назначения C++ разработаны драйверы для операционной системы Windows, позволяющие осуществлять взаимодействие персональной ЭВМ с аппаратной частью комплекса.

Реализовано определение микросхемы FT600Q, подключенной по шине USB 3.0, чтение и запись конфигурации.

На рис. 6 приведены результаты выполнения программы в одноканальном (а) и четырехканальном (б) режимах работы.

```
List of Connected Devices!  
Device[0]  
  Flags: 0x4 [USB 3] | Type: 600 | ID: 0x0403601E | ftHandle=00000000  
  SerialNumber=000000000001  
  Description=FTDI SuperSpeed-FIFO Bridge  
  VendorID: 0x0403  
  ProductID: 0x601E  
  StringDescriptors:  
    bInterval: 0x00  
    PowerAttributes: 0xE0  
    PowerConsumption: 0x0060  
    FIFOLock: CONFIGURATION_FIFO_CLK_100 (0x00)  
    FIFOMode: CONFIGURATION_FIFO_MODE_245 (0x00)  
    ChannelConfig: CONFIGURATION_CHANNEL_CONFIG_1 (0x02)  
    OptionalFeatureSupport: CONFIGURATION_OPTIONAL_FEATURE_DISABLEALL (0x0000)  
    BatteryChargingGPIOConfig: 0xE4  
    FlashEEPROMDetection: 0x10  
    MSIO_Control: 0x00010800  
    GPIO_Control: 0x00000000  
  read: 0  
Process returned 0 (0x0)   execution time : 6.591 s  
Press any key to continue.
```

а)

```
List of Connected Devices!  
Device[0]  
  Flags: 0x4 [USB 3] | Type: 600 | ID: 0x0403601E | ftHandle=00000000  
  SerialNumber=000000000001  
  Description=FTDI SuperSpeed-FIFO Bridge  
  VendorID: 0x0403  
  ProductID: 0x601E  
  StringDescriptors:  
    bInterval: 0x00  
    PowerAttributes: 0xE0  
    PowerConsumption: 0x0060  
    FIFOLock: CONFIGURATION_FIFO_CLK_100 (0x00)  
    FIFOMode: CONFIGURATION_FIFO_MODE_600 (0x01)  
    ChannelConfig: CONFIGURATION_CHANNEL_CONFIG_4 (0x00)  
    OptionalFeatureSupport: CONFIGURATION_OPTIONAL_FEATURE_DISABLEALL (0x0000)  
    BatteryChargingGPIOConfig: 0xE4  
    FlashEEPROMDetection: 0x10  
    MSIO_Control: 0x00010800  
    GPIO_Control: 0x00000000  
  read: 0  
Process returned 0 (0x0)   execution time : 5.905 s  
Press any key to continue.
```

б)

Рис. 6. Программная установка режимов работы:

а) одноканального, б) четырехканального

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Как следует из рис. 6, операционная система определяет устройство FT600Q, настроенное в одноканальный режим работы (FT245) по шине USB 3.0, а также установку микросхемы в четырехканальный режим работы (FT600).

Для создания пользовательского интерфейса, вывода графических результатов цифровой обработки, принятых по четырем каналам сигналов глобальных спутниковых навигационных систем, использовался пакет программирования и вычислений MATLAB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обоснована актуальность проектирования помехоустойчивого

комплекса, разработана структурная схема, проведена компоновка печатной платы со спецификацией, изготовлен образец (прототип), выполнены тестирование, отладка прошивки и настройка драйверов.

Разработанный комплекс, в отличие от навигационной аппаратуры, применяемой в настоящее время на БЛА, обеспечивает многоканальный прием сигналов глобальных спутниковых навигационных систем в 23 поддиапазонах частот 1 145–1 609 МГц, их последующую цифровую обработку и взаимодействие через USB 3.0 с персональной ЭВМ для обработки и отображения навигационной информации.

Список источников

1. Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Управление и наведение беспилотных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 279 с.
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10105.
3. Сакулин Е. А., Березовский С. Е., Латанова О. И. Способы повышения помехоустойчивости и имитостойкости навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 160–164.
4. Камнев Е. А., Юдин В. Н. Помехоустойчивость НАП спутниковых радионавигационных систем с четырехэлементной антенной решеткой // Электросвязь. 2018. № 6. С. 37–44.

References

1. Krasilshchikov M. N., Sebyakov G. G. Upravlenie i navedenie bespilotnykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii. Moscow: FIZMALIT; 2003. 279 p. (In Russian).
2. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Counter unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020;(1):109–146. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10105. (In Russian).
3. Sakulin E. A., Berezovsky S. E., Latanova O. I. Techniques of improving noise immunity and imitability of consumer navigation equipment of global navigation satellite systems. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(8):160–164. (In Russian).
4. Kamnev E. A., Yudin V. N. Interference immunity of user navigation equipment of satellite radio navigation systems with four-element antenna array. *Elektrosviaz*. 2018;(6):37–44. (In Russian).
5. Monzingo R. A., Miller T. W. Introduction to adaptive arrays. Chelpanov V. G., Leksachenko V. A.,

5. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / пер. с англ. В. Г. Челпанова, В. А. Лексаченко ; под общ. ред. В. А. Лексаченко. М. : Радио и связь, 1986. 448 с.
6. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. Ю. К. Сальникова ; под. общ. ред. В. В. Шахгильдянова. М. : Радио и связь, 1989. 439 с.
7. Нечаев Е. Е. К вопросу построения интегрированных навигационных систем на базе ПЛИС // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. № 136. С. 85–94.
8. Кашин В. А. Методы фазового синтеза антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 47–60.
9. Магда Ю. С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств. М. : ДМК, 2017. 224 с.
10. Новиков Ю. В., Скоробогатов П. К. Основы микропроцессорной техники. М. : Интернет-ун-т информ. технологий ; БИНОМ, 2012. 357 с.
11. Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. Обоснование электронной компонентной базы для автогенераторов при навигационном обеспечении беспилотных летательных аппаратов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 6–15.
12. Вальпа О. Полезные схемы с применением микроконтроллеров и ПЛИС. М. : Додэка-XXI, 2016. 416 с.
13. Разиньков С. Н., Богословский А. В. Синтез нулей диаграмм направленности антенных решеток для излучения узкополосных и импульсных сигналов с высокими коэффициентами направленного действия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 2. С. 32–37.
14. Львов А. В., Мителкова А. Д., Кабаев Д. В. и др. Разработка и прототипирование радиоэлектронных устройств по технологии SDR с использованием системы GNU RADIO // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXIV Междунар. науч.-технич. конф., 17–19 апреля 2018 г., г. Воронеж. Т. 2. Воронеж : Вэлборн, 2018. С. 228–234.
15. Комолов Д. А., Мялк Р. А., Зобенко А. А. и др. Системы автоматизированного проектирования фирмы Alters MAX+plus II и Quartus II. Краткое описание и самоучитель. М. : ИП РадиоСофт, 2002. 352 с.
16. Техническое описание микросхемы NT1065. URL: https://ntlab.lt/wp-content/uploads/2020/02/NT1065_LE_DS_v2.18.pdf (дата обращения: 04.05.2023).
17. Техническое описание микросхемы FTDI FT600Q. URL: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS_FT600Q-FT601Q-IC-Datasheet.pdf (дата обращения: 04.05.2023).
- translators; Leksachenko V. A., editor. Moscow; Radio i sviaz; 1986. 448 p. (In Russian).
6. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive signal processing. Salnikov Yu. K., translator; Shakhgildyan V. V., editor. Moscow: Radio i sviaz; 1989. 439 p. (In Russian).
7. Nechaev E. E. On problem of integrated navigation systems on the basis of FPGA. *Civil Aviation High Technologies*. 2008;(136):85–94. (In Russian).
8. Kashin V. A. Metody fazovogo sinteza antennoykh reshetok. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 1997;(1):47–60. (In Russian).
9. Magda Yu. S. Sovremennyye mikrokontrollery. Arkhitektura, programmirovaniye, razrabotka ustroystv. Moscow: DMK; 2017. 224 p. (In Russian).
10. Novikov Yu. V., Skorobogatov P. K. Osnovy mikroprotsessornoi tekhniki. Moscow: Internet-un-t inform. tekhnologii; BINOM; 2012. 357 p. (In Russian).
11. Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V. Validation of the electronic component base for self-excited oscillators in navigating unmanned aerial vehicles. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(1):6–15. (In Russian).
12. Valpa O. Poleznye skhemy s primeneniem mikrokontrollerov i PLIS. Moscow: Dodeka-XXI; 2016. 416 p. (In Russian).
13. Razinkov S. N., Bogoslovsky A. V. The synthesis of antenna array pattern zeros for radiating narrowband and pulsed high directive gain signals. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012;8(2):32–37. (In Russian).
14. Lvov A. V., Mitelkova A. D., Kabaev D. V. et al. Development and prototyping of SDR radio systems using the GNU radio toolkit. In: *Proceedings of the XXIV International Scientific and Engineering Conference "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"*, April 17–19, 2018, Voronezh. Vol. 2. Voronezh: Velborn; 2018. p. 228–234. (In Russian).
15. Komolov D. A., Myalk R. A., Zobenko A. A. et al. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniia firmy Alters MAX+plus II i Quartus II. Kratkoe opisanie i samouchitel. Moscow: IP RadioSoft; 2002. 352 p. (In Russian).
16. Tekhnicheskoe opisanie mikroskhemy NT1065. URL: https://ntlab.lt/wp-content/uploads/2020/02/NT1065_LE_DS_v2.18.pdf (accessed: 04.05.2023). (In Russian).
17. Tekhnicheskoe opisanie mikroskhemy FTDI FT600Q. URL: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS_FT600Q-FT601Q-IC-Datasheet.pdf (accessed: 04.05.2023). (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Богословский – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники.
С. Н. Разиньков – доктор физико-математических наук, доцент, профессор.
Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.
А. Б. Буслаев – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Bogoslovsky – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Deputy Head of the Radioelectronics Department.
S. N. Razinkov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Docent, Professor.
E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.
A. B. Buslaev – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья
УДК 519.673
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-21-29

МОДЕЛЬ СОГЛАСОВАННОГО ГРУППОВОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПО ЦЕЛЯМ

Александр Анатольевич Дубанов

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия
alandubanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1855-2562>

Аннотация. В статье рассмотрены задачи моделирования таблицы, включающей количество противоборствующих сторон и процесс группового преследования множества целей, каждая ячейка которой является структурированной переменной, содержащей информацию о прогнозируемом времени достижения i -м преследователем j -й цели. Для каждого распределения из конечного множества преследователей по целям выбирается минимальное из допустимых максимальных значений времен достижения целей преследователями. Рассмотренные задачи, основанные на моделях поведения реальных объектов, могут быть использованы в пакетах имитационного моделирования, виртуального моделирования игровых процессов или транспортной логистики, а также быть востребованными при создании в системах виртуальной реальности моделей доставки почтовых грузов дронами в оптимизированной hub-сети.

Ключевые слова: преследователь, цель, траектория, минимизация, таблица

Для цитирования: Дубанов А. А. Модель согласованного группового преследования с распределением по целям // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 21–29. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-21-29.

Original article

A MODEL OF COOPERATED GROUP PURSUIT WITH DISTRIBUTION BY TARGETS

Aleksandr A. Dubanov

Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude, Russia
alandubanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1855-2562>

Abstract. The article considers the problems of modeling a table with a set of competing parties and a group pursuit of multiple targets. Each table cell represents a structural variable containing data about the predicted time required for an i th pursuer to reach a j th target. For each finite set of pursuer's distribution by targets, the minimum time value of the pursuer's reaching the target is selected out of all permissible maximum ones. Upon analyzing the problems based on the models of real-world objects movements, the author suggests using them for simulation modeling, virtual modeling of game processes, and transport logistics, as well as for developing virtual reality models for parcel delivery performed by drones using a hub-network.

Keywords: pursuer, target, trajectory, minimization, table

For citation: Dubanov A. A. A model of cooperated group pursuit with distribution by targets. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):21–29. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-21-29.

ВВЕДЕНИЕ

Сложные задачи динамического программирования в теории управления возможно решать путем их разбиения на менее сложные. Идея динамического программирования использовалась для поиска оптимальных тра-

екторий при формировании таблицы достижения преследователями целей по принципу перебора всевозможных комбинаций, из которых выбирается комбинация минимального значения критерия из формируемого множества с максимальным значением.

Рассмотрим групповое преследование множества целей: N преследователей догоняют M целей. Сформируем таблицу распределения

преследователей по строкам, а целей – по столбцам (табл. 1).

Таблица 1

Распределение преследователей по целям

Преследователь	Предполагаемое время достижения цели 1	Предполагаемое время достижения цели 2	Предполагаемое время достижения цели 3
1	t_{11}	t_{12}	t_{13}
2	t_{21}	t_{22}	t_{23}
3	t_{31}	t_{32}	t_{33}
4	t_{41}	t_{42}	t_{43}

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Например, в каждой ячейке табл. 1 можно рассчитывать прогнозируемое время достижения i -м преследователем j -й цели – t_{ij} . Каждая ячейка табл. 1 содержит значения векторов скоростей, угловые скорости преследователя и цели, прогнозируемое время достижения t_{ij} , координаты положения в пространстве преследователя и цели.

В каждой полученной выборке A_k следует найти максимальное значение времен достижения $t_k = \max\{t_{ij}\}$. Допустим, в указанной выборке следует найти максимальное значение из времен $\{t_{21}, t_{23}, t_{32}, t_{41}\}$.

Максимальное значение t_k в выборке A_k диктуется тем, что все значения, зависящие от векторов скоростей преследователей и целей, а также их допустимых угловых скоростей, можно изменить в сторону увеличения до значения параметра t_k .

В выборке A_k возможно повышение остальных значений времен достижения преследователями целей t_{ij} до значения t_k за счет векторов скоростей преследователя и цели, значений угловых скоростей.

Когда будет получен массив выборок $\{A_k\}$ с соответственными значениями времен $\{t_{ij}\}$, следует найти минимальное время $t_{\min} = \min\{t_k\}$. Таким образом, будет получено оптимальное время группового достижения множества целей одновременно.

В работах [1–3] рассматривались основные положения теории игр, в работах [4, 5] – вопросы наведения на цель, в работах [6–10] – подходы к групповому поведению как преследователей, так и целей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предполагается, что таблица распределения преследователей по целям будет строиться на каждом дискретном промежутке времени, а в каждой ячейке таблицы будет храниться информация о методе преследования. Обновление предполагаемых времен достижения целей в табл. 1 предполагается через каждый дискретный промежуток времени Δt (рис. 1).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма функции расчета следующего шага и вектора скорости движения преследователя.

На рис. 2 представлена блок-схема функции расчета времени и расстояния достижения преследователем цели. Переменная ε – это пороговое значение расстояния от преследователя до цели, при достижении которого цель считается достигнутой.

В случае, когда цель движется по предопределенной траектории, блок-схема, представленная на рис. 2, может дать оценку времени t_{ij} достижения i -м преследователем j -й цели. В качестве выходного параметра функции, представленной на рис. 2, может служить количество итераций процесса преследования N_{it} . Значение N_{it} количества итераций является выходным параметром функции расчета времени и расстояния достижения преследователем цели.

В случае, когда цель предпринимает ответные шаги, чтобы избежать достижения, оценивать время предлагается иначе. Для этого прогнозируемые траектории требуется строить как составные из сегментов прямых, дуг окружностей, квадратных и кубических парабол и других известных линий, чтобы не решать в расчетном цикле краевых задач.



Рис. 1. Блок-схема расчета фазовых координат преследователя на следующем шаге
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

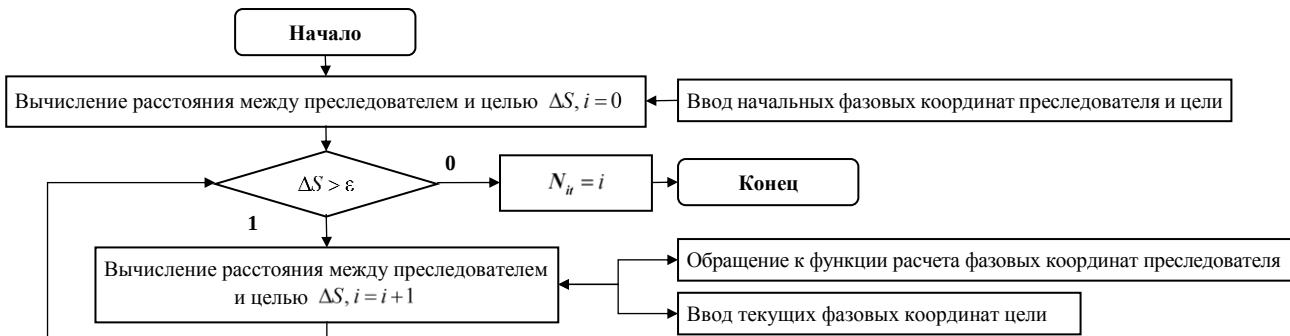


Рис. 2. Блок-схема функции расчета времени и расстояния достижения преследователем цели
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

В представленной модели группового преследования дискретный промежуток времени равен $\Delta t = 0,02$, скорости преследователей равны 20, 20 и 22 м/с, скорости целей равны 15 и 15 м/с. Процесс преследования происходит в области $[-30 \ 30] \times [-30 \ 30]$, измерение производится в метрах.

В описанной модели группового преследования в качестве примера используется модифицированный метод параллельного сближения. Предположительно, метод погони используется, если преследователь

оснащен устройством самонаведения, а метод параллельного сближения предпочтительней для наведения по GPS.

Предполагается, что матрица распределения Ψ_{ij} , где $i=1 \dots N$, $j=1 \dots M$ преследователей по целям будет строиться на каждом дискретном промежутке времени. В каждой ячейке матрицы Ψ_{ij} будет храниться информация о методе преследования. На основании этой информации будет происходить обращение к библиотеке функций расчета управляющих векторов $\vec{u}$ (табл. 2).

Настоящая библиотека расчетов управляющих векторов содержит методы погони на плоскости, в пространстве и на поверхности, которые рассчитываются:

- методы параллельного сближения – на плоскости, в пространстве и на поверхности;
- методы пропорционального сближения – на плоскости и в пространстве;
- трехточечные методы – на плоскости и в пространстве;

- модифицированные методы погони – на плоскости и в пространстве, когда управление преследователем может производиться изменением допустимой кривизны траекторий;

- модифицированные методы параллельного сближения – на плоскости и в пространстве.

Модификация методов параллельного сближения и погони позволяет строить сеть прогнозируемых траекторий, которые допускают различные краевые условия.

Таблица 2

Методы преследования цели, движущейся по определенной траектории

№	Метод преследования: расчет управляющего вектора	Графическое описание метода
1	Метод погони на плоскости и пространстве: $\vec{u}_i = \frac{\vec{T}_i - \vec{P}_i}{ \vec{T}_i - \vec{P}_i },$ $\vec{T}_i$ – точка положения цели, $\vec{P}_i$ – точка положения преследователя [11]	
2	Метод параллельного сближения на плоскости: $\vec{u} = \frac{K - P}{ K - P },$ T – точка положения цели, P – точка положения преследователя, K – точка на окружности Аполлония однозначно определена точками P, T и вектором скорости цели $\vec{V}_T$ [12]	
3	Метод параллельного сближения в пространстве: $\vec{u} = \frac{K - P}{ K - P },$ T – точка положения цели, P – точка положения преследователя, K – точка на окружности Аполлония, окружность Аполлония лежит в плоскости Σ, образованной точками P, T и вектором скорости цели $\vec{V}_T$. В приведенном примере показан случай, когда вектор скорости преследователя направлен произвольно. По истечении некоторого времени, скорость преследователя направлена в точку на окружности Аполлония [13]	
4	Метод погони на поверхности: $\vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i },$ где P_{i+1} – есть результат пересечения поверхности $z = f(x, y)$, плоскости $P_i P_i^* T_i$ и сферы S_i с центром в точке P_i и радиуса $\vec{V}_T \times \Delta t$. Точка P_i^* – ортогональная проекция точки P_i на плоскость XY. Выразить управляющий вектор необходимо, чтобы производить унифицированное обращение к библиотеке [14]	

№	Метод преследования: расчет управляющего вектора	Графическое описание метода
5	Метод параллельного сближения на поверхности: $\vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i },$ где P_{i+1} – есть результат пересечения поверхности $z = f(x, y)$, плоскости $P_{i+1} P_{i+1}^* T_{i+1}$ и сферы S_i с центром в точке P_i и радиуса $\vec{V}_T \times \Delta t$. Точка P_{i+1}^* – ортогональная проекция точки P_{i+1} на плоскость XU. Выразить управляющий вектор необходимо, чтобы производить унифицированное обращение к библиотеке. Однопараметрическое семейство плоскостей Φ_i параллельное друг другу [15]	
6	Метод пропорционального сближения: $\frac{d\theta}{dt} = k \times \frac{d\varphi}{dt},$ $\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{ T_i ^2 + T_{i+1} ^2 - T_i - T_{i+1} ^2}{2 \times T_i \times T_{i+1} }\right),$ $\Delta\theta = k \times \arccos\left(\frac{ T_i ^2 + T_{i+1} ^2 - T_i - T_{i+1} ^2}{2 \times T_i \times T_{i+1} }\right),$ $P_{i+1} = \begin{bmatrix} V_p \times \Delta t \times \cos\left(k \times \arccos\left(\frac{ T_i ^2 + T_{i+1} ^2 - T_i - T_{i+1} ^2}{2 \times T_i \times T_{i+1} }\right)\right) \\ V_p \times \Delta t \times \sin\left(k \times \arccos\left(\frac{ T_i ^2 + T_{i+1} ^2 - T_i - T_{i+1} ^2}{2 \times T_i \times T_{i+1} }\right)\right) \end{bmatrix},$ $\vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i }$	
7	Трехточечный метод сближения: $(P_{i+1} - P_i)^2 = (\vec{V}_i \times \Delta t)^2, \quad \vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i }.$ $P_{i+1} = (1 - \tau) \times Q + \tau \times T_{i+1}.$ Применение метода удобно, когда цель движется по баллистической траектории	
8	Модификация метода параллельного сближения на плоскости: строится сеть параллельных линий $f_{i+1}(s) = f_i(s) + T_{i+1} - T_i,$ где s – длина дуги линии, T_i – массив опорных точек траектории цели. Решение уравнения $(f_{i+1}(s) - P_i)^2 = (V_p \times \Delta t)^2$ относительно параметра s позволит найти значение s^*, которое будет соответствовать $P_{i+1} = f_{i+1}(s^*)$. $\vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i }.$ В качестве семейства линий $f_i(s)$ могут служить линии произвольной конфигурации [16]	

Окончание табл. 2

№	Метод преследования: расчет управляющего вектора	Графическое описание метода
9	Модификация метода параллельного сближения на плоскости: строится сеть $f_i(s)$, где s – длина дуги линии, T_i – массив опорных точек траектории цели. Выполняется условие, что конец линии $f_i(s)$ проходит через точку T_i, а точка P_i инцидентна линии $f_i(s)$, другими словами, используется в качестве лекала. Решение уравнения $(f_{i+1}(s) - P_i)^2 = (V_p \times \Delta t)^2$ относительно параметра s позволит найти значение s^*, которое будет соответствовать $P_{i+1} = f_{i+1}(s^*)$. $\vec{u}_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{ P_{i+1} - P_i }.$ В качестве семейства линий $f_i(s)$ могут служить линии произвольной конфигурации [17]	

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

В примере группового преследования (рис. 3) сформированы матрицы Ψ_{ij} , где $i=1...3$, $j=1...2$, соответствующие возможным выборкам $A_k, k=1...6$ (табл. 3). Затем следует обращение, чтобы найти максимальное зна-

чение $t_k = \max\{t_{ij}\}$. После расчетов времен достижения получено, что наибольшим временем достижения обладает преследователь P_1 , настигающий цель T_1 из выборки A_2 .

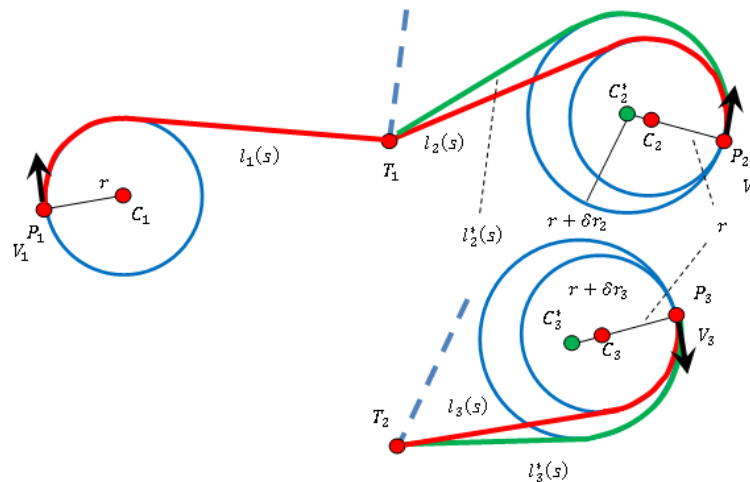


Рис. 3. Схема группового преследования множества целей

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 3

Выборки, соответствующие распределению преследователей по целям

Преследователи	Цели		Цели		Цели		Цели		Цели		Цели	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Выборки	A_1		A_2		A_3		A_4		A_5		A_6	

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

В ситуации, показанной на рис. 3, все преследователи достигают цели по методу модифицированного метода параллельного сближения, что соответствует строке 8 табл. 1.

В примере на рис. 3 показан случай расчета одновременного достижения целей. В модели преследования, указанной строке 8 табл. 1, кривизна траектории не должна быть больше определенного значения. Поэтому в модели у преследователей P_2 и P_3 увеличивается первоначальный радиус кривизны траектории, что показано на рис. 3.

Сформирована выборка A_k , в которой преследователь P_i догоняет T_j . Далее происходит первичная оценка времени достижения t_{ij} .

Оценка времени t_{ij} в данном примере происходит в вычислении длины прямолинейного участка до цели и в вычислении длины дуги сопрягаемой окружности допустимого радиуса. Затем производится выбор максимального значения $t_k = \max\{t_{ij}\}$. Увеличение времени t_{ij} до значения t_k в данной модели происходит за счет увеличения у преследователя P_i радиуса сопрягаемой окружности со значения r_i до значения $r_i + \delta r_i$.

Рис. 4 дополнен анимированным изображением, где показан процесс группового преследования множества целей [18].

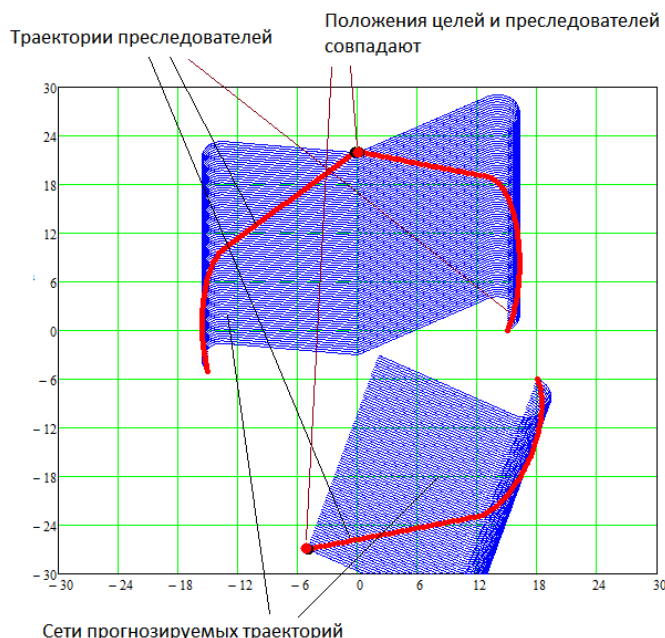


Рис. 4. Модель группового преследования

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из результатов работы можно считать построение модели одновременного достижения группы целей для использования, например, при проектировании систем автоматического слежения и защиты. Предполагается, что методы формирования таблиц распределения преследователей и целей могут быть востребованы при проектировании систем виртуальной реальности для игровых задач, в которых будет произведено моделирование процесса группового преследования, убегания, уклонения. Метод динамического

программирования при формировании таблицы распределения преследователей по целям позволит перейти к автоматизированному процессу распределения с оптимизацией по заданным параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование таблицы распределения преследователей по целям может использоваться и стороной, представляющей цели, которая ставит себе задачу не быть достигнутой.

Предполагается, что таблицу распределения преследователей по целям возможно

генерировать в каждый момент времени, при этом цели и преследователи могут исчезать, могут появляться новые.

Метод формирования таблицы распределения преследователей по целям применим

при проектировании систем виртуальной реальности для игровых задач при моделировании процесса группового преследования, убегания, уклонения.

Список источников

1. Isaacs R. Differential games: A mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization. New York: John Wiley and Sons; 1965. 384 p.
2. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974. 456 с.
3. Петросян Л. А. Дифференциальные игры преследования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 232 с.
4. Хачумов М. В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 2. С. 45–52.
5. Хачумов М. В. Задачи группового преследования цели в условиях возмущений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 2. С. 46–54.
6. Банников А. С. Некоторые нестационарные задачи группового преследования // Известия ИМИ УдГУ. 2013. Т. 1, № 41. С. 3–46.
7. Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Яхно В. П. Уклонение групповой цели в трехмерном пространстве // Автоматика и телемеханика. 2008. № 5. С. 3–14.
8. Гусятников П. Б. Убегание одного нелинейного объекта от нескольких более инертных преследователей // Дифференциальные уравнения. 1976. Т. 12, № 2. С. 213–226.
9. Гусятников П. Б. Дифференциальная игра убегания от лиц // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 6. С. 22–32.
10. Гусятников П. Б. Дифференциальная игра убегания // Кибернетика. 1978. № 4. С. 72–77.
11. Видео, модель метода погони на плоскости и в пространстве. URL: <https://youtu.be/PAu9Qg1dySM> (дата обращения: 16.01.2023).
12. Видео, модель параллельного сближения на плоскости. URL: <https://youtu.be/hGieKXNiuz8> (дата обращения: 16.01.2023).
13. Видео, модель параллельного сближения в пространстве. URL: <https://youtu.be/8nDUSi3ENB4> (дата обращения: 16.01.2023).
14. Видео, модель метода погони на поверхности. URL: https://youtu.be/sU724Db_VMk (дата обращения: 16.01.2023).
15. Видео, метод параллельного сближения на поверхности. URL: <https://youtu.be/06qgINE4j8U> (дата обращения: 16.01.2023).
16. Видео, модификация метода параллельного сближения. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qNXdykK21Z8> (дата обращения: 16.01.2023).
17. Видео, модификация метода погони. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=UQ5bVKjVqZ4> (дата обращения: 16.01.2023).

References

1. Isaacs R. Differential games: A mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization. New York: John Wiley and Sons; 1965. 384 p.
2. Krasovsky N. N., Subbotin A. I. Pozitsionnye differentsialnye igrы. Moscow: Nauka; 1974. 456 p. (In Russian).
3. Petrosyan L. A. Differential games of pursuit. Leningrad: Publishing House of Leningrad University; 1977. 232 p. (In Russian).
4. Khachumov M. V. Reshenie zadachi sledovaniia za tseliу avtonomnym letatelnyy apparatom. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2015;(2):45–52. (In Russian).
5. Khachumov M. V. Zadachi gruppovogo presledovaniia tseli v usloviakh vozmushchenii. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2016;(2):46–54. (In Russian).
6. Bannikov A. S. Some non-stationary problems of group pursuit. *Izvestiia Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013;1(41):3–46. (In Russian).
7. Abramyanys T. G., Maslov E. P., Yakhno V. P. Evasion of multiple target in three-dimensional space. *Automation and Remote Control*. 2008;(5):3–14. (In Russian).
8. Gusyatnikov P. B. The escape of a certain nonlinear object from several more inert pursuers. *Differentsialnye uravneniia*. 1976;12(2):213–226. (In Russian).
9. Gusyatnikov P. B. Differentsialnaia igra ubeganiia ot lits. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaiа kibernetika*. 1978;(6):22–32. (In Russian).
10. Gusyatnikov P. B. Differentsialnaia igra ubeganiia. *Cybernetics*. 1978;(4):72–77. (In Russian).
11. Video, model metoda pogoni na ploskosti i v prostanstve. URL: <https://youtu.be/PAu9Qg1dySM> (accessed: 16.01.2023). (In Russian).
12. Video, model parallelnogo sblizheniia na ploskosti. URL: <https://youtu.be/hGieKXNiuz8> (accessed: 16.01.2023). (In Russian).
13. Video, model parallelnogo sblizheniia v prostanstve. URL: <https://youtu.be/8nDUSi3ENB4> (accessed: 16.01.2023). (In Russian).
14. Video, model metoda pogoni na poverkhnosti. URL: https://youtu.be/sU724Db_VMk (accessed: 16.01.2023). (In Russian).
15. Video, metod parallelnogo sblizheniia na poverkhnosti. URL: <https://youtu.be/06qgINE4j8U> (accessed: 16.01.2023). (In Russian).
16. Video, modifikatsiia metoda parallelnogo sblizheniia. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qNXdykK21Z8> (accessed: 16.01.2023). (In Russian).

- | | |
|---|---|
| <p>18. Видео, результаты моделирования задачи преследования. URL: https://www.youtube.com/watch?v=NNJDJOJT34I (дата обращения: 16.01.2023).</p> | <p>17. Video, modifikatsiia metoda pogoni. URL: https://www.youtube.com/watch?v=UQ5bVKjVqZ4 (accessed: 16.01.2023). (In Russian).</p> <p>18. Video, rezultaty modelirovaniia zadachi presledovaniia. URL: https://www.youtube.com/watch?v=NNJDJOJT34I (accessed: 16.01.2023). (In Russian).</p> |
|---|---|

Информация об авторе

А. А. Дубанов – кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

A. A. Dubanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья
УДК 004.622
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-30-36

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Дмитрий Александрович Кузин^{1✉}, **Валерия Александровна Безуевская**²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ kuzin_da@surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7888-4094>

² bezuevskaya_va@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-0811>

Аннотация. В статье представлены задачи и этапы разработки информационной системы мониторинга региональных проектов и ее апробация в рамках реализации проекта в ХМАО-Югре по самоопределению и профессиональной ориентации обучающихся (<https://monitoring.surgut.digital>): концептуальный анализ предметной области, разработка архитектуры программного обеспечения, проектирование элементов пользовательского интерфейса, разработка алгоритмов, а также задачи развития функционала системы и перспектив ее масштабирования для расширения географии применения.

Ключевые слова: мониторинг проектов, система сбора данных, контрольная карта Шухарта, VueJS, Laravel, Postgres

Для цитирования: Кузин Д. А., Безуевская В. А. Информационная система мониторинга региональных проектов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 30–36. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-30-36.

Original article

INFORMATION SYSTEM FOR REGIONAL DRAFTS MONITORING

Dmitry A. Kuzin^{1✉}, **Valeriya A. Bezuevskaya**²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ kuzin_da@surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7888-4094>

² bezuevskaya_va@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-0811>

Abstract. The article presents the objectives and developmental stages of an information monitoring system for regional drafts and the system's testing through implementation of a draft for self-determination and career guidance of students in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra (<https://monitoring.surgut.digital>). This includes a concept analysis of the subject field, development of software architecture, design of a user interface elements, algorithms programming, and objectives to broaden the system's functions and prospects for its scaling in order to expand its geographical use.

Keywords: draft monitoring, data collection system, Shewhart control chart, VueJS, Laravel, Postgres

For citation: Kuzin D. A., Bezuevskaya V. A. Information system for regional drafts monitoring. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):30–36. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-30-36.

ВВЕДЕНИЕ

С 2021 г. в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (ХМАО) осуществляется системная работа по самоопределению и профессиональной ориентации обучающихся и молодежи [1], в рамках которой разработан

комплекс мероприятий, утвержденный постановлением Правительства ХМАО от 30.12.2021 № 634-п «О мерах по реализации государственной программы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры “Развитие образования”» [2]. Мероприятия, направленные

на ранний и осознанный выбор обучающимися будущей образовательной и профессиональной траектории, планируются и реализуются с учетом приоритетных и перспективных направлений экономики и социальной сферы ХМАО при участии предприятий и организаций, осуществляющих деятельность на территории региона, и в соответствии со Стратегией социально-экономического развития автономного округа до 2030 г.

Региональным центром (<https://модельный-центр.рф/>) по координации профориентационной работы в автономном округе приказом Департамента образования и науки ХМАО-Югры от 23.04.2019 № 548 определен Сургутский государственный университет (СурГУ).

После определения Департаментом образования и науки ХМАО ответственных от каждого муниципального образования за предоставление показателей и локальных отчетов Региональный центр с 2019 г. проводит регулярный ежегодный мониторинг для оценки результатов реализации профориентационной работы, включающий следующие этапы:

- внесение данных и агрегация их в одном массиве;
- анализ данных на уровне региона;
- разработка рекомендаций по корректировке профориентационной работы.

Наиболее трудоемким этапом мониторинга до 2022 г. был этап внесения значений показателей в электронную таблицу общего доступа и агрегации данных, поскольку используемая технология не позволяла разграничить полномочия доступа пользователей к отдельным разделам таблицы и не обеспечивала ее функциональность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2022 г. СурГУ согласно положению [3] приступил к разработке информационной системы «Мониторинг региональных проектов» (ИС), и в 2023 г. ИС была введена в эксплуатацию. Информационная система представляет собой веб-приложение с архитектурой SPA (Single Page Application) [4], клиентская часть которого реализована на языке JavaScript

с применением фреймворка VueJS 3 [5], а серверная – на языке PHP и фреймворка Laravel [6]. В качестве СУБД используется PostgreSQL. Концептуальная модель предметной области, лежащая в основе функционала ИС, имеет следующие характеристики:

- область деятельности, в которой осуществляется мониторинг, – региональные проекты;
- с каждым проектом ассоциируется определенное множество показателей (метрики);
- ввод данных происходит в соответствии с учетными периодами (ежегодно или с иной периодичностью);
- набор метрик, по которым происходит сбор данных для каждого учетного периода, может отличаться;
- значение метрики, измеряемое в относительных единицах, вычисляется как частное учетного значения и нормирующего значения, например, отношение количества учащихся 8–11-х классов, прошедших профориентационное тестирование (учетное значение), к общему количеству учащихся 8–11-х классов;
- наличие так называемых «бинарных» метрик, значение которых показывает выполнение или невыполнение показателя;
- сбор и агрегация данных на уровне муниципальных образований – городов и районов ХМАО, и связь каждого вводимого значения метрики с муниципальным образованием и учетным периодом;
- каждое учетное значение содержит комментарий пользователя, характеризующий динамику изменения показателя по отношению к предыдущему периоду и ее анализ;
- группирование метрик и треков по функциональности;
- «горизонтальное» разграничение полномочий пользователей: введение нормирующих метрик – для сотрудников Регионального центра; ввод данных по отдельным метрикам – для пользователей профильных учреждений муниципальных образований.

Полный список метрик и их описание приведены в методических рекомендациях [7]. Информационная модель данных системы приведена на рис. 1.

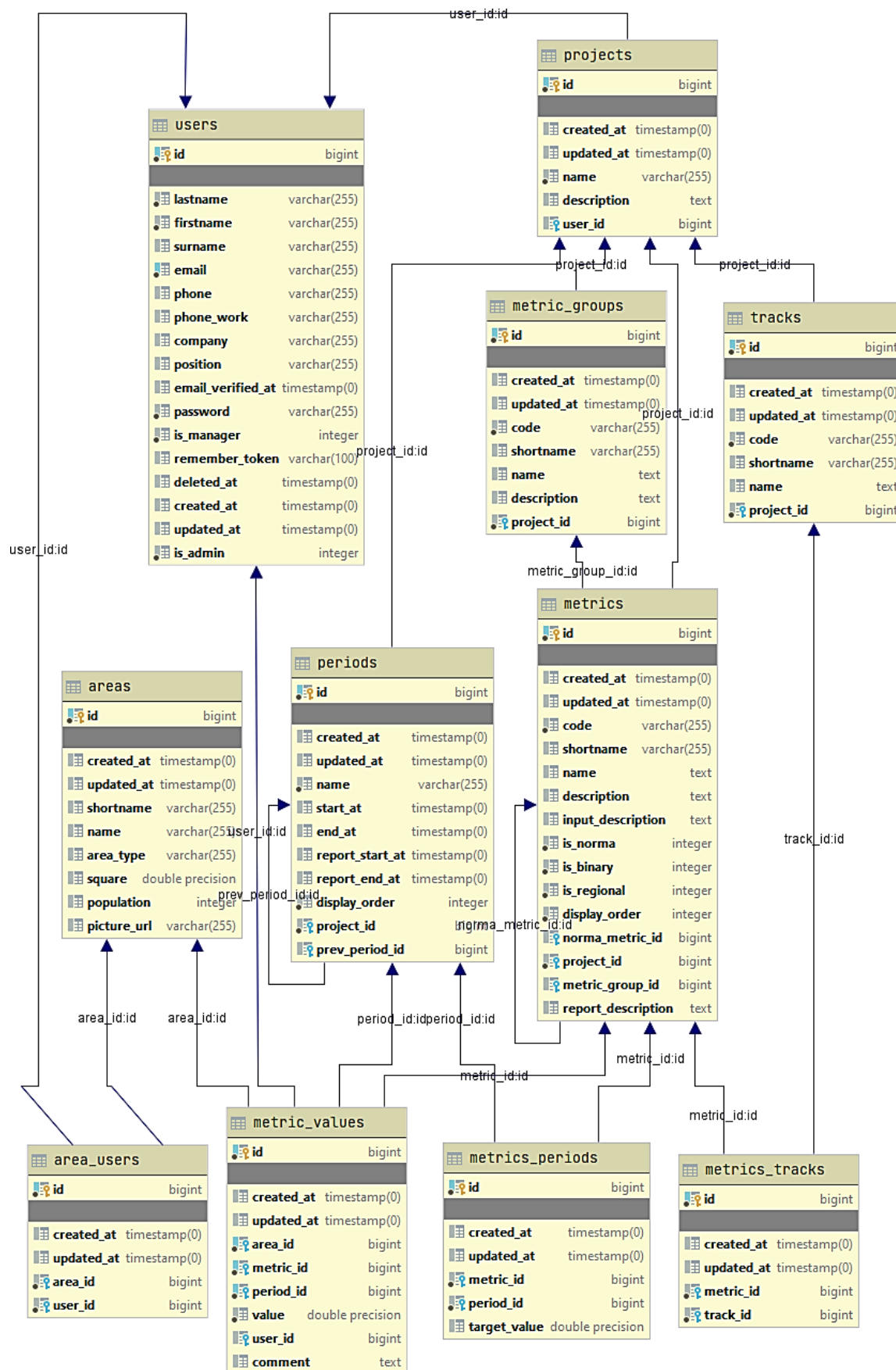


Рис. 1. Инфологическая модель данных
 Примечание: составлено авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Веб-интерфейс ИС доступен по адресу <https://monitoring.surgut.digital> (рис. 2). Глав-

ная страница представляет собой панель карточек проектов, на которых расположены основные элементы управления.

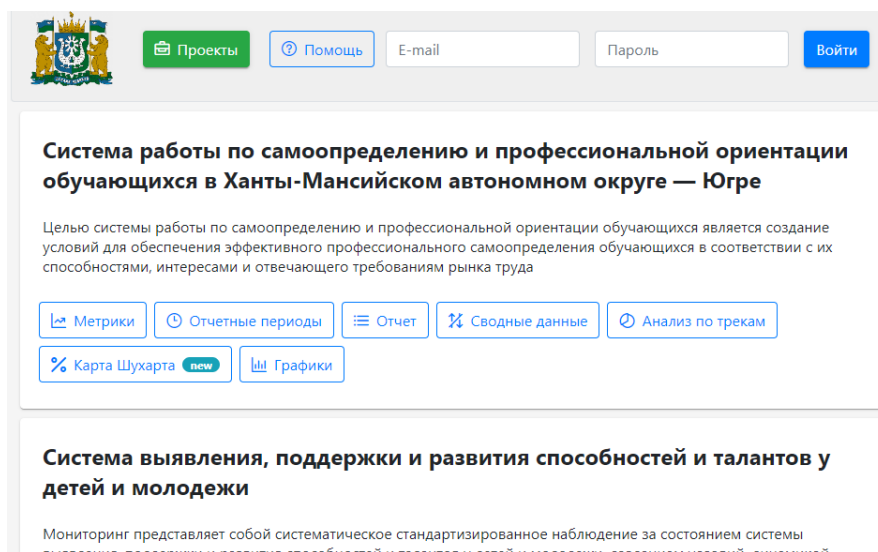


Рис. 2. Главная страница информационной системы мониторинга
Примечание: составлено авторами.

В открытой части (без аутентификации) пользователю доступен просмотр справочников метрик, учетных периодов, каталог данных, а также аналитические инструменты –

сравнительные диаграммы (рис. 3), анализ треков (рис. 4), сводные данные с динамикой показателей и контрольные карты Шухарта [8] (рис. 5).

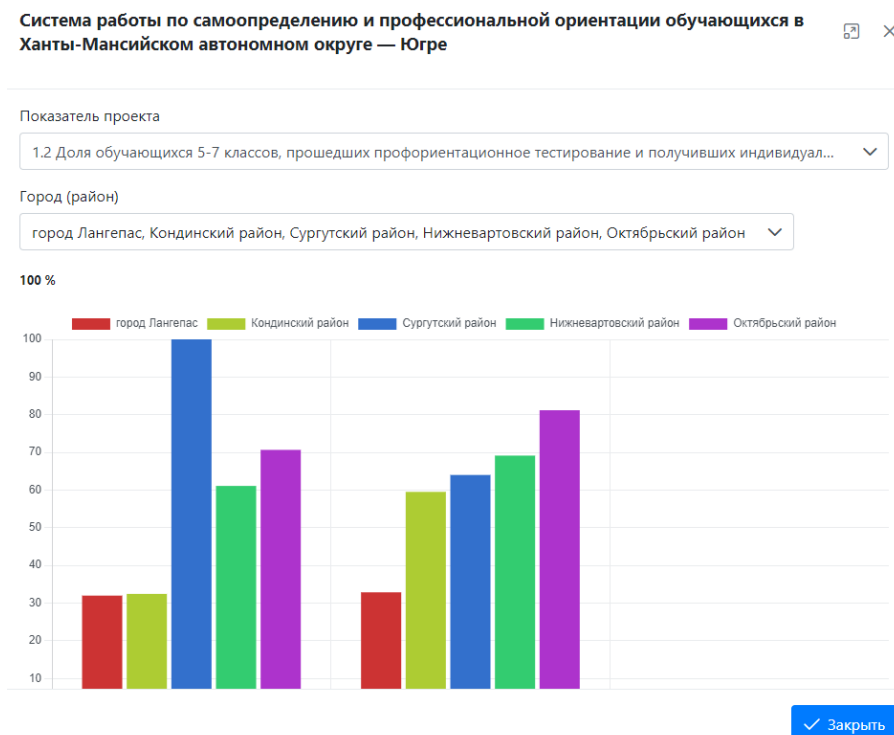


Рис. 3. Сравнительные диаграммы значений
Примечание: составлено авторами.

Трек (набор метрик)

Создание условий для совершения осознанного выбора дальнейшей траектории обучения выпускниками уровня ос... ▼

Города (районы) для анализа

Белоярский район, Берёзовский район, Кондинский район, Нефтеюганский район, Нижневартовский район, Октябрьский район

Построить диаграмму

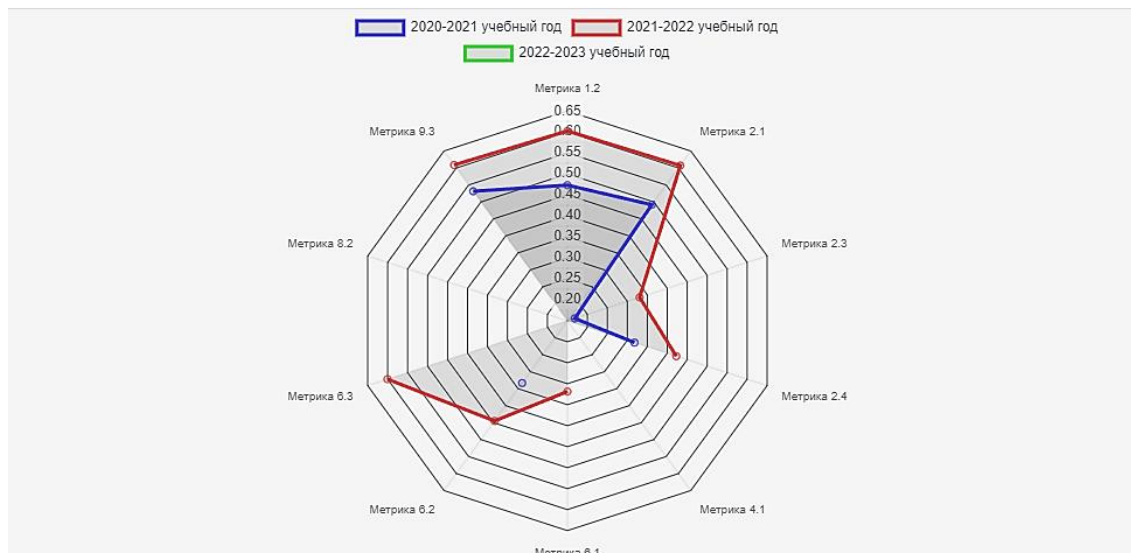


Рис. 4. Лепестковая диаграмма значений по трекам

Примечание: составлено авторами.

Система работы по самоопределению и профессиональной ориентации обучающихся в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре

Отчетный период

2021-2022 учебный год ▼

Показатель проекта

1.2 Доля обучающихся 5-7 кла... ▼

Построить карту

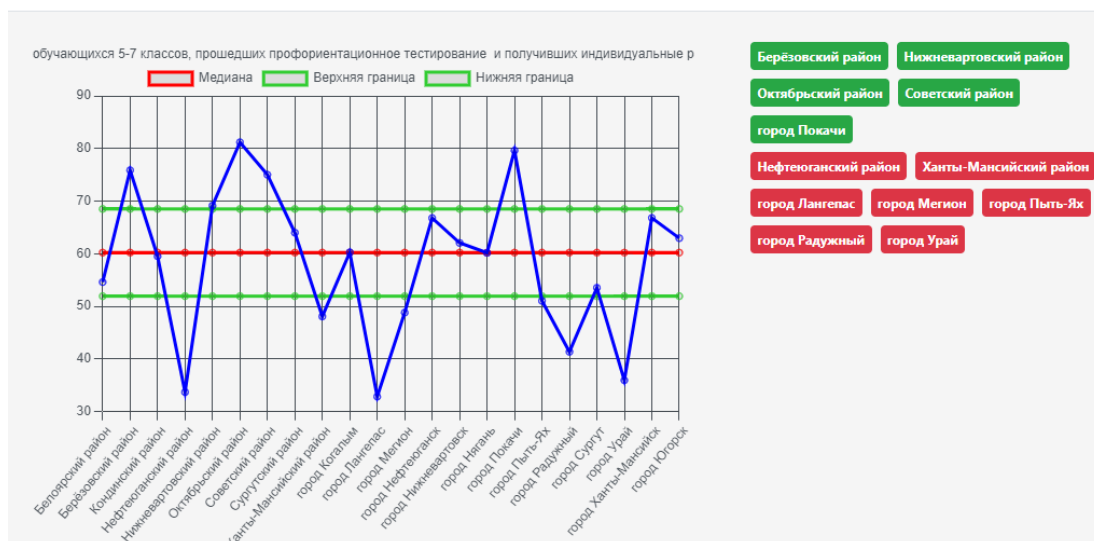


Рис. 5. Контрольная карта Шухарта

Примечание: составлено авторами.

После прохождения аутентификации пользователю становится доступен интерфейс для ввода данных, при этом как на стороне клиента, так и на стороне сервера осуществляется контроль доступности периода ввода значений и контроль полномочий пользователя (рис. 6).

При выборе метрики и вводе значения пользователю доступны данные о значении предыдущего периода, а также описание, поясняющее, что должен включать в себя текстовый комментарий, оценивающий причины полученной динамики изменения показателя.

1.1 Доля общеобразовательных учреждений, в которых проводится диагностика профессиональных склонностей обучающихся 8-11 классов

Нормирующий показатель: Вводимое значение: профессиональных склонностей

Значение предыдущего периода: 11

Нормирующее значение: 11 (100.00%)

Результатирующее значение: ОТСУТСТВУЕТ

Значение текущего периода: ОТСУТСТВУЕТ

Комментарий для анализа динамики изменения метрики относительно предыдущего периода:

Введите комментарий, анализирующий динамику изменения метрики относительно предыдущего периода. По значению и динамике показателя по сравнению с предыдущим годом проведите качественный анализ и оцените состояние работы по проведению диагностики профессиональных склонностей обучающихся 8-11 классов, подбору сфер профессиональной деятельности. В анализе необходимо учесть факторы, влияющие на значение показателя:

- компетентность руководителей образовательных организаций, несущих ответственность за организацию и проведения диагностических процедур;
- мотивация обучающихся к проводимым опросам, возможная их незаинтересованность;
- недостаточная информированность и заинтересованность родителей/законных представителей в участии их детей в данных исследованиях.

Введите значение метрики

Введите комментарий, анализирующий динамику изменения метрики относительно предыдущего периода.

Сохранить Закрыть

Рис. 6. Форма для ввода данных
Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работ внедрения и ввода в эксплуатацию информационной системы «Мониторинг региональных проектов» можно сделать следующие выводы:

1. Использование для сбора и анализа данных простых инструментов типа электронных таблиц оправданно в тех случаях, когда круг пользователей системы ограничен, в то время как для многопользовательских систем требуется разработка специализированных IT-решений с дополнительными инструментами контроля целостности и безопасности данных.

2. Ресурсы, затраченные на разработку специализированного IT-решения, компенсируются экономией времени на сбор и анализ данных за счет интуитивно-понятного интерфейса, учитывающего специфику предметной области.

3. Разработанная система может быть масштабирована на неограниченное количество

проектов с возможностью ее эксплуатации в других регионах РФ. Кроме того, поскольку проекты в области управления качеством образования реализуются по инициативе Министерства науки и высшего образования РФ, целесообразно внедрение такой системы с аналогичными задачами по агрегированию и анализу данных на федеральном уровне.

4. Система мониторинга региональных проектов находится в процессе постоянной доработки. В будущем интерфейс системы получит новые инструменты визуализации данных, функции автоматической генерации аналитических отчетов с использованием искусственного интеллекта, а также средства журнализации действий пользователей. Кроме того, будут внедрены инструменты обратной связи и автоматического уведомления пользователей о системных событиях.

Список источников

1. Методические рекомендации по развитию механизмов управления качеством образования. URL: <https://clck.ru/33Qq2c> (дата обращения: 25.02.2023).
2. План мероприятий («дорожная карта») по самоопределению и ранней профессиональной ориентации обучающихся ХМАО-Югры на 2021–2023 годы (прил. к приказу Депобразования и молодежи Югры от 27.09.2021 № 10-П-1303). URL: https://depobr.admhmao.ru/upload/iblock/24c/10_P_1303-ot-27.09.2021.pdf (дата обращения: 25.02.2023).
3. Положение о мониторинге степени сформированности и эффективности функционирования систем управления качеством образования органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, осуществляющих управление в сфере образования, по показателю «Система работы по самоопределению и профессиональной ориентации обучающихся» (прил. к приказу Депобразования и молодежи Югры от 20.05.2022 № 10-П-953) // Департамент образования и науки ХМАО-Югры : офиц. сайт. URL: <https://depobr.admhmao.ru/> (дата обращения: 25.02.2023).
4. Гардейчик С. М., Шербаф А. И. SPA-архитектура мультифункционального веб-приложения // Вести БГПУ. Серия 3. Физика. Математика. Информатика. Биология. География. 2018. № 3. С. 85–91.
5. Прогрессивный JavaScript-фреймворк VueJS. URL: <https://v3.ru.vuejs.org> (дата обращения: 25.02.2023).
6. Laravel. URL: <https://laravel.com> (дата обращения: 25.02.2023).
7. Методические рекомендации для специалистов ОМСУ, курирующих подготовку аналитического отчета о системе работы по самоопределению и профессиональной ориентации обучающихся (прил. 1 к письму Депобразования и науки Югры). URL: <https://clck.ru/34cqdt> (дата обращения: 25.02.2023).
8. Контрольные карты Шухарта как способ контроля бизнес-процессов // Loginom Company : офиц. сайт. URL: <https://loginom.ru/blog/shewhart-control-shart> (дата обращения: 25.02.2023).

Информация об авторах

Д. А. Кузин – кандидат технических наук, доцент.

В. А. Безуевская – кандидат педагогических наук, доцент, проректор по развитию.

References

1. Methodical guidelines on developing the managing mechanisms for quality of education. URL: <https://clck.ru/33Qq2c> (accessed: 25.02.2023). (In Russian).
2. Plan of measures (“road map”) for self-determination and early career guidance of students in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra for 2021–2023 (appendix to the Order of the Department of Education and Youth of Ugra of September 27, 2021 No. 10-P-1303). URL: https://depobr.admhmao.ru/upload/iblock/24c/10_P_1303-ot-27.09.2021.pdf (accessed: 25.02.2023). (In Russian).
3. Regulation on monitoring the level of development and effectiveness of functioning of systems for management of quality of education used by the local self-government bodies of urban districts and municipal districts of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, which are in charge of educational management, according to the indicator “System of work on self-determination and career guidance of students” (appendix to the Order of the Department of Education and Youth of Ugra of May 20, 2022 No. 10-P-953). Department of Education and Youth of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra: official web-site. URL: <https://depobr.admhmao.ru/> (accessed: 25.02.2023). (In Russian).
4. Gardeychik S. M., Sherbaf A. I. SPA-architecture of a multifunctional web-application. *BSPU Bulletin. SERIES 3. Physics. Mathematics. Informatics. Biology. Geography.* 2018;(3):85–91. (In Russian).
5. The progressive JavaScript framework VueJS. URL: <https://v3.ru.vuejs.org> (accessed: 25.02.2023). (In Russian).
6. Laravel. URL: <https://laravel.com> (accessed: 25.02.2023).
7. Methodical guidelines for specialists working at a local self-government body who are in charge of compiling an analytical report on a working system of self-determination and career guidance of students (appendix No. 1 to the letter of the Department of Education and Science of Ugra). URL: <https://clck.ru/34cqdt> (accessed: 25.02.2023). (In Russian).
8. Kontrolnye karty Shukharta kak sposob kontrolya biznes-protseessov. Loginom Company: official web-site. URL: <https://loginom.ru/blog/shewhart-control-shart> (accessed: 25.02.2023). (In Russian).

Information about the authors

D. A. Kuzin – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

V. A. Bezuevskaya – Candidate of Sciences (Education), Docent, Vice-Rector for Development.

Научная статья

УДК 620.197.5:622.692.4.053

DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-37-45

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

Юрий Борисович Попов^{1✉}, Гордей Петрович Давыдюк²,
Ксения Юрьевна Попова³, Алиса Андреевна Белагина⁴

^{1,2,3,4} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

¹ iurii.b.popov@tusur.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² dgp@bs.tom.ru

³ dku81@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0524-4780>

⁴ elisperova@mail.ru

Аннотация. В статье представлены технические решения по созданию системы беспроводного считывания параметров состояния катодной защиты магистральных газопроводов, направленные на повышение уровня автоматизации контроля параметров состояния их коррозионной защиты с учетом существующих методик и действующих регламентов обслуживания трубопроводов.

Ключевые слова: система катодной защиты, контрольно-измерительный пункт, мониторинг состояния, беспроводное оборудование, бесконтактный съем данных

Для цитирования: Попов Ю. Б., Давыдюк Г. П., Попова К. Ю., Белагина А. А. Контроль параметров состояния катодной защиты магистральных трубопроводов с использованием беспроводного доступа // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 37–45. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-37-45.

Original article

WIRELESS MONITORING OF PARAMETERS OF CATHODE PROTECTION FOR GAS TRANSMISSION PIPELINES

Yuri B. Popov^{1✉}, Gordey P. Davydyuk², Kseniya Yu. Popova³, Alisa A. Belagina⁴

^{1,2,3,4} Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

¹ iurii.b.popov@tusur.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² dgp@bs.tom.ru

³ dku81@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0524-4780>

⁴ elisperova@mail.ru

Abstract. The article presents engineering solutions for creating a wireless system for data sampling of cathode protection for gas transmission pipelines. These aim at advancing level of automated monitoring of parameters of corrosion protection using existing methods and regulations on pipelines maintenance in force.

Keywords: cathode protection system, control measuring station, state monitoring, wireless equipment, non-contact data sampling

For citation: Popov Yu. B., Davydyuk G. P., Popova K. Yu., Belagina A. A. Wireless monitoring of parameters of cathode protection for gas transmission pipelines. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):37–45. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-37-45.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время магистральные трубопроводы являются наиболее удобным и распространенным средством транспортировки

углеводородов на большие расстояния. Традиционно в нефтяной и газовой отрасли для изготовления магистральных трубопроводов высокого давления используются

специальные высокопрочные сорта стали. При этом общим недостатком стальных труб является их подверженность коррозии и, как следствие, преждевременное разрушение магистралей, что грозит утечкой транспортируемого продукта и влечет за собой значительные экономические потери (прямые и косвенные). Для предупреждения разрушения трубопроводов применяются различные методы защиты [1, 2]. В частности, изделия покрываются изоляцией: битумом, эмалью либо специальной пленкой. Кроме этого, применяют различные методы электрохимической защиты [3–6]. В настоящее время широкое применение нашла методика на основе катодной защиты, которая реализуется путем создания на заданном участке трубопровода отрицательного электрического потенциала. Такой подход значительно снижает риски аварий на трубопроводах, однако для ее эффективного функционирования необходим непрерывный автоматический контроль определенных параметров [7–10]. Особенностью задач мониторинга в нефтегазовой отрасли является огромная территориальная распределенность транспортной сети трубопроводов. Подобный масштаб распределенных сетей существует лишь в электроэнергетике, где передача данных телеметрии о состоянии систем обычно привязана к существующей инфраструктуре связи, что позволяет использовать для передачи показаний в центр обработки (диспетчерский пункт) местные проводные и беспроводные сети (Internet, GSM и т. п.), а также технологические средства передачи данных непосредственно по линиям электропередач.

Очевидно, что в нефтегазовой отрасли процесс непрерывного автоматического контроля и сбора параметров состояния системы катодной защиты трубопровода [7] может быть реализован в районах, где для передачи данных существует один из вариантов системы связи:

- возможность подключения к волоконно-оптической линии связи (корпоративной или арендованной у внешнего оператора);
- наличие технологической радиорелейной линии связи для передачи данных вдоль трубопровода;

- покрытие беспроводной сетью мобильной связи внутрикорпоративной или внешнего провайдера;

- использования оборудования дорогостоящей спутниковой связи при обоснованной экономической целесообразности.

В противном случае, в труднодоступных местах прокладки трубопроводов (таежных, болотистых), где отсутствуют вышеперечисленные элементы инфраструктуры связи, решение задач мониторинга является проблематичным. При этом сбор данных о состоянии катодной защиты выполняется непосредственно инженерно-техническим персоналом, контактным методом периодически в соответствии с установленным регламентом.

На практике система состоит из множества станций катодной защиты (СКЗ) [9, 11]. Блоки с оборудованием СКЗ (БСКЗ-Э), располагаются вдоль магистрального трубопровода на расстоянии ~15 км друг от друга. СКЗ подключены к линиям электропередачи и с помощью встроенного источника постоянного напряжения создают защитный отрицательный потенциал на поверхности трубы. Более детально методика представлена в [5, 6].

Одновременно с оборудованием защиты в БСКЗ-Э размещено оборудование, обеспечивающее мониторинг и передачу данных телеметрии в центр обработки и контроля. Очевидно, что текущий контроль обеспечивается точно с линейным интервалом 15 км. Детализация распределения защитного потенциала от СКЗ вдоль трубопровода обеспечивается с помощью стоек контрольно-измерительных пунктов (КИП), которые устанавливают по трассе с интервалом 1,0 км.

Для измерений значений защитного потенциала [6–8] в стойках КИП предусмотрен щиток с клеммами, к которым подключают катодный вывод от магистрального трубопровода, а также кабели анодного электрода и электрических перемычек. Следует уточнить, что в составе КИП не предусмотрено штатное оборудование для передачи контрольных данных в центр обработки по каналам связи, поэтому контроль показателей системы катодной защиты осуществляется обслуживающим персоналом вручную контактным способом с использованием специали-

зированных измерительных приборов [3, 5, 11]. Измерения выполняются регулярно, в соответствии с регламентом обслуживания, независимо от сезона, текущих температурных и погодных условий. Для этого осуществляются плановые выезды персонала службы ЭХЗ вдоль трассы трубопровода на транспорте повышенной проходимости с остановками около каждого КИП для проведения измерений и контрольных записей. Очевидно, что процесс сбора данных является трудоемким, затратным, сопряженным с рисками для здоровья и жизни персонала, и требует модернизации способа измерений и обеспечения бесконтактного (беспроводного) сбора, а также передачи данных от КИП в центр обработки [12–16].

Патентный поиск и анализ первоисточников показал, что технического решения для поставленной задачи пока не существует, поэтому научные и технические исследования в этом направлении следует считать актуальными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи предлагается использовать технический подход, обеспечивающий автоматизированные измерения параметров состояния катодной защиты при отсутствии общедоступных телекоммуникационных сетей [14–16]. Предлагаемая система мониторинга использует беспроводное подключение к КИП посредством мобильного (носимого) устройства сбора данных. При этом на КИП устанавливается дополнительное стационарное устройство, обеспечивающее регулярное измерение требуемых параметров состояния катодной защиты, их хранение и структурирование перед непосредственной передачей на мобильное устройство. Передача данных осуществляется с помощью локальных радиомодулей по запросу мобильного устройства на основе разработанных алгоритмов и методик.

Предложенный подход обеспечивает решение следующих задач:

- обслуживающий персонал освобождается от необходимости подходить к КИП и снимать показания с датчиков КИП контактным способом;

- происходит автоматическая передача накопленной информации при приближении мобильного устройства сбора данных к КИП на расстояние менее 300 м.

Прием персоналом данных от КИП из транспортного средства – практически «на проходе», в автоматическом или полуавтоматическом режиме минимизирует и в идеале исключает человеческий фактор, влияющий на корректность измерений, и одновременно снижается влияние погодных условий как на процесс измерения, так и на его периодичность.

Следующий немаловажный аспект – это хранение в мобильном (носимом) устройстве данных, полученных от каждого КИП обслуживаемого участка трубопровода. Процесс соединения, взаимной идентификации устройств и считывание информации выполняется автоматически при приближении носимого устройства к очередному КИП на расстояние менее 300 м.

В случае корректного соединения и идентификации мобильное устройство выдает разрешение на передачу данных от стационарного устройства КИП. В процессе сеанса связи устройства обмениваются информацией несколько раз с целью минимизации ошибки передачи данных. При этом мобильное устройство сбора обеспечивает сохранность и доступность измерений, полученных в течение установленного периода, и их обновление.

Предполагается, что в стационарном и мобильном устройствах должен присутствовать алгоритм шифрования данных, что обусловлено требованиями и регламентами потенциального заказчика. В частных случаях этот процесс может быть упрощен и сведен к алгоритмам аутентификации и идентификации.

По завершении передачи накопленных за контрольный период данных сеанс связи разрывается и стационарное устройство КИП переходит в режим дальнейших измерений, а мобильный прибор систематизирует и сохраняет данные в определенном формате.

Проверку качества данных и работоспособности оборудования может осуществлять технический персонал отбором данных с КИП

контактным способом, и даже при этом минимизируется количество затрачиваемых ресурсов, в т. ч. часы наработки техники, расход горючего, а также общее время прохождения маршрута при предварительной загрузке в память мобильного устройства списка и координат обслуживаемых КИП, чтобы специальный алгоритм позиционирования самостоятельно определил момент инициации сеанса связи и протокола сбора данных.

После передачи данных на сервер выполняется аналитическая обработка, по результатам которой в графическом и табличном форматах можно проводить анализ измерений, динамики изменений для произвольного временного интервала, выполнять диагностику и прогнозировать состояние выбранного участка трубопровода.

Рассмотрим общую структурную схему системы беспроводного считывания параметров состояния СКЗ. Комплект оборудования состоит из стационарной и мобильной части (рис. 1). Стационарная часть оборудования, или наземное устройство, устанавливается

непосредственно в стойке КИП. Основным элементом схемы является Процессор 1, который управляет всей работой наземного оборудования. С его помощью аналоговые сигналы с датчиков системы катодной защиты поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), преобразуются в цифровую форму, упорядочиваются, структурируются и накапливаются в требуемом формате в энергонезависимой памяти устройства. Период измерений определяется принятым регламентом обслуживания либо программируется в соответствии с текущими требованиями. Блок часов реального времени определяет дату и время, что позволяет выполнить временную привязку текущих измерений. Приемо-передающее устройство осуществляет прием сигналов запроса и управления от мобильного устройства, а также передачу на мобильное устройство файла с данными, накопленными в энергонезависимой памяти. Алгоритм приема и передачи данных описан выше.

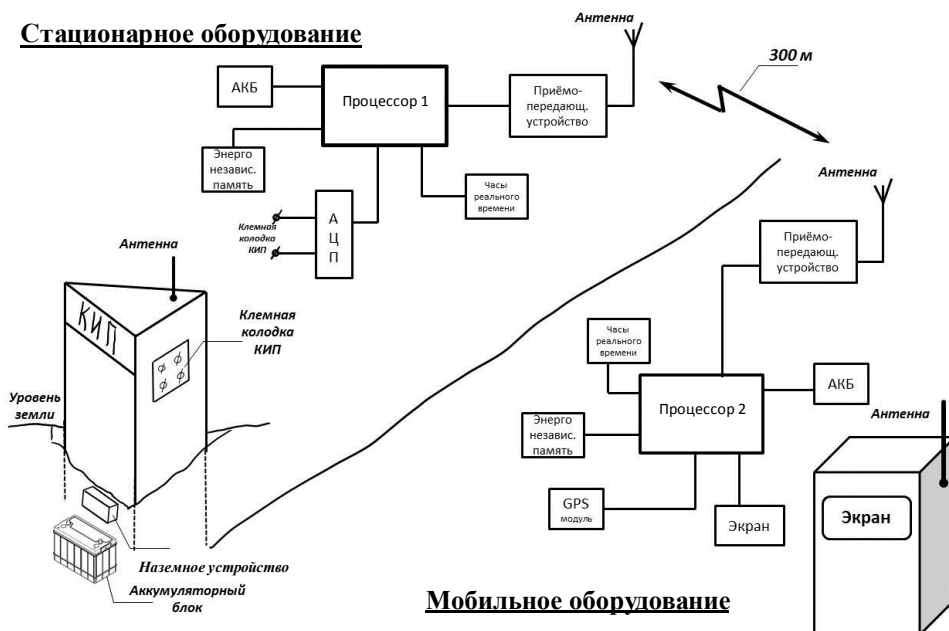


Рис. 1. Структурная схема системы беспроводного считывания данных станции катодной защиты

Примечание: составлено авторами.

Электропитание стационарного комплекта оборудования осуществляется от аккумуляторных батарей (АКБ). Поскольку оборудование должно функционировать непрерывно

в течение продолжительного времени (не менее 6 месяцев) в широком диапазоне погодных условий и температур, выбор источника питания является достаточно серьезной тех-

нической задачей и требует специальной проработки.

Мобильное устройство состоит из Процессора 2, GPS-модуля, приемо-передающего устройства, съемной карты энергонезависимой памяти, блока часов реального времени. Процессор 2 управляет работой всех элементов, входящих в состав мобильного оборудования, и реализует алгоритм считывания данных со стационарного оборудования ближайшего КИП в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Модуль GPS позволяет контролировать текущие координаты мобильного устройства. На основе этих данных Процессор 2 рассчитывает текущее расстояние до очередного КИП и инициирует процедуру считывания данных. Использование съемной карты SD-памяти обусловлено удобством переноса полученных измерений на сервер обработки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе предложенного подхода к беспроводному считыванию данных СКЗ собран макет, реализующий структурную схему рис. 1. Внешний вид стационарного и мобильного устройств представлен на рис. 2. На фотографии запечатлен момент опытной демонстрации передачи измерений защитного потен-

циала со стойки КИП на блок мобильного устройства. Видно, что стационарный блок подключен к клеммам стойки КИП, а на индикаторе мобильного устройства отображается измеренное значение. Комплект обеспечивает периодическое измерение текущего значения защитного потенциала на стороне стационарного устройства (блока передатчика). Измерения выполняются путем контактного съема, предварительно обрабатываются и записываются в энергонезависимую память (SD-карта), с целью формирования пакета накопленных данных для последующей передачи на мобильное устройство (устройство приема). В свою очередь, устройство приема иерархически, в соответствии с идентификатором пунктов КИП, систематизирует накопленные пакеты для дальнейшей передачи в центр обработки. Следует отметить, что в конкретном случае (рис. 2) мобильный блок оставался неподвижным.

Дальнейшие предварительные исследования проводились в реальных условиях при движении носителя макета по открытой пересеченной местности, а также в зоне лесополосы. Во время исследований мобильное устройство было закреплено на корпусе транспортного средства на уровне ~1,5 м от поверхности земли.



Рис. 2. Внешний вид мобильного и стационарного устройств

Примечание: составлено авторами.

Суть эксперимента заключалась в определении условно максимальной дальности

действия приемо-передатчиков мобильного и стационарного устройств. В качестве приемо-

передающего элемента был выбран радиомодуль NRF24L01 + PA LNA [17], работающий на частоте 2,4 ГГц и использующий для обмена данными собственный протокол.

На рис. 3 показан район проведения экспериментальных исследований. Отметка 1 на карте соответствует GPS-координатам

56.529073 СШ, 84.731658 ВД, отметка 3 – координатам 56.536348 СШ, 84.716974 ВД. Участки маршрута движения транспортного средства (носителя приемного устройства) обозначены точками (1–2), (3–4) и (3–5). Характеристики участков и условия проведения измерений сведены в табл. 1.

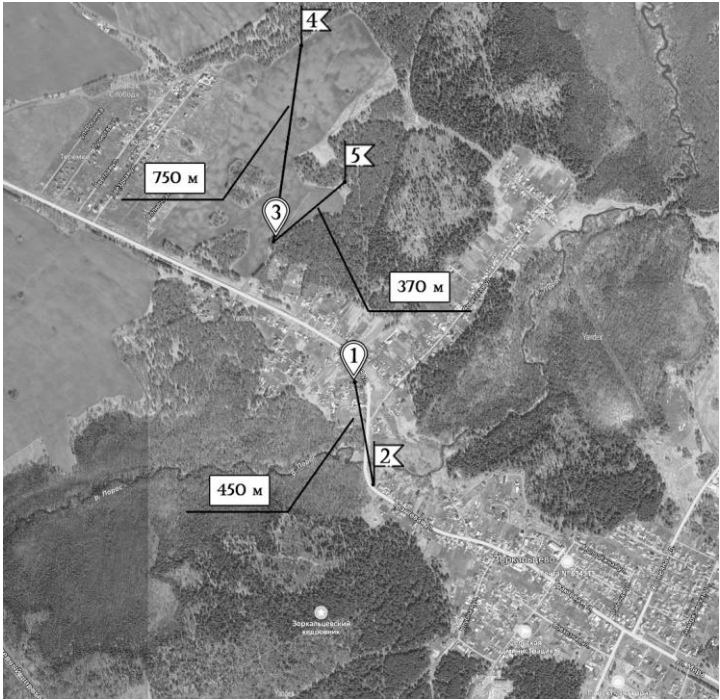


Рис. 3. Карта участка местности проведения испытаний
Примечание: составлено авторами.

Коэффициент потерь в табл. 1 определяет качество передачи данных на соответствующей трассе. Коэффициент рассчитывается

как отношение принятых последовательных пакетов к общему числу переданных, выраженное в процентах.

Таблица 1

Условия и результаты проведения измерений

Приемник, № точки	Передатчик, № точки	Внешние условия	Дополнительные условия	Дальность, м	Коэффициент потерь (макс.), %
1	2	Деревенская застройка	Измерения при движении приемника	10–400	3
1	2	Деревенская застройка	Передатчик и приемник неподвижны	450	1
3	4	Поле – Поле	Передатчик и приемник неподвижны	550	5
3	4	Поле – Поле	Измерения при движении приемника	550–630	20
3	4	Поле – Поле	Передатчик и приемник неподвижны	750	15
3	5	Поле – Редкая лесополоса	Передатчик и приемник неподвижны	250	1

Окончание табл. 1

Приемник, № точки	Передатчик, № точки	Внешние условия	Дополнительные условия	Дальность, м	Коэффициент потерь (макс.), %
3	5	Поле – Редкая лесополюса	Измерения при движении приемника	250–320	10
3	5	Поле – Редкая лесополюса	Передатчик и приемник неподвижны	370	40

Примечание: составлено авторами.

Для выбранной элементной базы при использовании штыревой антенны при всех условиях испытания была обеспечена стабильная дальность действия от 300 до 600 м в условиях открытых участков, и до 300 м – в условиях лесополюсы. Таким образом, результаты эксперимента демонстрируют возможность использования выбранной конструкции для последующей разработки прототипа и его испытаний в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В процессе исследований был разработан подход к созданию системы беспроводного считывания параметров состояния катодной защиты магистральных трубопроводов в условиях отсутствия общедоступных сетей связи.

2. Выполнено макетирование комплекта оборудования, обеспечивающего периодическое измерение текущего значения защитного

потенциала, оцифровку и накопление данных, бесконтактное считывание и передачу в центр обработки.

3. Проведены предварительные экспериментальные исследования разработанного макета.

4. Результаты экспериментов подтвердили возможность практической реализации предложенного подхода и его применения для задач мониторинга системы катодной защиты магистральных трубопроводов.

Дальнейшее развитие подхода следует рассматривать в конструкторской доработке устройств, выборе элементной базы, обеспечивающей энергосбережение при работе стационарных устройств, разработке прикладного программного обеспечения для процессоров и надежной реализации алгоритма считывания данных, а также разработке алгоритмов обработки данных.

Список источников

1. Рахманкулов Д. Л., Кузнецов М. В., Габитов А. И. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций. Том 1. Катодная защита густоразветвленной сети подземных трубопроводов. Уфа : Реактив, 1999. 231 с.
2. Рахманкулов Д. Л., Кузнецов М. В., Гафаров Н. А. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций. Том 2. Электрохимическая защита от коррозии в примерах и расчетах. Уфа : Реактив, 2003. 160 с.
3. ОРИОН ИП-01 – измеритель потенциалов цифровой. URL: https://www.electronpribor.ru/catalog/440/orion_ip-01.htm (дата обращения: 20.01.2023).
4. Никулин С. А., Карнавский Е. Л., Воробьев А. Н. Разработка методики оценки состояния изоляционного покрытия участка нефтегазопровода // Территория Нефтегаз. 2020. № 1–2. С. 38–44.
5. СТО Газпром 9.2-003-2009. Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений. URL: <https://samara-tr.gaz>

References

1. Rakhmankulov D. L., Kuznetsov M. V., Gabitov A. I. Sovremennye sistemy zashchity ot elektrokhimicheskoi korrozii podzemnykh kommunikatsii. Vol. 1. Katodnaia zashchita gustorazvetvlennoi seti podzemnykh truboprovodov. Ufa: Reaktiv; 1999. 231 p. (In Russian).
2. Rakhmankulov D. L., Kuznetsov M. V., Gafarov N. A. Sovremennye sistemy zashchity ot elektrokhimicheskoi korrozii podzemnykh kommunikatsii. Vol. 2. Elektrokhimicheskaya zashchita ot korrozii v primerakh i raschetakh. Ufa: Reaktiv; 2003. 160 p. (In Russian).
3. ORION IP-01 – izmeritel potentsialov tsifrovoy. URL: https://www.electronpribor.ru/catalog/440/orion_ip-01.htm (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
4. Nikulin S. A., Karnavsky E. L., Vorobyev A. N. Development of a method for assessment the state of the insulation coating of the oil and gas pipeline section. *Territoriia Neftegaza*. 2020;(1–2):38–44. (In Russian).
5. STO (Company Standard) Gazprom 9.2-003-2009. Corrosion protection. Design of cathode protection

- prom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf?ysclid=liwm0h39gr422242089 (дата обращения: 20.01.2023).
6. Защита трубопровода от коррозии. URL: https://www.kzit.ru/company/articles/zashchita_truboprovoda_ot_korrozii/?ysclid=liwm829ttf225810620 (дата обращения: 20.01.2023).
 7. Бабков А. В., Лапшин В. В. Автоматизированная система мониторинга и управления станций катодной защиты магистральных нефтепроводов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 5. С. 6–8.
 8. Ларкин Е. В., Панарин М. В. Система сбора информации о состоянии станций катодной защиты газопроводов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 2–2. С. 143–147.
 9. Автоматизированная система контроля станций катодной защиты водопровода с использованием радиомодемов «Невод». URL: <https://www.geolink.ru/blog/avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-stancij-katodnoj-zaschity-vodoprovoda-s-ispolz-zovaniem-radiomodemo-nevod.html?ysclid=liwm9am1nc68253595> (дата обращения: 20.01.2023).
 10. Бушмелев П. Е. Беспроводная сенсорная телекоммуникационная система контроля утечек метана из магистралей газотранспортной сети : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 24 с.
 11. Распопов Е. В., Юнусов А. Р., Балахонцев В. Е. и др. Устройство измерения потенциалов электрохимической защиты : патент 2308703C2 Рос. Федерация № 2005104200/28 ; заявл. 16.02.2005 ; опубл. 20.10.2007. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2308702C2_20071020.pdf (дата обращения: 20.01.2023).
 12. Пужайло А. Ф., Кривдин А. Ю., Вититнев О. Ю. и др. Устройство бесконтактного измерения тока катодной защиты : патент 2379673C1 Рос. Федерация № 2008130265/28 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 20.01.2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379673C1_20100120.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
 13. Голдобина Л. А., Гусев В. П., Попова Е. С. и др. Способ измерения поляризационного потенциала металлических подземных сооружений без отключения станции катодной защиты : патент 2461842C2 Рос. Федерация № 2010145924/28 ; заявл. 10.11.2010 ; опубл. 20.09.2012. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2461842C2_20120920.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
 14. Баженов А. В., Малыгин С. В., Федоренко В. В. и др. Способ мониторинга внутренних коррозионных изменений магистрального трубопровода и устройство для его осуществления : патент 2514822C2 Рос. Федерация № 2012125083/06 ; заявл. 15.06.2012 ; опубл. 10.05.2014. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2514822C2_20140510.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
 15. Костенко Ю. А., Петрушов Ю. Ю., Выхованец А. Ю. Устройство дистанционного контроля параметров ЭХЗ : патент 94017U1 Рос. Федерация № 2010100371/22 ; заявл. 30.12.2009 ; опубл. 10.05.2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU94017U1_20100510.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
 - for underground structures. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf?ysclid=liwm0h39gr422242089> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
 6. Zashchita truboprovoda ot korrozii. URL: https://www.kzit.ru/company/articles/zashchita_truboprovoda_ot_korrozii/?ysclid=liwm829ttf225810620 (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
 7. Babkov A. V., Lapshin V. V. An automated control and monitoring system for cathodic protection stations of oil-trunk pipelines. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2007;(5):6–8. (In Russian).
 8. Larkin E. V., Panarin M. V. Sistema sbora informatsii o sostoianii stantsii katodnoi zashchity gazoprovodov. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2010;(2–2):143–147. (In Russian).
 9. Avtomatizirovannaja sistema kontrolja stantsij katodnoj zashchity vodoprovoda s ispolzovaniem radiomodemo “Nevod”. URL: <https://www.geolink.ru/blog/avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-stancij-katodnoj-zaschity-vodoprovoda-s-ispolz-zovaniem-radiomodemo-nevod.html?ysclid=liwm9am1nc68253595> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
 10. Bushmelev P. E. Besprovodnaia sensornaia telekommunikatsionnaia sistema kontrolja utechk metana iz magistralei gazotransportnoi seti. Extended abstract of Cand. Sci. (Engineering) Thesis. Moscow; 2014. 24 p. (In Russian).
 11. Raspopov E. V., Yunusov A. R., Balakhontsev V. E. et al. Device for measuring potentials of electrochemical corrosion protection. RU Patent 2308703C2 No. 2005104200/28, filed February 16, 2005, issued October 20, 2007. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2308702C2_20071020.pdf (accessed: 20.01.2023). (In Russian).
 12. Puzhailo A. F., Krivdin A. Yu., Vititnev O. Yu. et al. Device contactless measurement of cathode protection current. RU Patent 2379673C1 No. 2008130265/28, filed July 21, 2008, issued January 20, 2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379673C1_20100120.pdf (accessed: 15.03.2023). (In Russian).
 13. Goldobina L. A., Gusev V. P., Popova E. S. et al. Method of polarisation potential of metallic subsurface structures without switching off cathodic protection station. RU Patent 2461842C2 No. 2010145924/28, filed November 10, 2010, issued September 20, 2012. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2461842C2_20120920.pdf (accessed: 15.03.2023). (In Russian).
 14. Bazhenov A. V., Malygin S. V., Fedorenko V. V. et al. Method to monitor internal corrosive changes of manifold pipeline and device for its realization. RU Patent 2514822C2 No. 2012125083/06, filed June 15, 2012, issued May 10, 2014. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2514822C2_20140510.pdf (accessed: 15.03.2023). (In Russian).
 15. Kostenko Yu. A., Petrushov Yu. Yu., Vykhovnets A. Yu. Device for remote monitoring of cathode

16. Исаев А. В., Востриков А. Е. Система дистанционного контроля состояния подземных трубопроводов : патент 2701706C1 Рос. Федерация № 2019102626 ; заявл. 30.01.2019 ; опубл. 30.09.2019. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2701706C1_20190930.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
17. Радиомодуль NRF24L01. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/radio-modul-nrf24l01/> (дата обращения: 20.01.2023).
16. protection characteristics. RU Patent 94017U1 No. 2010100371/22, filed December 30, 2009, issued May 10, 2010. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU94017U1_20100510.pdf (accessed: 15.03.2023). (In Russian).
16. Isaev A. V., Vostrikov A. E. System for remote monitoring of underground pipelines state. RU Patent 2701706C1 No. 2019102626, filed January 30, 2019, issued September 30, 2019. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2701706C1_20190930.pdf (accessed: 15.03.2023). (In Russian).
17. Radiomodul NRF24L01. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/radio-modul-nrf24l01/> (accessed: 20.01.2023). (In Russian).

Информация об авторах

Ю. Б. Попов – кандидат технических наук, доцент.
Г. П. Давыдюк – аспирант.
К. Ю. Попова – кандидат физико-математических наук, доцент.
А. А. Белагина – магистрант.

Information about the authors

Yu. B. Popov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.
G. P. Davydyuk – Postgraduate.
K. Yu. Popova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.
A. A. Belagina – Master's Degree Student.

Научная статья
УДК 004.9:62-83:621.313.3
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Никита Юрьевич Саввин^{1✉}, Дмитрий Денисович Гарбузов²

^{1,2} Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

¹ n-savvin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6379-6825>

² BSTU-Belgorod@yandex.ru

Аннотация. Представлены этапы разработки и построения математической модели полупроводникового преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией, включающей силовую цепь на основе силовых полупроводниковых элементов, в программной среде математического моделирования MATLAB/Simulink. Сформулированы основные принципы работы составляющих элементов модели и приведены расчетные данные для построения функциональной системы управления силовыми ключами преобразователя частоты на основании диаграмм переключения. По результатам моделирования получены осциллограммы фазных и линейных напряжений на нагрузке. Выявлены зависимости качества выходного напряжения от частоты широтно-импульсной модуляции, сформулированы основные преимущества использования пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции при формировании синусоид выходного напряжения преобразователя частоты при работе на активно-индуктивную нагрузку, сделаны выводы о применимости векторного метода формирования выходного напряжения преобразователя частоты в промышленности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, транзистор, автономный инвертор напряжения

Благодарности: авторы благодарят за предоставление оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: Саввин Н. Ю., Гарбузов Д. Д. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 46–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58.

Original article

MATHEMATICAL SIMULATION OF FREQUENCY CONVERTER WITH SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION

Nikita Yu. Savvin^{1✉}, Dmitry D. Garbuzov²

^{1,2} Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹ n-savvin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6379-6825>

² BSTU-Belgorod@yandex.ru

Abstract. The article presents the stages of developing and building a mathematical model for a semiconductor frequency converter with space vector pulse width modulation, which consists of a power circuit made of power semiconductor elements. The mathematical simulation is performed in the MATLAB/Simulink software environment. The main principles of the model's components performance are formulated. Using switching diagrams, calculated data for building a functional management system for the power keys of a frequency converter are presented. Based on the simulation results, oscillography records of phase and linear load voltages are obtained. Dependences of output voltage quality on the frequency of pulse width modulation are identified. The main advantages of using space vector pulse width modulation are described in designing sinusoids of output voltage in a frequency converter when working with an active inductive load. The authors draw conclusions on the usage of the vector method for building an output voltage of a frequency converter in the industry.

Keywords: frequency converter, pulse width modulation, transistor, self-excited voltage inverter

Acknowledgments: the authors are grateful to the Center of High Technologies of the Belgorod State Technical University named after V. G. Shukhov for research equipment.

For citation: Savvin N. Yu., Garbuzov D. D. Mathematical simulation of frequency converter with space vector pulse width modulation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):46–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск оптимальных методов управления электрическими двигателями является актуальной и важной задачей, решение которой позволит повысить энергоэффективность, стабилизировать режим работы и продлить срок службы электродвигателей, входящих в состав электроприводов различного назначения.

Особый интерес представляет работа [1] с полноценно описанными основами оптимизированных регулируемых электроприводов переменного тока по энергетическим критериям, математическими моделями силовой части электроприводов для задач управления и оптимизации, методикой сравнительной оценки энергетической эффективности режимов и их реализации в регулируемых электроприводах, а также результатами математического моделирования, однако без анализа выходных характеристик при использовании преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

В работе [2] выполнен сравнительный анализ векторного и синусоидального алгоритмов ШИМ в стандартных (распространенных) случаях.

Моделирование является универсальным методом прогнозирования любых технологических процессов: энергетических, теплообменных, химических и т. д. В этом аспекте интерес представляет работа по моделированию оригинальных теплообменных поверхностей, выполненная на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова [3].

Активно развивающаяся и внедряемая в различные отрасли промышленности и производства микропроцессорная техника обладает широкими возможностями в области управления силовыми полупроводниковыми устройствами, входящими в состав преобразователей частоты (ПЧ) [4]. Частотно-регулируемые электроприводы на основе ПЧ явля-

ются наиболее эффективными, по сравнению с нерегулируемыми электроприводами, а исследования в области повышения производительности ПЧ могут лечь в основу высокоэффективной системы управления, учитывающей обширный ряд физических процессов, лежащих в основе регулирования электрических двигателей [5]. Обстоятельный анализ работы ПЧ и алгоритмов формирования сигналов управления силовыми полупроводниковыми ключами – IGBT-транзисторами, уделено в [6].

В [7] дано исчерпывающее представление выходных напряжений трехфазного инвертора в системе пространственных векторов, когда напряжение формируется пространственным вектором определенной величины и угла на комплексной плоскости. По нашему мнению, данный метод формирования выходного напряжения использует принципы пространственно-векторной ШИМ и может быть положен в основу дальнейших исследований в области формирования точной математической модели ПЧ с векторной ШИМ, позволяющей оценить эффективность данной системы и предложить методы ее совершенствования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили теоретические основы и принципы, используемые для описания физических процессов и закономерностей, присущих системе формирования пространственно-векторной ШИМ.

Математическое моделирование является важнейшим инструментом для исследования физических процессов, формирования и проверки алгоритмов управления автоматизированных систем управления без необходимости построения физической модели.

В качестве среды разработки и математического моделирования был выбран программный комплекс MATLAB/Simulink, обладающий широкими возможностями и высокой точностью выходных данных.

Для понимания принципов реализации математической модели необходимо рассмотреть методику формирования синусоидальных напряжений на выходе ПЧ. Формирование синусоид выходного напряжения происходит посредством автономного инвертора напряжения (АИН) [8] (рис. 1).

АИН ПЧ включает в себя 6 IGBT-транзисторов, которые можно разделить на 2

группы – верхнюю и нижнюю. Система управления должна быть спроектирована так, чтобы обеспечивать верные комбинации переключения ключей для корректного формирования выходного напряжения на выходе ПЧ. Для задания верных комбинаций включения ключей необходимо спроектировать систему формирования ШИМ-сигналов из входных синусоидальных напряжений фаз А, В и С [9].

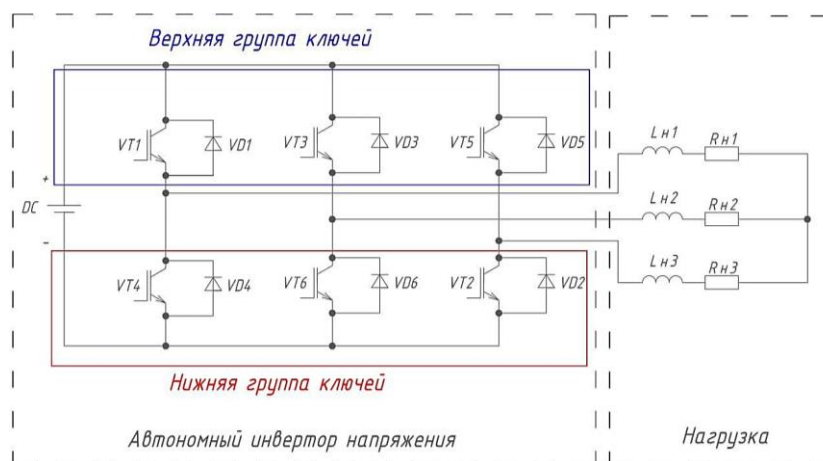


Рис. 1. Принципиальная схема АИН преобразователя частоты

Примечание: составлено авторами.

Построение блока формирования ШИМ в среде MATLAB/Simulink приведено на рис. 2. В данном блоке на синусоиды питающих фаз накладывается напряжение пилообразной формы. Далее посредством логических эле-

ментов ШИМ-сигнал подается на выходы “PWM Builder”, подключенные к силовым ключам. На входы Sine 1/2/3 блока “PWM Builder” подается напряжение синусоидальной формы.

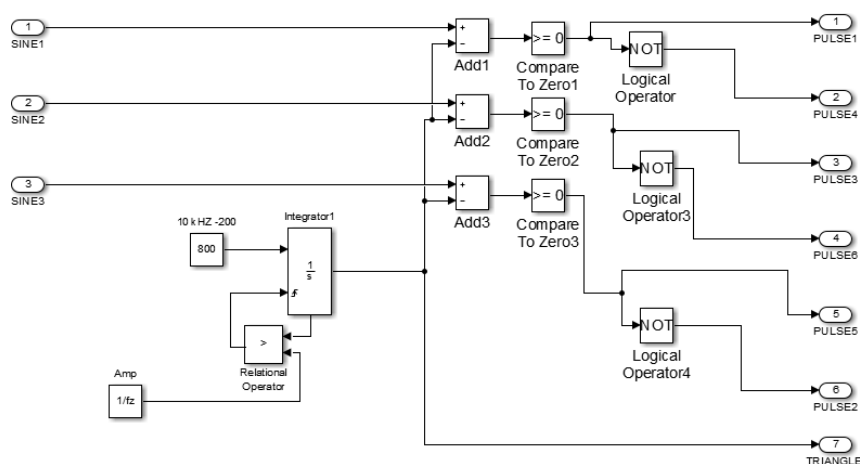


Рис. 2. Блок формирования ШИМ в ПЧ

Примечание: составлено авторами.

В отличие от синусоидальной ШИМ система пространственно-векторной ШИМ позволяет вычислить не мгновенные значения

напряжений, прикладываемых к обмоткам, а моменты подключения обмоток к силовому мосту с целью формирования заданного век-

тора напряжения. Анализируя схему АИН (рис. 1), можно сделать выводы, что существует только 8 комбинаций включения силовых транзисторов (из них две – нулевые),

характеризующихся определенным вектором, которые образуют правильный шестиугольник (рис. 3).

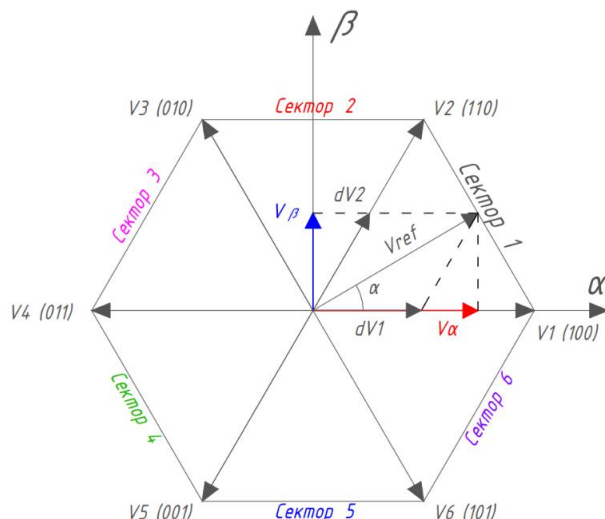


Рис. 3. Система векторов напряжений
Примечание: составлено авторами.

Данный шестиугольник можно разделить на 6 секторов, образованных системой векторов напряжения и сдвинутых относительно друг друга на угол 60° . При этом формирование импульсов в каждой фазе ПЧ происходит

при переходе вектора напряжения из одного сектора в другой. Комбинации включения ключей на примере верхней группы и уровни напряжений в фазах А, В и С на выходе АИН приведены в табл. 1.

Таблица 1

Комбинации переключения силовых ключей автономного инвертора напряжения

Вектор	VT1	VT3	VT5	Va	Vb	Vc
V1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
V2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
V3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
V4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
V5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
V6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3

Примечание: составлено авторами.

Работа ключей нижней группы происходит в инверсном режиме, т. е. когда ключ VT1 включен, ключ VT4 выключен, что справедливо и для других пар ключей верхней и нижней группы.

Для формирования вектора напряжений необходимо произвести преобразование из неподвижной трехфазной в двухфазную систему координат α и β . Данный тип преобразований известен как преобразование Парка [10].

Преобразование Парка для векторов напряжений выполняется по формулам (1, 2).

$$\vec{V}_\alpha = \frac{2}{3} \times \left[1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\vec{V}_\beta = \frac{2}{3} \times \left[0 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

V_{ref} – вектор опорного напряжения, формирующийся из векторов V_α и V_β (3):

$$|\vec{V_{ref}}| = \sqrt{\vec{V_{\alpha}}^2 + \vec{V_{\beta}}^2}. \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{|\vec{V_{\alpha}}|}{|\vec{V_{\beta}}|}. \quad (4)$$

Для отслеживания положение вектора V_{ref} в пространстве используется угол между V_{ref} и осью α (4):

Таким образом можно сформировать блок преобразования трехфазной системы координат A, B, C в систему координат α и β (рис. 4).

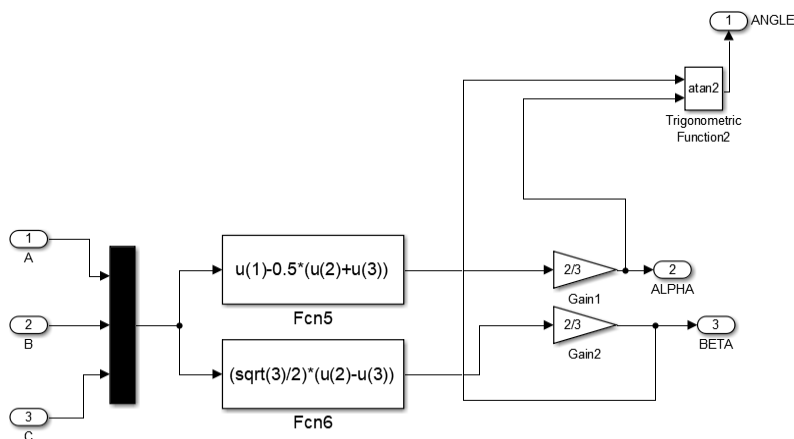


Рис. 4. Структура блока преобразования координат (Coordinate Transformer)

Примечание: составлено авторами.

Блоки Fcn5 и Fcn6 содержат функции, реализующие преобразования Парка. Угол α формируется путем нахождения арктангенса

отношения модуля $\vec{V_{\alpha}}$ к модулю $\vec{V_{\beta}}$. Осциллограммы, полученные в результате работы Coordinate Transformer, представлены на рис. 5–7.

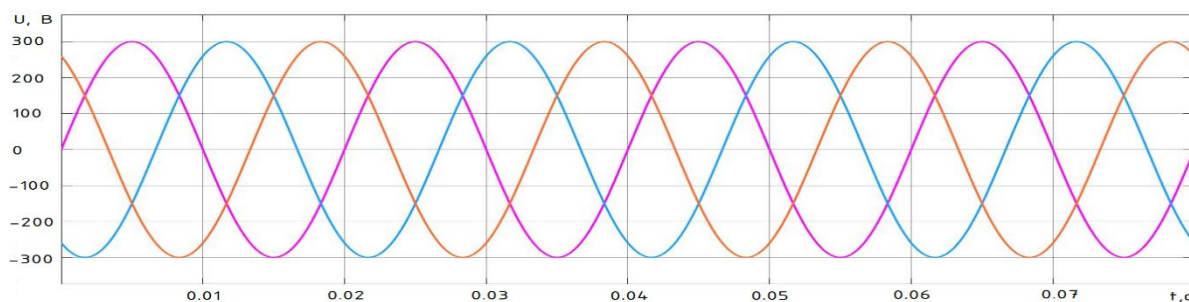


Рис. 5. Трехфазная система на входе блока Coordinate Transformer

Примечание: составлено авторами.

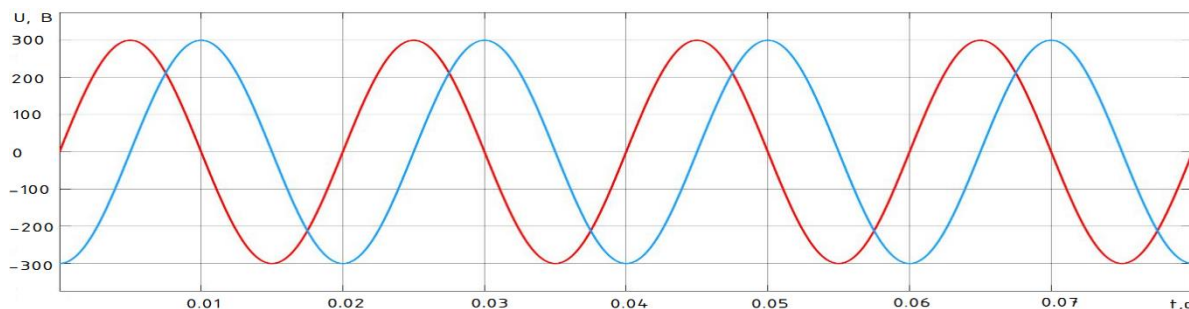


Рис. 6. Двухфазная система на выходе блока Coordinate Transformer

Примечание: составлено авторами.

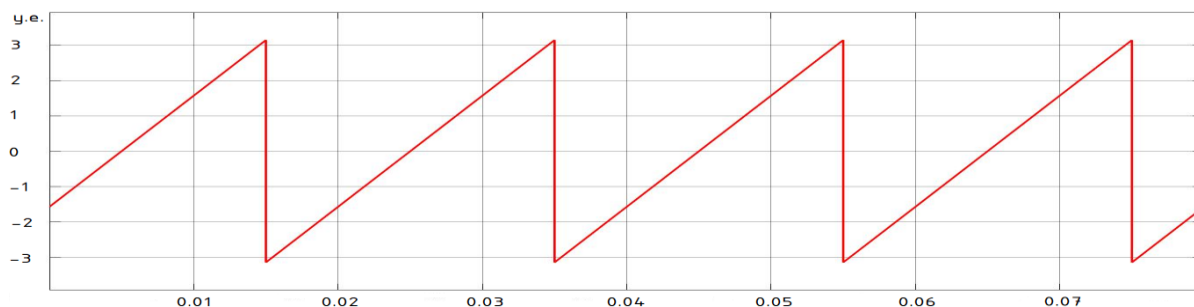


Рис. 7. Осциллограмма формирования угла α
Примечание: составлено авторами.

После вычисления положения вектора опорного напряжения относительно системы координат α и β необходимо определить сектор, в котором находится $\vec{V}_{ref}$ в ходе своего перемещения. Методика определения сектора

сводится к сравнению значения угла α с углами, образованными двумя векторами напряжений, формирующих сектор. Данную операцию реализует блок Sector Constructor (рис. 8).

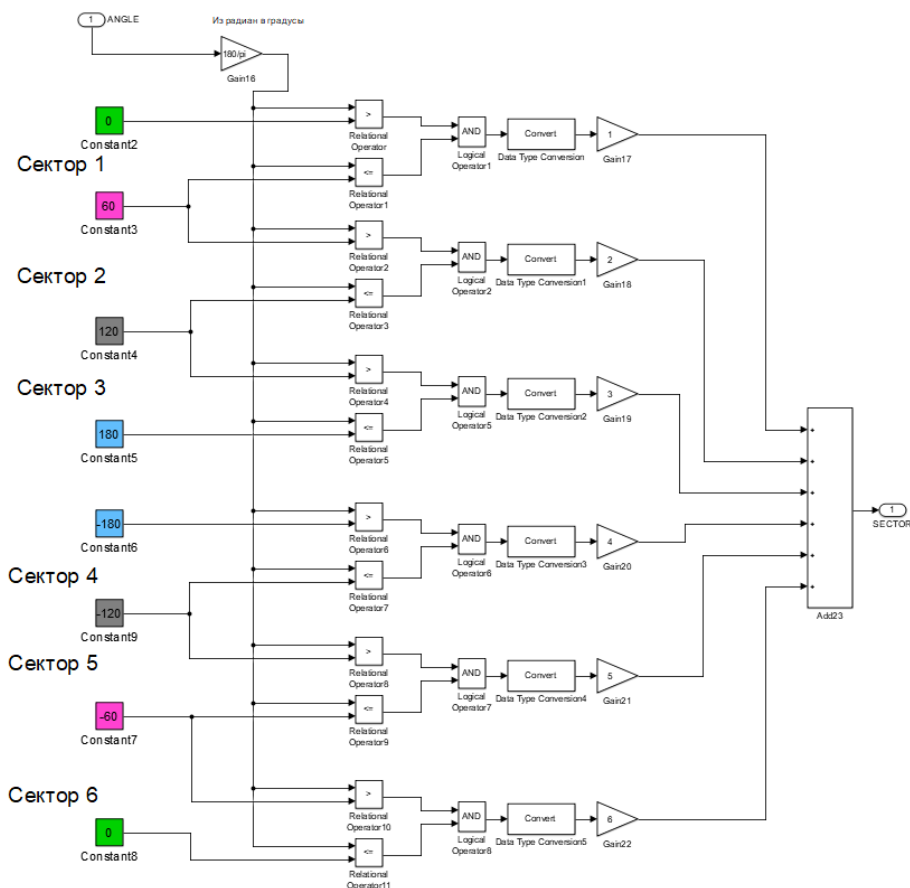


Рис. 8. Структура блока формирователя секторов
Примечание: составлено авторами.

В Sector Constructor значение угла α , переведенное из радиана в градусы, сравнивается с фиксированными значениями углов, характерных для каждого сектора. Пропорциональ-

ное звено Gain 17–22 необходимо для формирования подъема каждого сектора относительно друг друга до достижения сектором угла в 180° или π . Далее вектор переходит

в область секторов 4, 5, 6, расположенных в отрицательной области углов, и алгоритм повторяется.

Определение продолжительности времени переключения в секторе 1 предусматривает взятие интеграла от вектора $\vec{V}_{ref}$ в пределах от 0 до T_z , где $T_z = \frac{1}{f_z}$ – общее время переключения согласно (4):

$$\int_0^{T_z} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \vec{V}_0 dt. \quad (4)$$

Тогда по формуле (5):

$$T_z \times \vec{V}_{ref} = (T_1 \times \vec{V}_1 + T_2 \times \vec{V}_2). \quad (5)$$

Общее время переключения по формуле (6):

$$T_z \times \vec{V}_{ref} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \end{bmatrix} = T_1 \times \frac{2}{3} \times V_{dc} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \times \frac{2}{3} \times V_{dc} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{3} \\ \sin \frac{\pi}{3} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Промежутки времени T_0 – T_2 определяются согласно (7, 8):

$$T_1 = T_z \times a \times \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}, \quad (7)$$

$$T_2 = T_z \times a \times \frac{\sin(\alpha)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}, \quad (8)$$

где $a = \frac{|\vec{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} \times V_{dc}}$ – индекс модуляции.

Итоговое значение временных интервалов для каждого сектора согласно (9, 10):

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi\right) \right) = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} n - \alpha\right) \right), \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \times T_z \times |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \times \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi\right) \right). \quad (10)$$

На основе (9, 10) сформирован блок расчета временных интервалов для каждого сектора (рис. 9).

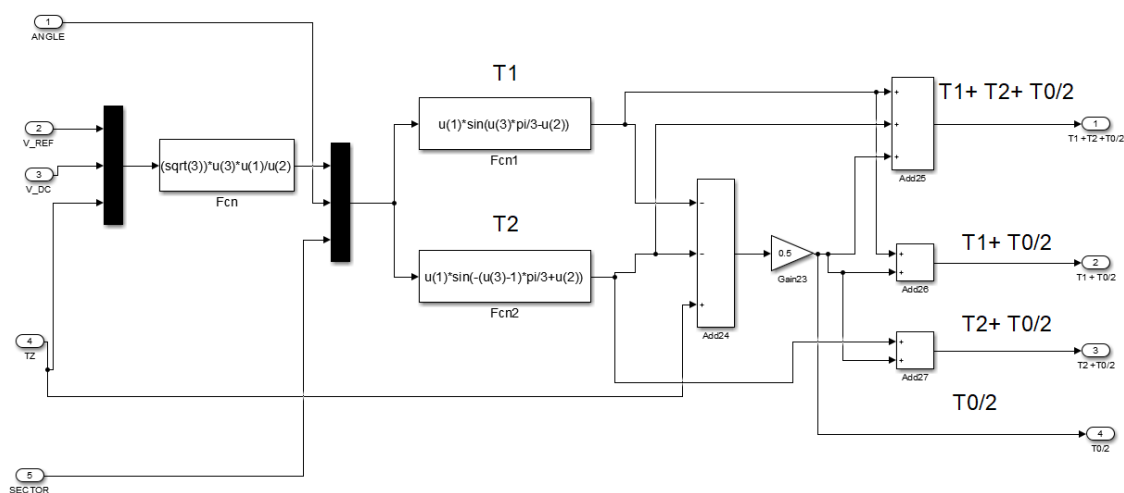


Рис. 9. Структура блока формирователя временных интервалов

Примечание: составлено авторами.

На входы блока Interval Compiler подается значение угла α , V_{ref} , V_{dc} , T_z и Sector, на выходе формируются интервалы T_1 , T_2 , T_0 для любых секторов.

Для формирования синусоид выходного напряжения должна быть соблюдена строгая последовательность переключения полупроводниковых ключей (табл. 2).

Таблица 2

Последовательность переключения силовых ключей автономного инвертора напряжения

Сектор	Верхняя группа ключей	Нижняя группа ключей
1	$VT1 = T1 + T2 + T0/2$ $VT3 = T1 + T0/2$ $VT5 = T0/2$	$VT4 = T0/2$ $VT6 = T1 + T0/2$ $VT2 = T1 + T2 + T0/2$
2	$VT1 = T1 + T0/2$ $VT3 = T1 + T2 + T0/2$ $VT5 = T0/2$	$VT4 = T2 + T0/2$ $VT6 = T0/2$ $VT2 = T1 + T2 + T0/2$
3	$VT1 = T0/2$ $VT3 = T1 + T2 + T0/2$ $VT5 = T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T2 + T0/2$ $VT6 = T0/2$ $VT2 = T1 + T0/2$
4	$VT1 = T0/2$ $VT3 = T1 + T0/2$ $VT5 = T1 + T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T2 + T0/2$ $VT6 = T2 + T0/2$ $VT2 = T0/2$
5	$VT1 = T2 + T0/2$ $VT3 = T0/2$ $VT5 = T1 + T2 + T0/2$	$VT4 = T1 + T0/2$ $VT6 = T1 + T2 + T0/2$ $VT2 = T0/2$
6	$VT1 = T1 + T2 + T0/2$ $VT3 = T0/2$ $VT5 = T1 + T0/2$	$VT4 = T0/2$ $VT6 = T1 + T2 + T0/2$ $VT2 = T2 + T0/2$

Примечание: составлено авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование синусоид векторной ШИМ происходит согласно табл. 2. Блок формирования синусоид векторной ШИМ Sine

Builder (рис. 10) основывается на данных о секторе и рассчитанных в блоке Interval Compiler временных интервалах. Результат работы блока Sine Builder представлен на рис. 11.

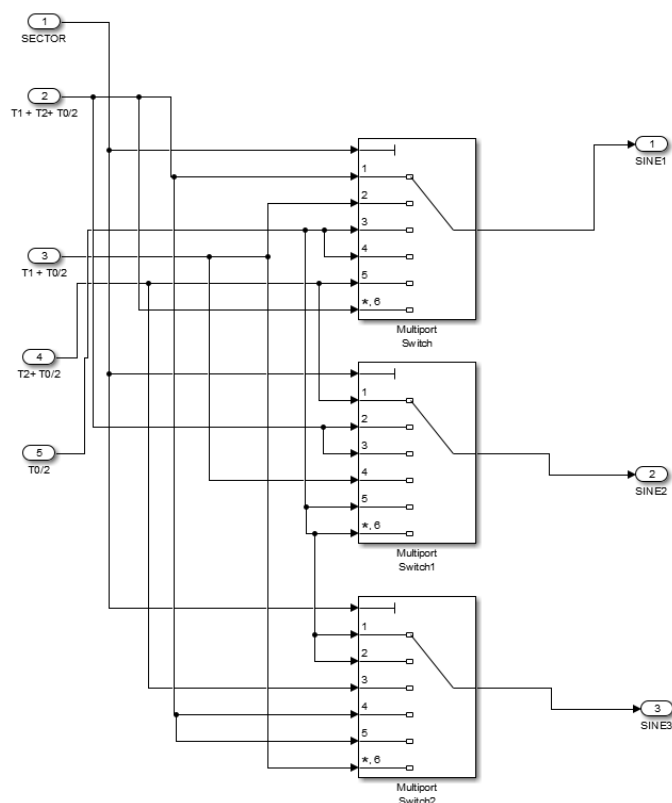


Рис. 10. Структура блока формирователя векторной широтно-импульсной модуляции

Примечание: составлено авторами.

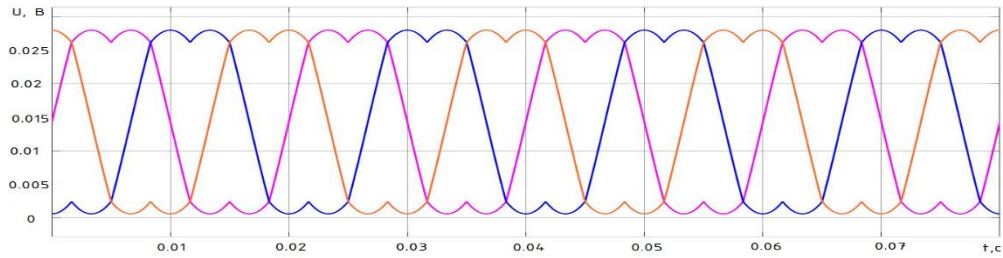


Рис. 11. Осциллограмма выхода блока Sine Builder

Примечание: составлено авторами.

Силовая часть преобразователя частоты (рис. 12) представлена трехфазным источником переменного напряжения, выпрямителем, фильтрующей емкостью в звене постоян-

ного тока, 6 полупроводниковыми ключами, активно-индуктивной нагрузкой и осциллографами для получения осциллограмм напряжений и токов на нагрузке.

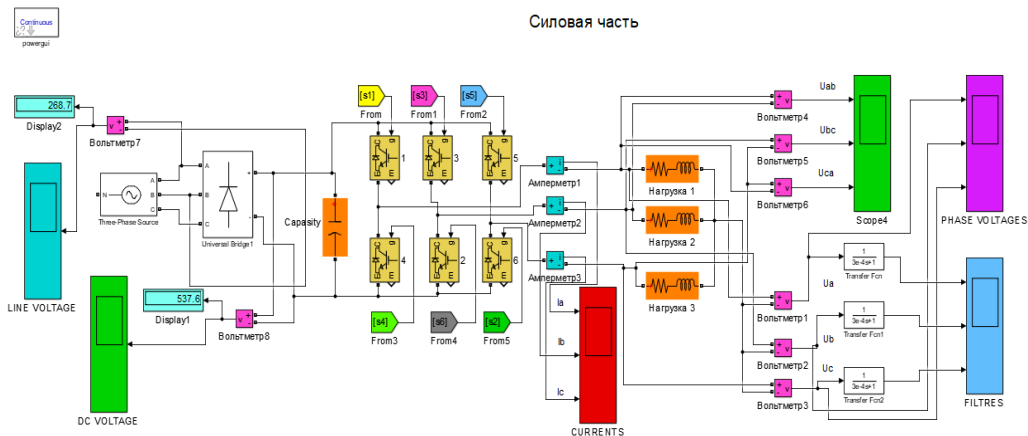


Рис. 12. Силовая часть преобразователя частоты

Примечание: составлено авторами.

Система управления ПЧ (рис. 13) сформирована блоками преобразования Парка, формирователем интервалов, секторов перемещения векторов напряжений, построителя

синусоид питающего напряжения. Частота питающего напряжения задается посредством блока константы f_z в герцах.

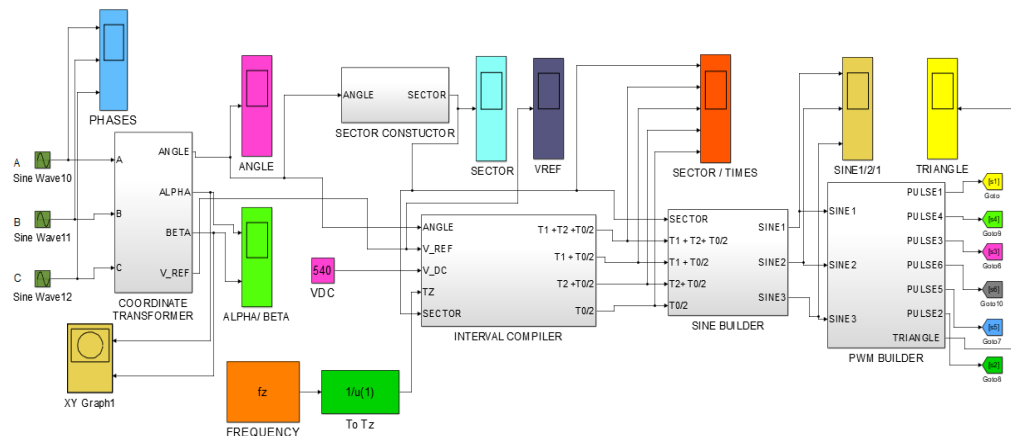


Рис. 13. Система управления преобразователем частоты

Примечание: составлено авторами.

По результатам моделирования получены осциллограммы линейных и фазных напряжений на нагрузке при частоте выходного напряжения $f = 50$ Гц (рис. 14–17).

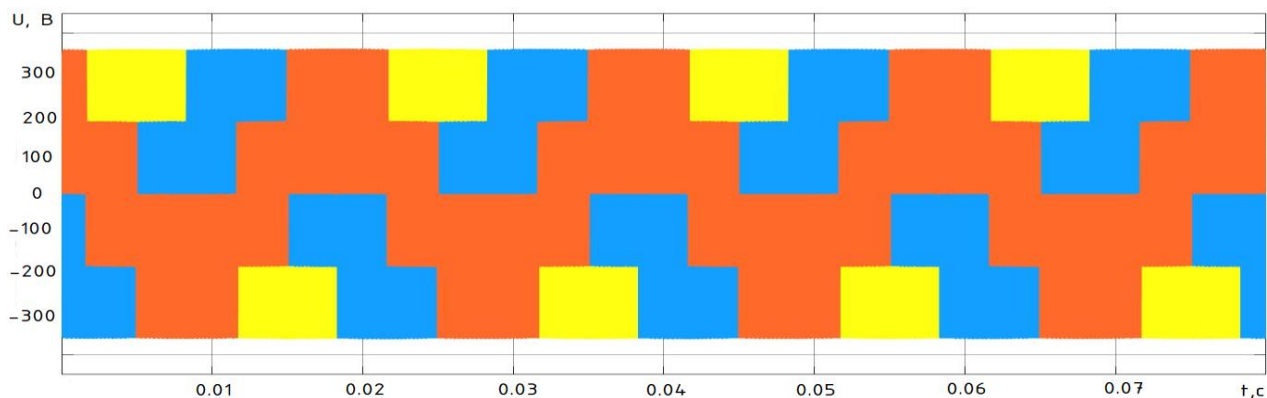


Рис. 14. Осциллограмма фазных напряжений на нагрузке
Примечание: составлено авторами.

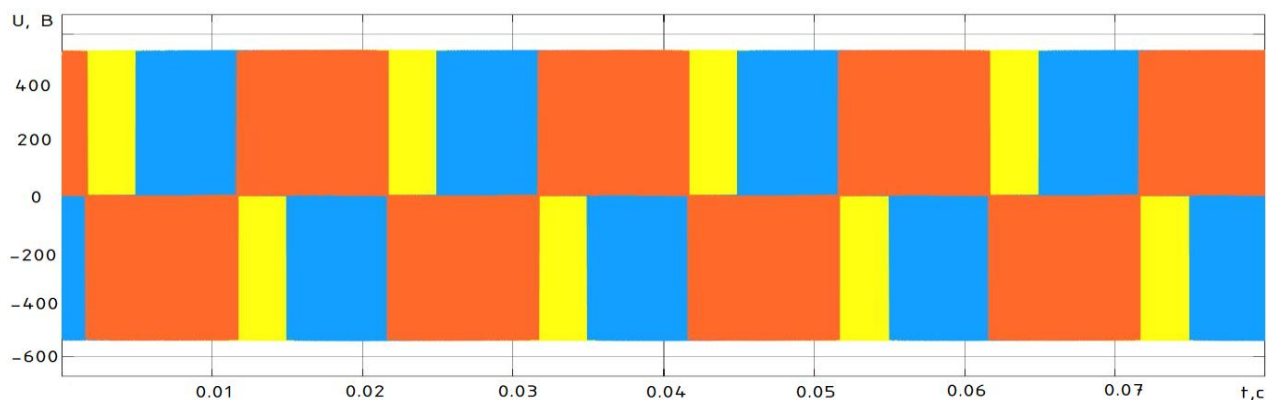


Рис. 15. Осциллограмма линейных напряжений на нагрузке
Примечание: составлено авторами.

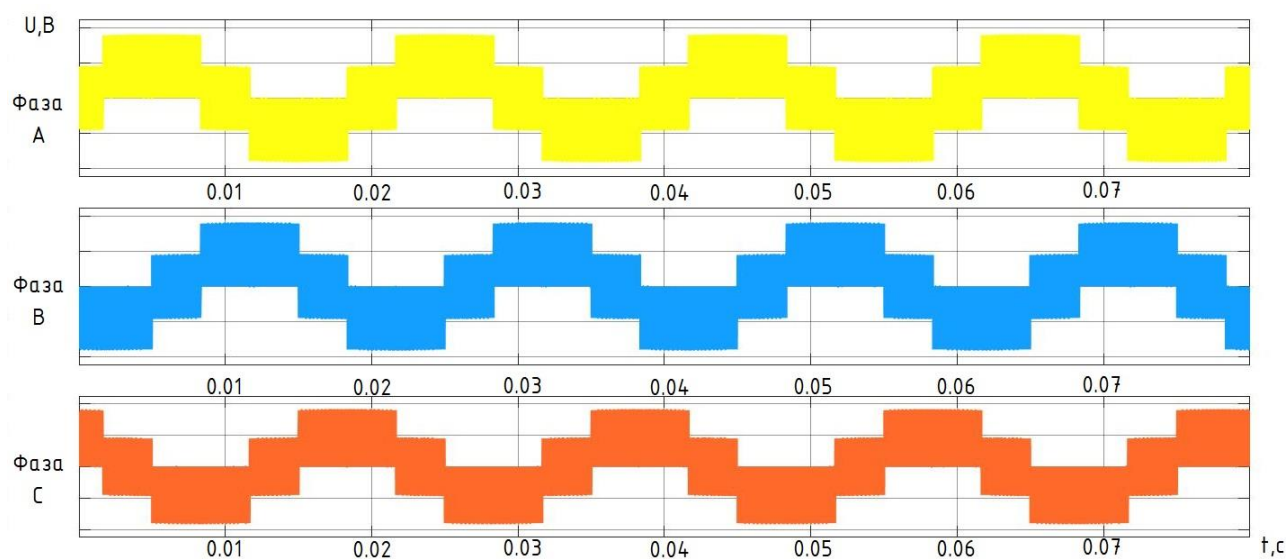


Рис. 16. Осциллограмма фазных напряжений на нагрузке в фазах А, В, С
Примечание: составлено авторами.

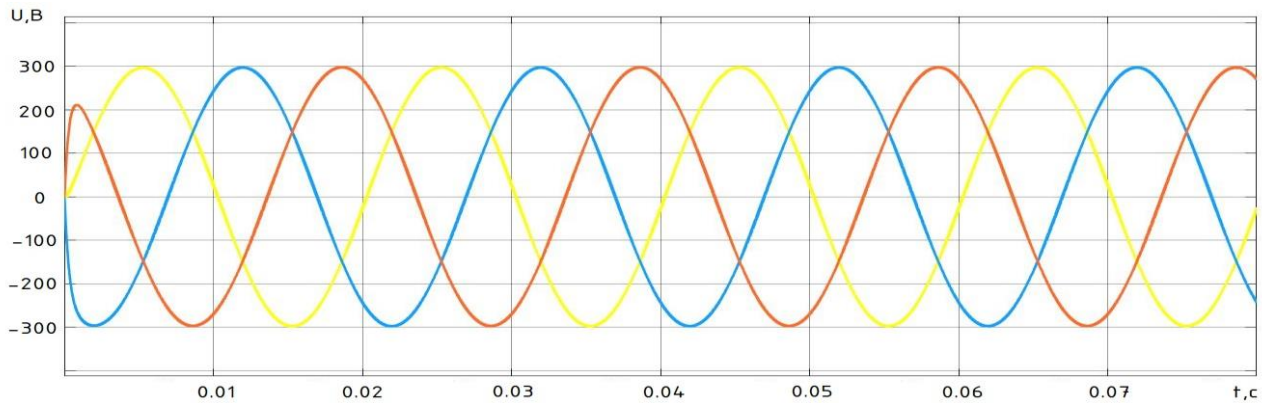


Рис. 17. Осциллограмма линейных напряжений на нагрузке после фильтрации
Примечание: составлено авторами.

Для проверки правильности формирования пространственного вектора напряжений построен годограф вращения пространствен-

ного вектора с помощью инструмента XY Graph (рис. 18).

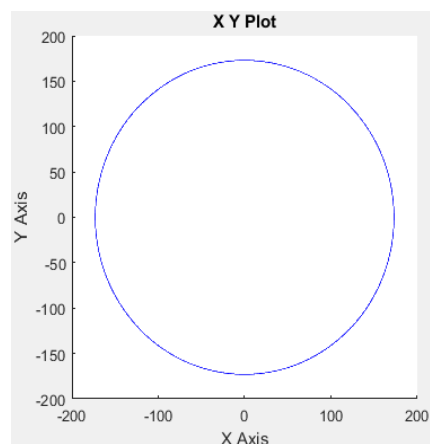


Рис. 18. Годограф вращения пространственного вектора напряжений
Примечание: составлено авторами.

Полученные в результате моделирования данные позволяют произвести оценку гармонических искажений в результате применения преобразователя частоты с векторной ШИМ. В отличие от работ, рассмотренных во введении, при моделировании сделаны допущения об активном сопротивлении ключей. В открытом состоянии активные сопротивления равны нулю, в закрытом – стремятся к бесконечности. Алгоритмы, примененные в модели, позволяют повысить качество выходного напряжения ПЧ, однако требуют больших вычислительных ресурсов, чем классический метод формирования ШИМ.

Преобразователь частоты формирует дискретные уровни фазного напряжения, что,

в свою очередь, ограничивает число векторов фазного напряжения, строго определяя их количество. Поскольку области расположения векторов ограничены правильным шестиугольником, то изменение чередования фаз позволяет переместить вектор напряжения из исходного сектора в другой сектор с возможностью обратного возвращения к базовому. Для формирования выходного напряжения используют три соседних пространственных вектора, координаты которых ограничивают треугольную область, в которой в данный момент времени находится конец вектора заданного напряжения.

Преобразователи частоты с пространственно-векторной ШИМ в совокупности

с методами повышения эффективности коммутации силового коммутационного оборудования и снижения гармонических искажений позволяют увеличить эффективность управления электроприводами промышленного применения, а использование более эффективных алгоритмов управления на новой производительной микропроцессорной базе в значительной мере способствуют решению данной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены принципы формирования пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции, приведены теоретические и практические аспекты, а также особенности построения математической модели преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией, произведено имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink.

По результатам моделирования получены осциллограммы фазных и линейных напряжений на нагрузке, определены пути оптимизации формирования выходных напряжений в виде их последующей обработки с помо-

щью фильтров гармоник, а также с помощью совершенствования алгоритма управления.

Выполнена проверка результатов моделирования с помощью построения годографа вращения пространственного вектора в XY Graph.

Применение современных технологий, включая преобразователи частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией и методы повышения эффективности коммутации силового оборудования, позволяют улучшить работу электроприводов в промышленности. Также новые микропроцессорные системы имеют большой потенциал для эффективного управления процессами. Так, в целом внедрение этих инновационных методов может улучшить результативность и экономическую эффективность в различных производственных секторах.

Важным шагом в повышении эффективности преобразователей частоты с векторной ШИМ является дальнейшее преобразование выходного напряжения, а именно удаление из спектра определенного ряда гармоник, что позволит повысить электромагнитную совместимость и снизить потери на коммутацию.

Список источников

1. Поляков В. Н., Шрейнер Р. Т. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 256 с.
2. Виноградов А. Б., Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты : моногр. Иваново, 2018. 184 с.
3. Куцев Л. А., Мелькумов В. Н., Саввин Н. Ю. Компьютерное моделирование движения теплоносителя в гофрированном канале пластинчатого теплообменника // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4. С. 51–58. DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005.
4. Голембиовский Ю. М., Томашевский Ю. Б., Щербakov А. А. и др. Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18, № 1. С. 75–81. DOI 10.14529/power180110.
5. Кабдин Н. Е., Сторчевой В. Ф. Электропривод. М. : МЭСК, 2021. 286 с.
6. Cociu L., Cociu V. R. About the bidirectional separator circuit used in the induction machine analysis. *Bul Inst Polit Iasi*. 2015;LXI (LXV)(3):9–20.

References

1. Polyakov V. N., Shreiner R. T. Energoeffektivnye rezhimy dvigatelei peremennogo toka v sistemakh chastotnogo upravleniia. Yekaterinburg: UrFU; 2017. 256 p. (In Russian).
2. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Algoritmy upravleniia vysokovoltnym mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty. Monograph. Ivanovo; 2018. 184 p. (In Russian).
3. Kushchev L. A., Melkumov V. N., Savvin N. Yu. Computer simulation of flow in corrugated channel of plate heat exchanger. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;(4):51–58. DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005. (In Russian).
4. Golembiovsky Yu. M., Tomashevsky Yu. B., Shcherbakov A. A. et al. Autonomous single-phase inverter with high quality of output voltage. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):75–81. DOI 10.14529/power180110. (In Russian).
5. Kabdin N. E., Storchey V. F. Elektroprivod. Moscow: MESKh; 2021. 286 p. (In Russian).
6. Cociu L., Cociu V. R. About the bidirectional separator circuit used in the induction machine analysis. *Bul Inst Polit Iasi*. 2015;LXI (LXV)(3):9–20.

7. Васильев Б. Ю., Козырук А. Е., Мардашов Д. В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // *Электротехника*. 2020. № 4. С. 14–23.
8. Correlation b/w output voltage frequency and angle theta for Conventional Space Vector PWM 3-Phase inverter drive. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/446639/correlation-b-w-output-voltage-frequency-and-angle-theta-for-conventional-space> (дата обращения: 10.03.2023).
9. Маклаков А. С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2018. Т. 18, № 1. С. 92–100.
10. Костылев А. В. Векторная ШИМ для двухсекционного преобразователя частоты // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2015. Т. 15, № 2. С. 34–40.
7. Vasilyev B. Yu., Kozyaruk A. E., Mardashov D. V. Increasing the utilization factor of an autonomous inverter under space vector control. *Elektrotehnika*. 2020;(4):14–23. (In Russian).
8. Correlation b/w output voltage frequency and angle theta for Conventional Space Vector PWM 3-Phase inverter drive. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/446639/correlation-b-w-output-voltage-frequency-and-angle-theta-for-conventional-space> (accessed: 10.03.2023).
9. Maklakov A. S. Hybrid modulation based on SHEPWM and SVPWM. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):92–100. (In Russian).
10. Kostylev A. V. The vector PWM for two-section frequency converter. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2015;15(2):34–40. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Ю. Саввин – кандидат технических наук, доцент.
Д. Д. Гарбузов – магистрант.

Information about the authors

N. Yu. Savvin – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent.

D. D. Garbuzov – Master's Degree Student.

Научная статья
УДК 531.3
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИССОЦИАЦИИ ГАЗОГИДРАТА В ПЛАСТЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Сергей Михайлович Сысоев^{1✉}, Егор Аркадьевич Петров², Исмаил Эльшан оглы Джариев³
^{1,2,3} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ smsysyoev57@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>

² 86petrovegorg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

³ ismail.silver@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Аннотация. В работе проведено численное исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения с частотами 400 МГц, 1 000 МГц и 2 450 МГц и показано, что процесс разложения газогидрата при этом воздействии идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности пласта, установлен значительно больший эффект частот 1 000 МГц и 2 450 МГц по сравнению с частотой 400 МГц и лучший результат при временах нагрева больших чем 400 ч с частотой 1 000 МГц по сравнению с частотой 2 450 МГц. С помощью предложенной математической модели можно определять оптимальные частоты источника излучения при заданном времени нагрева пласта конкретного месторождения, кроме того, полученный расчет энергоэффективности ($EROI \geq 10$) указанного метода добычи газа из газогидрата доказывает его конкурентоспособность по сравнению с традиционными методами термического воздействия на пласт.

Ключевые слова: математическая модель, пласт, гидратонасыщенность, сверхвысокочастотный электромагнитный нагрев, разложение газогидратов, добыча газа

Финансирование: настоящая работа выполнена в рамках проекта «Разработка, исследование и анализ физико-математических моделей для задач компьютерного инжиниринга высокотехнологичной продукции нефтегазовой отрасли» – победителя конкурсного отбора научных проектов в области фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых научными коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Департаменту образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Для цитирования: Сысоев С. М., Петров Е. А., Джариев И. Э. Исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 59–67. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67.

Original article

STUDYING THE GAS HYDRATE DISSOCIATION MODEL IN A RESERVOIR UNDER THE ACTION OF MICROWAVE RADIATION

Sergey M. Sysoev^{1✉}, Egor A. Petrov², Ismail E. Dzhariev³
^{1,2,3} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ smsysyoev57@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5180-571X>

² 86petrovegorg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

³ ismail.silver@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Abstract. The article presents a numerical study of the gas hydrate dissociation model in a reservoir under the action of microwave electromagnetic radiation at 400 MHz, 1 000 MHz, and 2 450 MHz. The decomposition of gas hydrate under this influence is faster at lower values of the reservoir's initial hydrate saturation. The effects of 1 000 MHz and 2 450 MHz frequencies are much stronger than those of 400 MHz. The study shows that during heating times higher than 400 hours, 1 000 MHz frequency radiation electromagnetic heating is more efficient than that of 2 450 MHz frequency. Using the proposed mathematical model, it is possible to determine the

optimal frequencies of the radiation source at a given time of heating the reservoir of a particular field. Moreover, the resulting calculation of energy efficiency ($EROI \geq 10$) of this method for gas hydrate-extracted gas proves its competitiveness when compared to traditional methods of thermal impact on the reservoir.

Keywords: mathematical model, reservoir, hydrate saturation, microwave electromagnetic heating, gas hydrates decomposition, gas production

Funding: the study was carried out according to the project “Development, Research and Analysis of Physical and Mathematical Models for Computer Engineering Tasks of High-Tech Products of the Oil and Gas Industry”, which has won the competition of scientific projects in the field of fundamental and applied research carried out by research teams of educational institutions of higher education subordinate to the Department of Education and Science of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra.

For citation Sysoev S. M., Petrov E. A., Dzhariev I. E. Studying the gas hydrate dissociation model in a reservoir under the action of microwave radiation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):59–67. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-59-67.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности увеличивает потребность в энергетических ресурсах. Решением проблемы будут нетрадиционные источники углеводородного сырья, в частности газовые гидраты. Гидраты метана естественным образом образуются в определенных жестких условиях высокого давления и низкой температуры, главным образом на неглубоких континентальных окраинах, резко понижающемся морском дне и в районах вечной мерзлоты [1–5].

На молекулярном уровне гидраты метана представляют собой твердые кристаллические соединения, состоящие из извлекаемого газообразного метана, заключенного в ледяную оболочку из молекул воды. Извлечение метана из его гидрата требует индуцированного изменения состояния гидратного равновесия, которое может разрушить молекулярную оболочку воды и высвободить газообразный метан [1, 6]. Процесс диссоциации гидрата метана является эндотермическим по своей природе и, следовательно, требует дополнительного тепла от внешних источников. Наиболее широко распространенные методы извлечения газа включают сброс давления, термическую стимуляцию и химическое ингибирование.

С развитием технологий появилось также несколько новых методов термической стимуляции, например, сжигание и сверхвысокочастотный (СВЧ) электромагнитный нагрев. СВЧ-волны – это электромагнитные волны, которые обычно обладают длиной волны порядка от 1 мм до 1 м и частотами в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц [7–9]. Взаимодействие этих электромагнитных волн с диэлектрической средой вызывает значительные диполь-

ные вращения, которые генерируют распределенные источники тепла в диэлектрической среде. СВЧ-нагрев с номинальной частотой 400 МГц, 1 000 МГц и 2,45 ГГц играет важную роль во многих практических задачах, таких как обработка пищевых продуктов, термическая обработка, вулканизация и сушка. В контексте диссоциации гидрата метана СВЧ-излучение может обеспечить быстрый нагрев, альтернативный традиционным методам термической стимуляции [7–10]. Вода – это диэлектрический материал, обладающий отличной реакцией на микроволны. Наличие воды в гидратных залежах и выделение избытка воды из-за диссоциации гидрата создают благоприятные условия для применения нагрева СВЧ-излучением [9].

Теоретическое исследование тепломассопереноса в газогидратном пласте при его нагреве высокочастотным электромагнитным излучением проводилось на одно- и двумерных моделях. В исследованиях [11, 12] изучались процессы фильтрации в пористых средах, заполненных твердым газогидратом или жидкостью, с депрессией и тепловыми эффектами (в том числе электромагнитным нагревом), приводящими к фазовым переходам (разложение газогидрата, кипение жидкости). В качестве дополнения к вычислительному моделированию разложения гидрата газа в пористых средах под действием СВЧ электромагнитного нагрева предлагается применение решетчатой модели пористой среды на основе теории перколяции для прогнозирования динамики емкостных характеристик пластов при фильтровании различных активных растворов [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование разложения газового гидрата выполняется в среде, представляющей горизонтальный пласт толщиной H , помещенный между кровлей и подошвой, характеристики которых отличны от пласта. Газогидрат и скелет пористой породы являются несжимаемыми и неподвижными, газ совершенный, капиллярные эффекты не учитываются [14–16].

Источник, излучающий электромагнитные волны в радиальном направлении, помещен в скважину на уровне пласта. Поглощение электромагнитной энергии вокруг скважины приводит к разогреву пласта и прилегающих пород, вследствие вызывающее диссоциацию гидрата метана.

При моделировании используются уравнения баланса массы газовой, водной и гидратной фаз, уравнение энергетического баланса, обобщенный закон Дарси для воды и газа [16], уравнение кинетики Кима – Бишной [17] для реакции разложения гидрата. Система замкнута условием равновесия смеси. Система уравнений сводится к четырем дифференциальным уравнениям относительно температуры, давления, гидрато- и водонасыщенности с соответствующими граничными и начальными условиями.

Моделирование разложения гидрата газа в пористых средах под действием СВЧ электромагнитного нагрева проводилось методом конечных элементов. Значения физических параметров характерны для типичного газогидратного пласта [16].

В работе проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата в поровой среде пласта класса 3 под воздействием СВЧ-излучения. Расчеты были выполнены для разрешенных в промышленном использовании частот СВЧ-излучения 400 МГц, 1 000 МГц и 2,45 ГГц. Исследование модели было проведено для нагрева пласта СВЧ-излучением при условии, что давление в скважине было выше давления в пласте – режим репрессии. В этом случае происходит инжекция флюида в пласт.

При репрессиионном воздействии на пласт из-за созданного градиента давления между скважиной и пластом происходит течение воды и газа вдоль радиального направления от скважины. Наиболее интенсивное поглощение СВЧ-излучения водой происходит

в околоскважинной области. Течение нагретой воды вглубь пласта создает значительный конвективный теплоперенос, который способствует эффективной диссоциации газового гидрата.

Моделирование процесса нагрева пласта выполнялось методом конечных элементов с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics – интерактивной среды для решения научных задач, использующих дифференциальные уравнения в частных производных. Вычислительный алгоритм метода конечных элементов основан на процедуре минимизации функционала, соответствующего решаемой непрерывной задаче. В результате выполнения указанной процедуры происходит замещение системы уравнений в частных производных системой алгебраических уравнений, имеющих в качестве коэффициентов аппроксимирующие функции, которые фактически являются значениями искомой функции в вершинах разбиения.

В настоящей работе вычислительный домен задачи разбивался приблизительно на 40 000 конечных элементов, имеющих вид треугольников. Сетка конечных элементов была неравномерная. Сгущение элементов производилось в областях предполагаемого наиболее сильного изменения температуры и напряженностей электромагнитного поля, т. е. вблизи источника излучения и на границах раздела пластоокружающие породы, где размер конечных элементов более чем в 10 раз был меньше длины волны излучения. В качестве базисных функций использовались кусочно-непрерывные квадратичные полиномы Лагранжа. Число степеней свободы задачи было равно приблизительно 170 000. Численное интегрирование, необходимое для нахождения элементов якобиана, выполнялось с помощью квадратурных формул Гаусса. Для решения систем линейных алгебраических уравнений использовался метод Гаусса, адаптированный к использованию сильно разреженных матриц. Относительная точность вычислений на каждом шаге итерационного процесса составляла 0,01. Вычисления выполнялись на компьютере, имеющем процессор с тактовой частотой 3,33 ГГц и оперативную память 64 Гб. Типичное время расчета составляло приблизительно 10 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе было проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата, вызванной нагревом гидратосодержащего пласта вследствие действия на него СВЧ электромагнитного излучения, для обоснования конкурентоспособности нового метода добычи газа из газогидрата по критерию энергоэффективности.

Пласт подвергался репрессзионному воздействию величиной ΔP от 10 до 40 атм. Гидратонасыщенность пласта s_h заключалась в диапазоне от 0,4 до 0,8. Исследуемый диапазон проницаемостей пласта от $K_0 = 3 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ до $K_0 = 3 \times 10^{-15} \text{ м}^2$. Частоты СВЧ электромагнитного излучения принимались равными $f = 400 \text{ МГц}$; $1\,000 \text{ МГц}$; $2\,450 \text{ МГц}$. Мощность источника излучения равна $W = 5\,000 \text{ Вт}$. В результате исследования модели получены пространственные и временные распределения гидратонасыщенности s_h , водонасыщенности s_w и газонасыщенности s_g в пласте, а также рассчитаны масса диссоциировавшего под действием на него СВЧ электромагнитного излучения газогидрата и объем выделившегося вследствие разложения газогидрата газа.

При репрессзионном воздействии вода и газ вдавливаются в пласт, занимая освободившийся от газогидрата объем пор пласта, и осуществляют тепловой контакт с газогид-

ратом на фазовой границе. Таким образом, диссоциация газогидрата происходит как вследствие объемного выделения теплоты при поглощении им СВЧ электромагнитного излучения, так и на фазовой границе «вода – газогидрат» путем теплопередачи.

На рис. 1 приведены пространственные распределения гидратонасыщенности s_h , водонасыщенности s_w и газонасыщенности s_g в пласте вдоль радиального направления от источника излучения, находящегося в скважине, для двух значений начальной гидратонасыщенности – 0,4 и 0,8.

Из рис. 1 видно, что происходит пространственное разложение газогидрата в объемной области, заключенной в пределах от $r = 4,5 \text{ м}$ до $r = 15 \text{ м}$ для времени нагрева $t = 240 \text{ ч}$. Значительное увеличение водонасыщенности s_w наблюдается вблизи границы «вода – газогидрат», вызванное репрессзионным воздействием на пласт. При одинаковом воздействии СВЧ электромагнитного излучения на пласты с разными значениями начальной гидратонасыщенности объем зоны с полным разложением газогидрата больше для случая с меньшим значением начальной гидратонасыщенности.

На рис. 2 приведены зависимости массы разложившегося газогидрата от времени нагрева при репрессзионном воздействии на пласт для двух значений начальной гидратонасыщенности – 0,4 и 0,8.

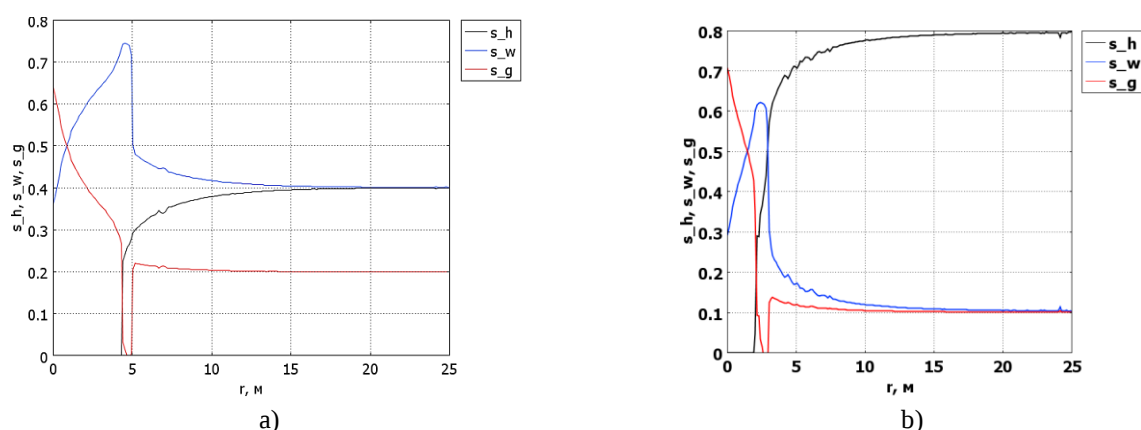


Рис. 1. Зависимость гидрато-, водо-, газонасыщенностей в пласте от радиального расстояния для времени нагрева $t = 240 \text{ ч}$ при репрессзионном воздействии на пласт:

а) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$; б) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,8$

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400 \text{ МГц}$, мощность $W = 5 \text{ кВт}$)

Примечание: составлено авторами.

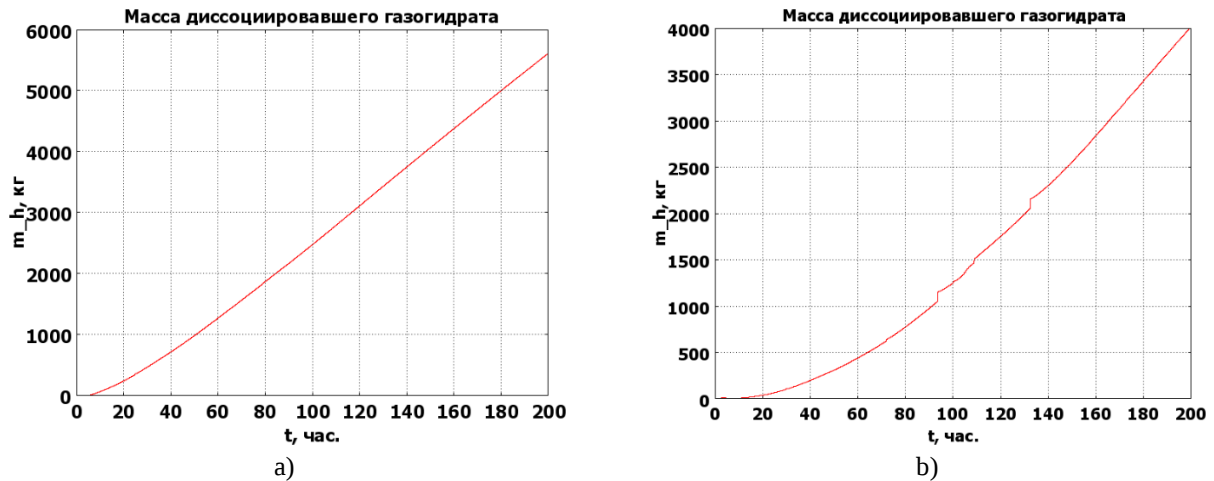


Рис. 2. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт:

а) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$; б) начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,8$
(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400$ МГц, мощность $W = 5$ кВт)

Примечание: составлено авторами.

Значение массы диссоциировавшего газогидрата за время нагрева пласта СВЧ электромагнитным излучением $t = 240$ ч составляет для пласта с начальной гидратонасыщенностью $0,4 - 5\,500$ кг, а для пласта с начальной гидратонасыщенностью $0,8 - 4\,000$ кг. Полученные значения массы диссоциировавшего газогидрата также указывают на то, что процесс разложения газогидрата под воздействием СВЧ электромагнитного излучения идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности.

В работе исследовалось влияние частоты СВЧ электромагнитного излучения на процесс диссоциации газогидрата в пласте. При исследовании модели частоты СВЧ электромагнитного излучения принимались равными $f = 400$ МГц; $1\,000$ МГц; $2\,450$ МГц. Мощность источника излучения равна $5\,000$ Вт.

На рис. 3–5 приведены зависимости массы диссоциировавшего газогидрата и объема выделившегося газа в пласте от времени нагрева СВЧ электромагнитным излучением с частотами 400 МГц, $1\,000$ МГц, $2\,450$ МГц соответственно.

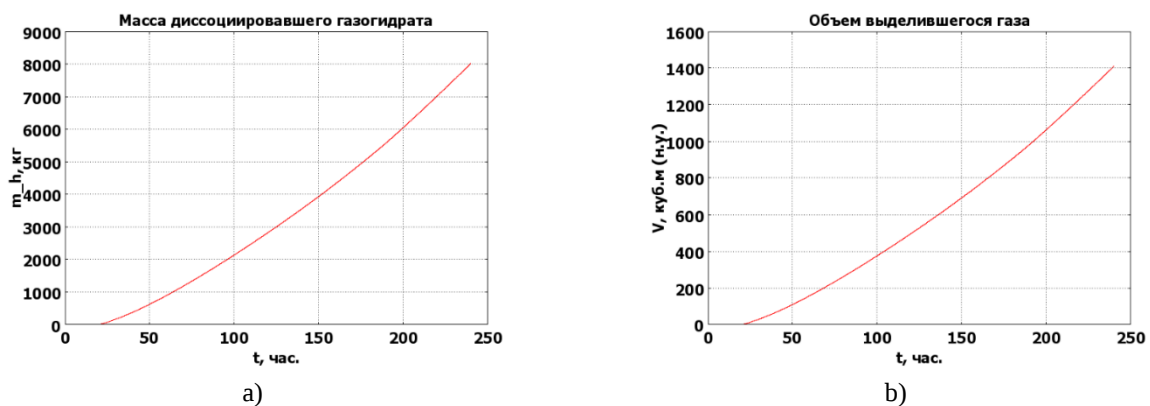


Рис. 3. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 400$ МГц, мощность $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

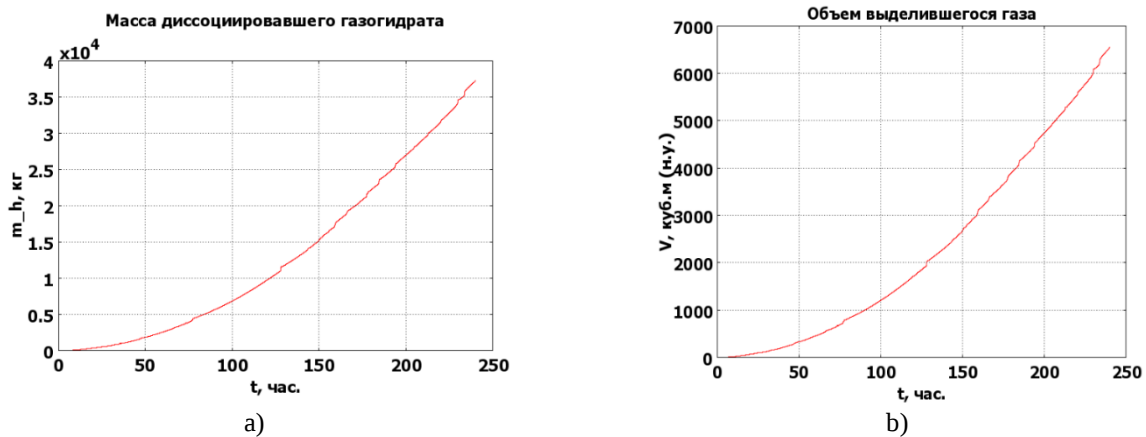


Рис. 4. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 1\,000$ МГц,
мощность $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

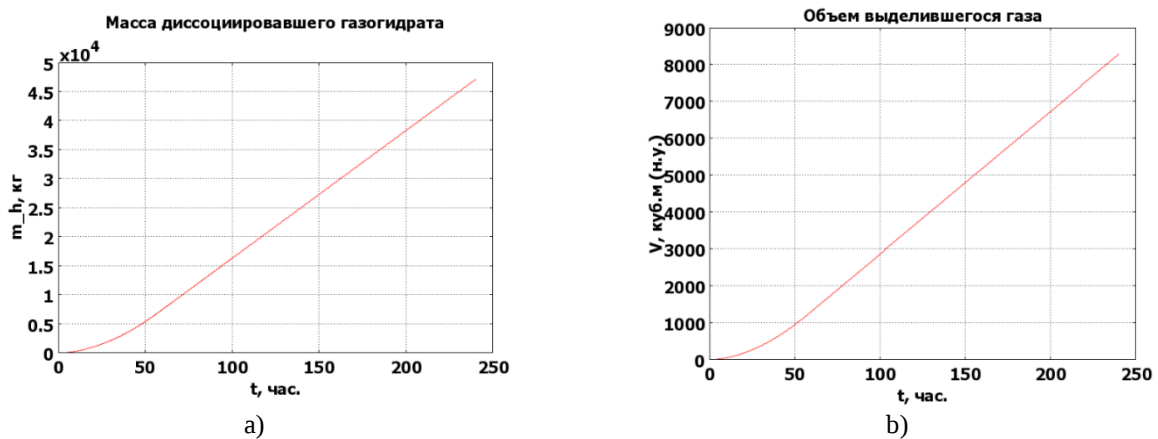


Рис. 5. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата (а) и объема выделившегося газа в пласте (б) от времени нагрева

(параметры источника излучения: частота излучения $f = 2\,450$ МГц,
мощностью $W = 5$ кВт, начальная гидратонасыщенность $s_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

Анализ представленных на рис. 3–5 результатов исследований модели показал, что за время нагрева пласта $t = 240$ ч СВЧ электромагнитным излучением с частотой 400 МГц получили значение массы диссоциировавшего газогидрата равное 8 000 кг, с частотой 1 000 МГц – 37 000 кг, с частотой 2 450 МГц – 47 000 кг. Видно, что СВЧ электромагнитного нагрева излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц имеет значи-

тельно больший эффект по сравнению с частотой 400 МГц.

Дальнейшее сравнение результатов нагрева пласта СВЧ электромагнитным излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц было проведено для больших времен нагрева.

На рис. 6 приведены зависимости массы диссоциировавшего газогидрата в пласте от времени нагрева в интервале от 0 до 720 ч СВЧ электромагнитным излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц соответственно.

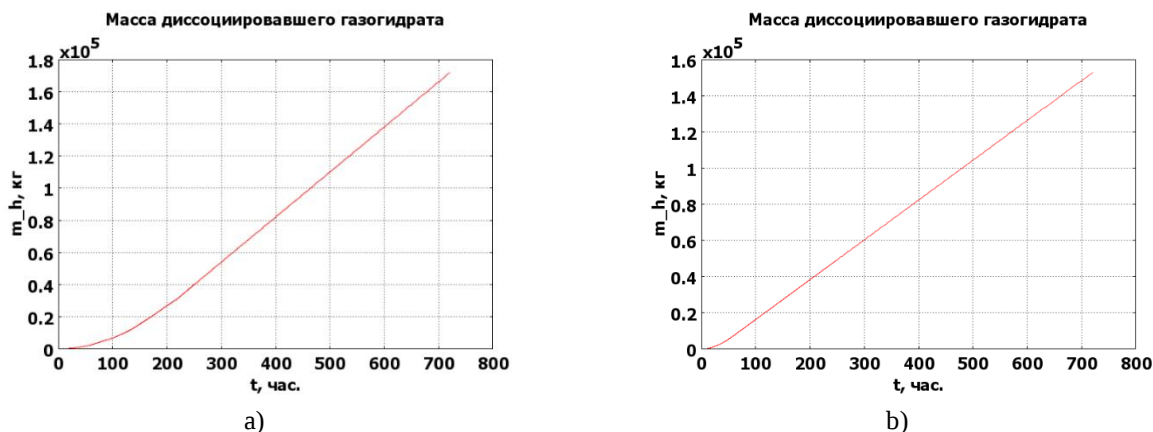


Рис. 6. Зависимость массы диссоциировавшего газогидрата от времени нагрева сверхвысокочастотным электромагнитным излучением с частотами:

а) $f = 1\,000 \text{ МГц}$; б) $f = 2\,450 \text{ МГц}$ (начальная гидратонасыщенность $S_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

Из рис. 6 видно, что за время нагрева пласта $t = 720 \text{ ч}$ СВЧ электромагнитным излучением с частотой $1\,000 \text{ МГц}$ получили значение массы диссоциировавшего газогидрата равное $170\,000 \text{ кг}$, с частотой $2\,450 \text{ МГц}$ – $150\,000 \text{ кг}$. Видно, что СВЧ электромагнитный нагрев излучением с частотой $1\,000 \text{ МГц}$ имеет больший эффект по сравнению с частотой $2\,450 \text{ МГц}$ при временах нагрева больших чем 400 ч .

В работе был произведен расчет энергоэффективности метода добычи газа из газогидрата с использованием СВЧ электромагнитного разогрева излучением с частотами $1\,000 \text{ МГц}$ и $2\,450 \text{ МГц}$. Энергетическую эффективность

добычи газа из газогидрата с использованием СВЧ электромагнитного нагрева пласта определяем по коэффициенту энергоэффективности $K = \text{EROI}$ ($\text{EROI} = \text{Energy return on invested}$), равному отношению получаемой энергии в результате сжигания добытого газа Q_{CH_4} и потребленной энергии из-за работы источника СВЧ электромагнитного излучения $E_{ЭМ}$ [16].

На рис. 7 приведены зависимости коэффициента энергоэффективности K от времени нагрева в интервале от 0 до 720 ч СВЧ электромагнитным излучением с частотами $1\,000 \text{ МГц}$ и $2\,450 \text{ МГц}$ соответственно.

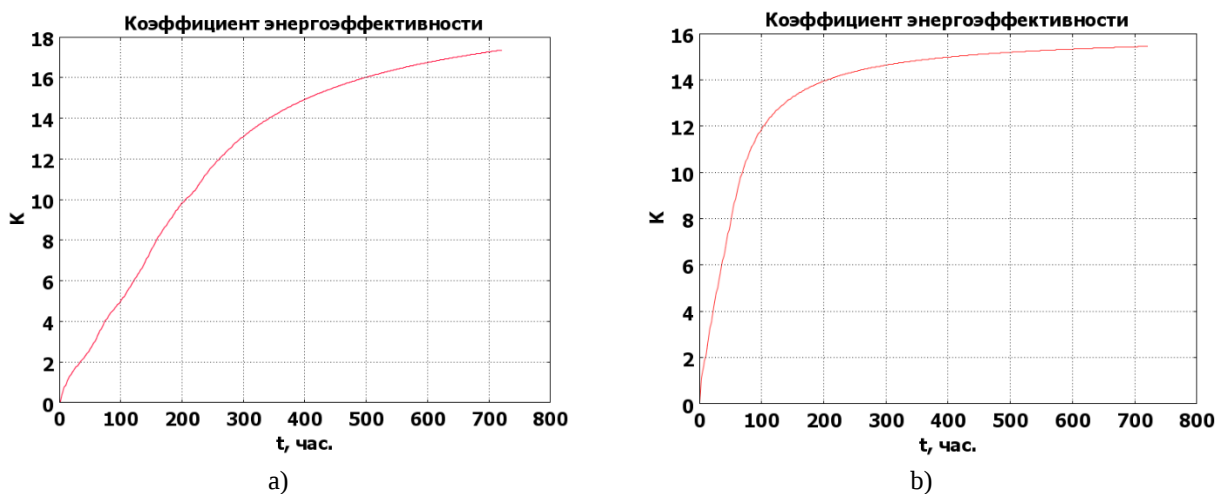


Рис. 7. Зависимость коэффициента энергоэффективности K от времени нагрева

а) $f = 1000 \text{ МГц}$; б) $f = 2450 \text{ МГц}$ (начальная гидратонасыщенность $S_h = 0,4$)

Примечание: составлено авторами.

Из рис. 7 видно, что коэффициент энергоэффективности превышает значение 10 при временах нагрева излучением с частотой 1 000 МГц больших чем 200 ч, с частотой 2 450 МГц – 80 ч. Принято считать, что технология эффективна, если $K = EROI \geq 10$. Таким образом, новый метод добычи газа путем диссоциации газового гидрата, вызванной нагревом гидратосодержащего пласта вследствие действия на него СВЧ электромагнитного излучения, можно считать приемлемым с точки зрения энергетической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые проведено исследование модели диссоциации газогидрата в пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения для разрешенных в промышленном использовании частот 400 МГц, 1 000 МГц и 2 450 МГц. В результате проведения численного исследования модели диссоциации газогидрата в пласте показано, что процесс разложения газогидрата под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения идет быстрее при меньших значениях начальной гидратонасыщенности. Также было уста-

новлено, что электромагнитный нагрев излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц имеет значительно больший эффект по сравнению с частотой 400 МГц. При временах нагрева больших чем 400 часов, электромагнитный нагрев излучением с частотой 1 000 МГц дает лучший результат по сравнению с частотой 2 450 МГц.

Таким образом, для повышения эффективности применения метода добычи газа из газогидрата путем сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева газогидратного пласта можно с помощью предложенной в работе математической модели определять оптимальные частоты источника излучения при заданном времени нагрева пласта конкретного месторождения.

В работе произведен расчет энергоэффективности нового метода добычи газа из газогидрата с использованием сверхвысокочастотного электромагнитного разогрева излучением с частотами 1 000 МГц и 2 450 МГц и показано, что этот метод может быть эффективным ($EROI \geq 10$) и конкурентоспособным по сравнению с традиционными методами термического воздействия на пласт.

Список источников

1. Makogon Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy. *Journal of natural gas science and engineering*. 2010;2(1):49–59.
2. Мастепанов А. М. Газогидраты в перспективном мировом энергетическом балансе: оценки, проблемы и необходимые условия // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 5. С. 42–48.
3. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P. et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*. 2016;162:1633–1652.
4. Гудзенко В. Т., Вареничев А. А., Громова М. П. Мировая экономика и газогидраты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 10. С. 43–57. DOI 10.25018/0236-1493-2018-10-0-43-57.
5. Yang J., Okwananke A., Tohidi B. et al. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration. *Energy Convers Manage*. 2017;136:431–438.
6. Якушев В. С. Разработка нетрадиционных ресурсов газа в России // Газовая промышленность. 2013. № 6. С. 20–24.

References

1. Makogon Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy. *Journal of natural gas science and engineering*. 2010;2(1):49–59.
2. Mastepanov A. M. Use of gas-hydrates in perspective world energy balance: Evaluation, problems and the required conditions. *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. 2014;(5):42–48. (In Russian).
3. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P. et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*. 2016;162:1633–1652.
4. Gudzenko V. T., Varenichev A. A., Gromova M. P. World economy and gas-hydrates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(10):43–57. DOI 10.25018/0236-1493-2018-10-0-43-57. (In Russian).
5. Yang J., Okwananke A., Tohidi B. et al. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration. *Energy Convers Manage*. 2017;136:431–438.
6. Yakushev V. S. Razrabotka netraditsionnykh resursov gaza v Rossii. *Gazovaia promyshlennost*. 2013;(6):20–24. (In Russian).
7. Shang S., Gu L., Zhan L. et al. Application of horizontal well to gas production from a hydrate reservoir

7. Shang S., Gu L., Zhan L. et al. Application of horizontal well to gas production from a hydrate reservoir with free gas and high irreducible water. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021;94:104102.
8. Zhu J., Yi L., Yang Z. et al. Numerical simulation on the in situ upgrading of oil shale reservoir under microwave heating. *Fuel*. 2021;287:119553.
9. Zhao J., Liu Y., Guo X. et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization. *Applied Energy*. 2020;260:114275.
10. Feng J. C., Wang Y., Li X.-S. Dissociation characteristics of water-saturated methane hydrate induced by huff and puff method. *Applied Energy*. 2018;211:1171–1178.
11. Wang B., Dong H., Fan Z. et al. Numerical analysis of microwave stimulation for enhancing energy recovery from depressurized methane hydrate sediments. *Applied Energy*. 2020;262:114559.
12. Gupta A. K., Yadav R., Das M. K. et al. Implementation of a multi-layer radiation propagation model for simulation of microwave heating in hydrate reservoirs. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2021;32(2):684–713.
13. Петров Е. А., Джариев И. Э., Попов О. Р. и др. Подход к прогнозированию универсальных динамических процессов на примере моделирования электромагнитного воздействия на газогидратные пласты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 6. С. 56–66. DOI 10.25018/0236_1493_2023_6_0_56.
14. Сысоев С. М., Алексеев М. М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением // Вестник кибернетики. 2019. № 4. С. 6–16.
15. Джариев И. Э., Петров Е. А., Сысоев С. М. Учет долговременного влияния электромагнитного разогрева нефтяного пласта на дебит скважины // Проблемы и решения автоматизации XXI века : сб. материалов V Национал. науч.-практич. студ. конф., 25–26 марта 2022 г., г. Сургут. Сургут : ИЦ СурГУ, 2022. С. 27–33.
16. Сысоев С. М., Алексеев М. М., Петров Е. А. Численное моделирование процесса разложения газогидрата в пористой среде, вызванного сверхвысокочастотным электромагнитным нагревом // Вестник кибернетики. 2021. № 2. С. 60–71. DOI 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
17. Kim H. C., Bishnoi P. R., Heidemann R. A. et al. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chemical Engineering Science*. 1987;42(7):1645–1653.
- with free gas and high irreducible water. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021;94:104102.
8. Zhu J., Yi L., Yang Z. et al. Numerical simulation on the in situ upgrading of oil shale reservoir under microwave heating. *Fuel*. 2021;287:119553.
9. Zhao J., Liu Y., Guo X. et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization. *Applied Energy*. 2020;260:114275.
10. Feng J. C., Wang Y., Li X.-S. Dissociation characteristics of water-saturated methane hydrate induced by huff and puff method. *Applied Energy*. 2018;211:1171–1178.
11. Wang B., Dong H., Fan Z. et al. Numerical analysis of microwave stimulation for enhancing energy recovery from depressurized methane hydrate sediments. *Applied Energy*. 2020;262:114559.
12. Gupta A. K., Yadav R., Das M. K. et al. Implementation of a multi-layer radiation propagation model for simulation of microwave heating in hydrate reservoirs. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2021;32(2):684–713.
13. Petrov E. A., Dzhariev I. E., Popov O. R. et al. An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect on gas-hydrate strata. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):56–66. DOI 10.25018/0236_1493_2023_6_0_56. (In Russian).
14. Sysoev S. M., Alekseev M. M. Numerical simulation of the microwave heating of an oil reservoir. *Proceedings in Cybernetics*. 2019;(4):6–16. (In Russian).
15. Dzhariev I. E., Petrov E. A., Sysoev S. M. Accounting for the long-term influence of the electromagnetic heating of the oil reservoir on the well yield. In: *Proceedings of the V National Research-to-Practice Conference "Problemy i resheniia avtomatizatsii XXI veka"*, March 25–26, 2022, Surgut. Surgut: Publishing House of SurSU; 2022. p. 27–33. (In Russian).
16. Sysoev S. M., Alekseev M. M., Petrov E. A. Numerical simulation of the decomposition of gas hydrate in a porous medium using microwave heating. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(2):60–71. DOI 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
17. Kim H. C., Bishnoi P. R., Heidemann R. A. et al. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chemical Engineering Science*. 1987;42(7):1645–1653.

Информация об авторах

С. М. Сысоев – кандидат физико-математических наук.
Е. А. Петров – аспирант, младший научный сотрудник.
И. Э. Джариев – аспирант, младший научный сотрудник.

Information about the authors

S. M. Sysoev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics).
E. A. Petrov – Postgraduate, Junior Researcher.
I. E. Dzhariev – Postgraduate, Junior Researcher.

Научная статья
УДК 622.234.573
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-68-74

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ КРИВОЙ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОСЛЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Елена Сергеевна Швец

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
elena777angel@mail.ru

Аннотация. В статье представлен анализ исследований скважин методом кривой падения давления после гидроразрыва пласта за 2018–2019 гг., показавший, что 67 % исследований неинформативны, а 33 % достоверны. Рассмотрены причины отсутствия некоторых параметров исследований и проведен детальный анализ возможных отклонений результатов исследований от дизайн-проекта на гидроразрыв пласта. Отмечено, что полудлины трещины и пластовые давления, определенные по гидродинамическим исследованиям скважин, отличаются от плановых. По результатам обработки кривой падения давления определена зависимость времени, необходимого для диагностирования радиального режима фильтрации, от диапазона проницаемостей коллектора и значений полудлины созданной трещины и предложен подход к определению характера развития трещины на основе графика Нолте – Смита для получения параметров, значимых для планирования, контроля и анализа разработки месторождений и геолого-технических мероприятий и определяющих продуктивность скважины и площадь притока после проведения операции гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: контроль ГРП, исследование скважин методом кривой падения давления (КПД), полудлина созданной трещины, пластовое давление, график Нолте – Смита

Для цитирования: Швец Е. С. Анализ результатов исследований методом кривой падения давления после гидроразрыва пласта // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-68-74.

Original article

ANALYZING RESULTS OF THE WELL TESTING USING PRESSURE DRAW-DOWN CURVE METHOD AFTER HYDRAULIC FRACTURING

Elena S. Shvets

Surgut State University, Surgut, Russia
elena777angel@mail.ru

Abstract. The study presents an analysis of well testing using the pressure draw-down curve method after hydraulic fracturing in 2018–2019. According to the analysis, that 67 % of studies are not data-supported, whereas 33 % are credible. Some study parameters were not employed due to the reasons described in the article. A scrutinized analysis of possible deviations in the results of the studies from the design concept for hydraulic fracturing is conducted. It is noted that fracture half-length and formation pressure determined by well testing differ from those determined by planning. Based on the results of the pressure draw-down curve, the author determines the dependence of the time required for the diagnosis of radial filtration mode on the range of reservoir permeability and the value of the half-length of a fracture. Based on the Nolte–Smith plot, an approach to determining the nature of fracture development is proposed in order to obtain parameters significant for planning, control, and analysis of field development and geological and engineering activities and are used for detecting well deliverability and inflow area created due to hydraulic fracturing.

Keywords: hydraulic fracturing control, well testing with pressure draw-down curve, fracture half-length, formation pressure, Nolte–Smith plot

For citation: Shvets E. S. Analyzing results of the well testing using pressure draw-down curve method after hydraulic fracturing. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-68-74.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в разработку вводятся месторождения с низкопроницаемыми и сложнопостроенными коллекторами. Традиционные виды гидродинамических исследований, такие как кривая восстановления давления (КВД) и кривая падения давления (КПД), направленные на получение информации об энергетическом состоянии и фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС) пласта, применяемые при проектировании и контроле разработки месторождений, планировании геолого-технических мероприятий, в том числе гидроразрыве пласта (ГРП), требуют продолжительного времени простоя скважин.

На сегодняшний день большинство вводимых из бурения скважин фактически не охвачены гидродинамическими исследованиями. Отсутствует информация об энергетическом состоянии и ФЭС удаленной зоны пласта.

Исследования с применением контейнера К-2 изначально применялись только для кон-

троля процесса проведения ГРП и освоения скважин. Накопленные статистические данные в области проведения, обработки и интерпретации данных о ФЭС удаленной зоны пласта позволили расширить границы применимости данной технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Приведен анализ исследований скважин методом КПД в режиме неустановившейся фильтрации после ГРП. Технологической особенностью данного вида исследований является то, что в скважину до проведения операции ГРП в компоновке насосно-компрессорных труб (НКТ) спускается контейнер К-2 и расположенные в нем автономные преобразователи давления и температуры (АМТ) для последующей регистрации давления и температуры на забое скважины как в процессе проведения ГРП, так и после него (рис. 1, 2) [1].

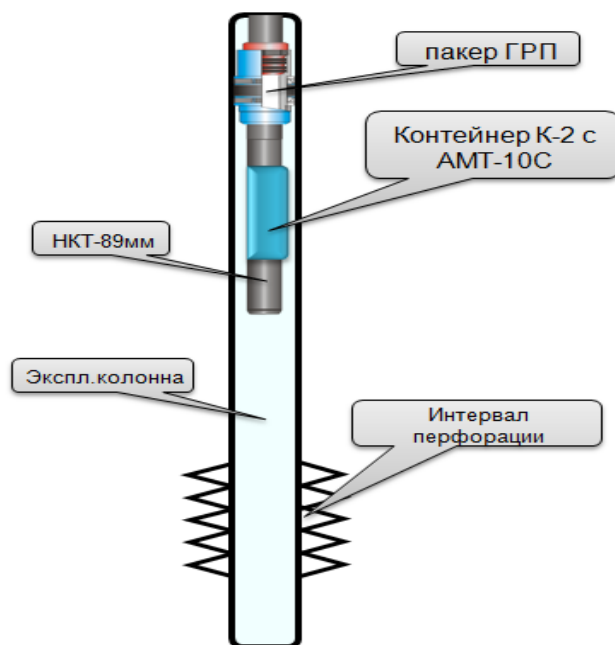


Рис. 1. Компоновка исследовательского оборудования для регистрации забойного давления и температуры

Примечание: составлено автором.

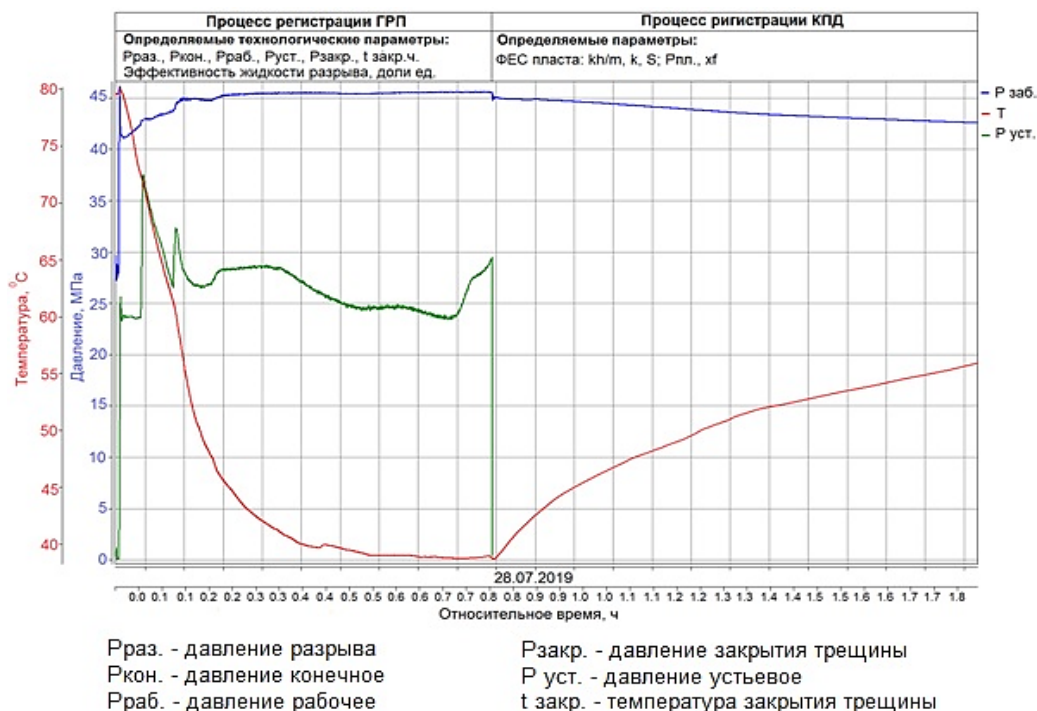


Рис. 2. График зависимости параметров гидроразрыва пласта и кривая падения давления

Примечание: составлено автором.

Исследования КВД позволяют получать информацию после проведения ГРП в период ожидания деструкции технологической жидкости (геля) во время простоя скважины [2] и определить ФЕС пласта (проницаемость, гидродоупроводность, скин-фактор, пластовое давление) при условии диагностирования радиального режима фильтрации [3]. Значения этих параметров являются определяющими при оценке продуктивности скважины после проведения операции ГРП.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования КВД после ГРП производятся с применением контейнера К-2 с 2011 г.

За этот период выполнено более 100 исследований, анализ 67 исследований, выполненных за период с 2018 по 2019 гг., показал следующие результаты (рис. 3):

- давление разрыва, время закрытия трещины, давление закрытия трещины, эффективность жидкости разрыва, мгновенное давление в остановленной скважине (ISIP – instant shut in pressure), определенные по технологическим параметрам ГРП, являются информативными в 100 % исследований (67 скважин);

- пластовое давление, полудлина трещины и проницаемость пласта определены в 42 % исследований (28 скважин).

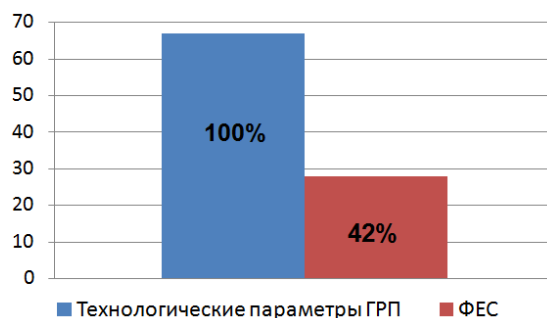


Рис. 3. Статистика наличия параметров исследований

Примечание: составлено автором.

Из приведенных данных видно, что основными причинами отсутствия параметра пластового давления и ФЕС являются недостаточное время исследований для выхода скважин на радиальный режим фильтрации и отсутствие монотонности давления во время регистрации КПД [4–8].

Проведен сравнительный анализ параметров полудлины созданной трещины и пластового давления по 7 скважинам, вышедшим на радиальный режим фильтрации в 2018 г.

При анализе параметров полудлины созданной трещины и пластового давления после интерпретации по семи скважинам наблюдается расхождение значений, определенных по гидродинамическим исследованиям скважин (ГДИС), от плановых по дизайн-проекту на проведение ГРП более чем на 15 %. Отличие фактических значений от проектных по параметру полудлины составляет от 1 до 66 м, по параметру пластового давления – от 2–12 МПа (табл. 1).

Таблица 1

Планируемые и полученные параметры в результате интерпретации кривой падения давления после гидроразрыва пласта

№п/п	Скважина	Месторождение	Пласт	Дата проведения исследования	Глубина спуска прибора, м	Параметры расчетные по дизайн-проекту					Интерпретация КПД после ГРП					
						P _{раз} , МПа	P _{пл} на ВНК, МПа	k, мД	Xf, м	t _{рад} , ч	P _{пл} на ВНК, МПа	ε, мД*м	k, мД	S	Xf, м	
1	1	Х	ЮС2	15.05.2018	2910	23,0/40,8	25,23	3,96	112	43,54	21,25	232,44	5,61	3,54	104,0	
2	2	У	ЮС2	20.04.2018	3057	33,3/45,4	28,37	3,20	114	88,81	21,74	30,26	1,47	-5,25	93,8	
3	3	У	ЮС2	03.07.2018	2960	32,0/47,3	24,89	4,04	98	16,8	25,18	63,53	1,64	2,37	63,1	
4	4	У	ЮС2	24.07.2018	2966	37,0/39,7	25,63	3,38	116	25,89	13,12	57,11	1,51	-1,79	50,2	
5	5	У	ЮС2	12.09.2018	3125	30,0/43,3	25,83	3,00	125	25,89	13,84	72,06	6,8	-1,97	62,3	
6	6	У	ЮС2	14.09.2018	3170	34,0/42,5	24,30	4,60	119	19,8	25,87	162,37	2,16	-5,78	111,0	
7	7	У	ЮС2	25.09.2018	3171	32,0/44,5	24,91	3,38	114	30,32	20,38	36,94	1,35	-5,47	113,0	

$P_{раз}$ - давление разрыва, МПа

$P_{пл}$ - давление пластовое, МПа

k - проницаемость, мД

X_f - полудлина трещины, м

$t_{рад.}$ - время выхода на радиальный режим работы скважины, ч

ε - гидропроводность, мД*м

S - скин-фактор (дополнительное фильтрационное сопротивление), ед.

Примечание: составлено автором.

Минимальное необходимое время регистрации КПД (расчетное время достижения радиального режима фильтрации) можно

определить в зависимости от диапазона проницаемостей коллектора и значений полудлины созданной трещины (рис. 4).

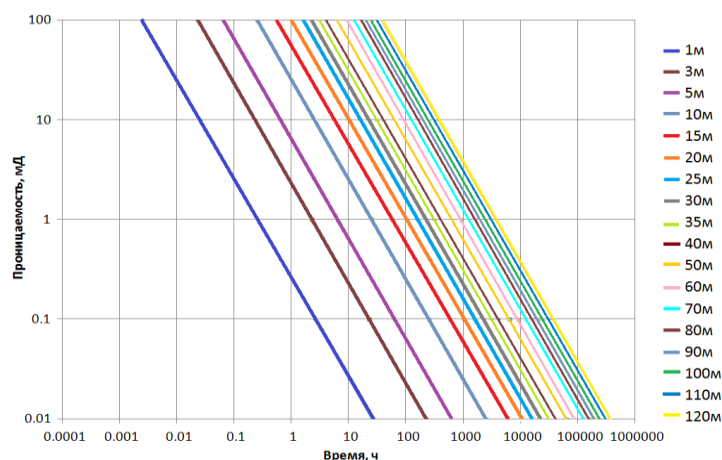


Рис. 4. Номограмма для определения времени выхода на радиальный режим фильтрации в зависимости от проницаемости и полудлины трещины

Примечание: составлено автором.

Исходя из номограммы следует, что чем меньше полудлина и больше проницаемость, тем меньше требуется времени для достижения радиального режима. На основании обобщения результатов исследований, проведенных за период с 2018 по 2019 гг., следует, что фактическое время выхода на радиальный режим фильтрации по пласту ЮС2 для вновь вводимых скважин составит от 14 до 86 ч (в среднем – 44 ч).

При анализе исследований выявлено, что по пяти скважинам, вышедшим на радиальный режим фильтрации, наблюдается несоответствие планируемых значений полудлины трещины фактическим в диапазоне от 1 до 66 м. Отличие значений, полученных по результатам ГДИС от дизайн-проекта составляет от 1 до 57 %. Расхождение по такому параметру, как полудлина, отличается от дизайн-проекта по трем скважинам более чем на 15 %. Причинами расхождения могут быть

как пониженное (относительного начального) пластовое давление, так и изменчивость упруго-механических свойств пласта.

Дополнительным информативным инструментом, позволяющим подтвердить или опровергнуть факт недостижения планируемой полудлины трещины на качественном уровне, является график Нолте – Смита, который графически характеризует основные этапы развития геометрии трещины в процессе проведения операции ГРП. Построение и последующий анализ графика Нолте – Смита позволяет диагностировать по углу наклона кривой изменения давления характерные направления развития трещины в длину, высоту или ограничение ее развития в результате экранирования, где: 0 – радиальный рост в пределах пласта, I – рост преимущественно в длину, II – рост в длину и в высоту, или рост утечек, IIIA – концевое экранирование, IIIB – экранирование у ствола, IV – рост в высоту (рис. 5).

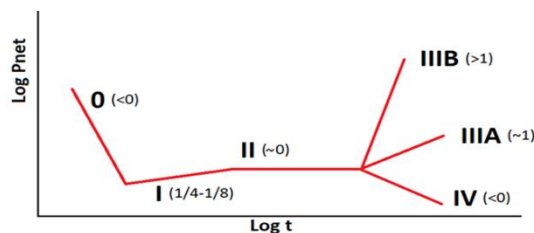


Рис. 5. График Нолте – Смита
 Примечание: составлено автором.

Результаты анализа графика Нолте – Смита скважины № 4 позволяют увидеть следующее: рост трещины преимущественно в длину, далее наблюдается развитие трещины в высоту или рост утечек, последний участок говорит об ограничении развития

трещины. Этот анализ является дополнительным подтверждением результатов исследований полудлины трещины, где видно расхождение с дизайн-проектом более чем на 15 % (рис. 6).

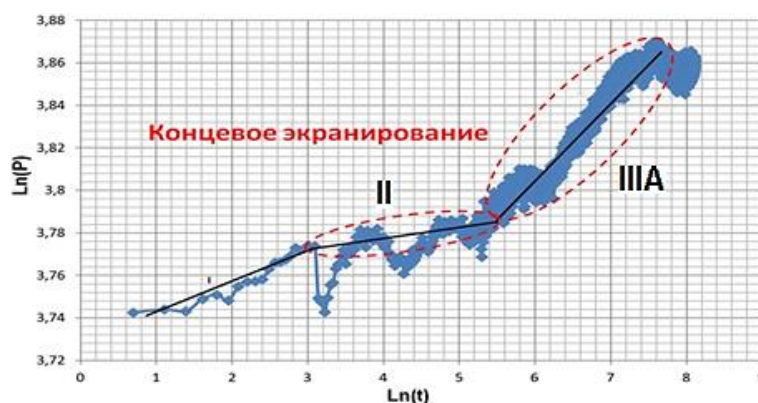


Рис. 6. График Нолте – Смита скважины № 4
 Примечание: составлено автором.

При анализе исследований выявлено, что по 5 скважинам, вышедшим на радиальный режим фильтрации, наблюдается расхождение расчетного (из дизайн-проекта) пластового давления с фактическим в диапазоне от 0,3 до 12,5 МПа (в процентном соотношении – от 1 до 71 %). Определенное пластовое давление по 5 скважинам отличается от значений из дизайн-проекта на проведение ГРП более чем на 15 %.

Доказательством относительно низкого пластового давления по скважинам № 5 и № 2 является сравнительный анализ работы рядом расположенных скважин на двух исследуемых участках. Значения дебита жидкости, пластового давления, полудлины созданной трещины после проведенного ГРП и значения проводимости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры работы скважин после операции гидроразрыва пласта

Скважина	Вид ГТМ	Год проведения	Вес пропантa, т	Q нефти до ГРП, т/сут	Q нефти после ГРП, т/сут	Прирост, т/сут	kh	Рпл, МПа (по дизайну/по рез-там исслед.)	X _i , по дизайну/по рез-там исслед.
Участок №1									
5	объемный	2018	60	8	13	5	426.8	25,8/13,8	125,0/62,3
13	объемный	2018	60	5	23	18	414.0	28.3	
15	многообъемный	2019	65	5	25	20	500.0	22.9	
Участок №2									
2	объемный	2018	40	из бурения	20	20	153.3	28,3/21,7	114,0/93,8
16	стандартный	2019	30	из бурения	45	45	16.5	24.5	
19	объемный	2019	40	из бурения	60	60	18.8	21.9	
10	объемный	2018	50	из бурения	24	24	10.2	29.7	
15	объемный	2018	40	из бурения	21	21	11.7	24.5	

Примечание: составлено автором.

По скважине № 5 (участок № 1) дебит после проведения операции ГРП меньше, чем по окружающим ее скважинам при соизмеримых значениях проводимости (kh) и схожих значениях массы закаченного пропантa.

Сравнительный анализ работы скважины № 2 (участок № 2) показал, что при значении проводимости на порядок выше, чем в рядом расположенных скважинах, наблюдается меньший прирост нефти. Данный факт косвенно подтверждает недостижение параметра полудлины трещины проектных значений в связи с заниженным пластовым давлением и, как следствие, измененных упруго-механических и фильтрационно-емкостных свойств пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение исследований методом кривой падения давления после гидроразрыва пласта с использованием контейнера К-2 и расположенных в нем автономных преобразователей давления и температуры имеют следующие преимущества:

- выполнение за одну спуско-подъемную операцию как мониторинга операции ГРП,

так и термогидродинамического зондирования призабойной и удаленных зон пласта;

- незначительные капитальные и эксплуатационные затраты, высокая информативность и надежность применяемой аппаратуры, методов исследования, обработки и, как следствие, экономическая и технологическая привлекательность;

- актуальность и новизна метода диагностики для осуществления контроля разработки месторождений и оценки эффективности проводимых геолого-технических мероприятий.

Кривая падения давления после гидроразрыва пласта является самым доступным источником информации, поскольку незначительные эксплуатационные затраты, высокая информативность и надежность метода делают данный вид исследования экономически и технологически привлекательным инструментом. Получаемые параметры являются немаловажными для планирования, контроля и анализа разработки месторождений, а также геолого-технических мероприятий, в том числе таких как гидроразрыв пласта.

Список источников

1. Шарипов А. М. Моделирование термогидродинамических процессов при диагностике параметров трещин гидроразрыва нефтяного пласта : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2017. 24 с.
2. Мешков В. М., Клюкин С. С., Ихсанов М. А. и др. Опыт применения автономных преобразователей давления и температуры при проведении ГРП // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 7. С. 70–74.
3. Кокурина В. В., Кременецкий М. И. Диагностика и изучение нестабильных трещин в нагнетательных скважинах гидродинамическими и промыслово-геофизическими методами // Современные технологии гидродинамических исследований скважин на всех стадиях разработки месторождение : материалы 9-й науч.-техн. конф. 12–14 мая 2010 г., г. Томск. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. С. 15–17.
4. Деева Т. А., Камартдинов М. Р., Кулагина Т. Е. и др. Гидродинамические исследования скважин. Томск, 2004. 340 с.
5. Бузинов С. Н., Умрихин И. Д. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М. : Недра, 1973. 246 с.
6. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М. : Недра, 1984. 208 с.
7. Шагиев Р. Г. Исследование скважин по КВД. М. : Наука, 1998. 302 с.
8. Желтов Ю. П. Деформации горных пород. М. : Недра, 1966. 198 с.

Информация об авторе

Е. С. Шве́ц – старший преподаватель.

References

1. Sharipov A. M. Modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov pri diagnostike parametrov treshchin gidrorazryva neftianogo plasta. Extended abstract of Cand. Sci. (Physics and Mathematics) Thesis. Ufa; 2017. 24 p. (In Russian).
2. Meshkov V. M., Klyukin S. S., Ikhsanov M. A. et al. Practical experience in applying autonomous pressure and temperature converters used in hydro-fracturing. *Neft. Gaz. Novatsii*. 2013;(7):70–74. (In Russian).
3. Kokurina V. V., Kremenetsky M. I. Diagnostika i izuchenie nestabilnykh treshchin v nagnetatelnykh skvazhinakh gidrodinamicheskimi i promyslovo-geofizicheskimi metodami. In: *Proceedings of the 9th Scientific and Engineering Conference "Sovremennye tekhnologii gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin na vseh stadiakh razrabotki mestorozhdenie"*, May 12–14, 2010, Tomsk. Tomsk: Publishing House of Tomsk University; 2010. p. 15–17. (In Russian).
4. Deeva T. A., Kamartdinov M. R., Kulagina T. E. et al. *Gidrodinamicheskie issledovaniia skvazhin*. Tomsk; 2004. 340 p. (In Russian).
5. Buzinov S. N., Umrikhin I. D. *Gidrodinamicheskie metody issledovaniia skvazhin i plastov*. Moscow: Nedra; 1973. 246 p. (In Russian).
6. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. *Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnykh plastakh*. Moscow: Nedra; 1984. 208 p. (In Russian).
7. Shagiev R. G. *Issledovanie skvazhin po KVD*. Moscow: Nauka; 1998. 302 p. (In Russian).
8. Zheltov Yu. P. *Deformatsii gornykh porod*. Moscow: Nedra; 1966. 198 p. (In Russian).

Information about the author

E. S. Shvets – Senior Lecturer.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 62-752:629.4.015:519.7

DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-75-86

РАЗВИТИЕ РЫЧАЖНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ СВЯЗНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЖЕНИЙ

Андрей Владимирович Елисеев^{1✉}, Николай Константинович Кузнецов²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹ eavsh@ya.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

² knik@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Аннотация. В статье представлено развитие системного подхода к оценке, контролю и формированию динамических состояний на основе представлений о рычажных связях элементов технических объектов в условиях связанных вибрационных нагружений. Методология исследования основана на структурном математическом моделировании, позволяющем сопоставлять структурные схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления механическим колебательным системам, которые используются в качестве расчетных схем технических объектов. Разработана рычажная интерпретация совокупности обобщенных динамических состояний для механических колебательных систем, образованных твердым телом с тремя степенями свободы, существенные особенности которых отображаются количеством резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и знакоопределенных форм динамических взаимодействий. На основе рычажной связи разработана система обобщенных представлений, позволяющая отобразить роль связности вибрационных нагружений в формировании граничных динамических состояний механических колебательных систем. Результаты представлены аналитическими выражениями, графическими изображениями и численными экспериментами.

Ключевые слова: технический объект, вибрационные нагружения, структурное математическое моделирование, упругие элементы, механическая колебательная система, твердое тело, связанные кинематические возмущения, передаточные функции, рычажные связи, обобщенный рычаг системы, динамическое состояние системы

Для цитирования: Елисеев А. В., Кузнецов Н. К. Развитие рычажных представлений в оценке динамических состояний механических колебательных систем в условиях связанных вибрационных нагружений // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 75–86. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-75-86.

Original article

DEVELOPING A LEVEL CONCEPT IN ASSESSMENT OF THE DYNAMIC STATE OF MECHANICAL OSCILLATORY SYSTEMS SUBJECTED TO CONNECTED VIBRATIONAL LOADINGS

Andrey V. Eliseev^{1✉}, Nikolay K. Kuznetsov²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ eavsh@ya.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

² knik@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Abstract. The article presents a frame of a systematic approach to assessment, control, and formation of dynamic states based on the concept of level ties of elements of technical objects subjected to connected

vibrational loadings. The methodological basis of the study comprises structural mathematical modeling that allows for a comparison of mechanical oscillatory systems, which are used as computational models for technical objects, with structural schemes of automated operating systems that are equivalent to dynamic relations. A level interpretation of total generalized dynamic states is designed for mechanical oscillatory systems created with solid body with three degrees of freedom. Their significant features are reflected in the number of resonances, modes of oscillation amplitude setting to zero, and definite form of dynamic interactions. Based on the level ties, a system of general concepts is developed to depict the role of connection of vibrational loadings in creating border dynamic states of mechanical oscillatory systems. The results consist of analytical equations, graphical images, and numerical experiments.

Keywords: technical object, vibrational loadings, structural mathematical modeling, resilient elements, mechanical oscillatory system, solid body, connected kinematic disturbances, transfer functions, level ties, general level of a system, dynamic state of a system

For citation: Eliseev A. V., Kuznetsov N. K. Developing a level concept in assessment of the dynamic state of mechanical oscillatory systems subjected to connected vibrational loadings. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):75–86. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-75-86.

ВВЕДЕНИЕ

Периодические техногенные катастрофы ставят проблемы обеспечения безопасности технических объектов автомобильного транспорта, авиации, судостроения, объектов, связанных с производством и транспортировкой опасных веществ, внимания требуют также причины опасных событий на технических объектах транспортного и технологического назначения, находящихся в условиях интенсивных вибрационных нагружений [1–3]. Необходимость учета вибрационных нагружений обуславливают разработку методологического базиса решения задач в области динамики машин, теории колебаний, теории автоматического управления, системного анализа, теории катастроф [4]. На начальных этапах моделирования динамических состояний технических объектов в качестве расчетных схем возможно обоснованное использование линейных механических колебательных систем, образованных твердым телом с конечным числом степеней свободы [5]. Для моделирования динамических состояний технических объектов используется структурный подход – сопоставление структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления механическим колебательным системам [6]. Особенности динамических состояний могут быть определены на основе передаточных функций, для которых входным сигналом служит колебание точки опорной поверхности, а выходным – колебание точки системы [7]. Для оценки динамических состояний исполь-

зуется концепция динамических инвариантов, основанная на разбиении динамических состояний системы на классы, обладающие одинаковыми существенными особенностями в виде количества резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и знакоопределенных форм динамических взаимодействий элементов [8].

Вместе с тем концепция динамических инвариантов, получившая развитие для систем, динамическое состояние которых оценивается на основе податливости, недостаточно детализирована для систем, в которых способом оценки динамических состояний служат рычажные связи [9].

Предлагаемая статья посвящена развитию представлений о механических колебательных системах, динамические состояния которых оцениваются с помощью рычажных связей.

Основные положения. Постановка задачи. Рассматривается механическая колебательная система в виде плоского твердого тела, установленного на упругие опоры (рис. 1). Твердое тело совершает малые установившиеся колебания, вызванные связными гармоническими синфазными возмущениями опорных поверхностей. Динамические состояния определяются на основе амплитуд колебаний фиксированной точки твердого тела по отношению к амплитуде колебания опорной поверхности. Отношение амплитуд колебаний отображает рычажную связь в зависимости от частоты возмущений. Совокупности динамических состояний определяются связностью кинематических возмущений.

Задача заключается в разработке обобщенных представлений, отображающих особенности рычажных взаимодействий элементов механических колебательных систем, образованных твердым телом с тремя степенями свободы, находящихся в условиях связанных кинематических возмущений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель. Точки A, B, C твердого тела в состоянии статического равновесия имеют координаты $(x_i, y_i, 0)$, $i = 1, 2, 3$. Главные оси инерции совпадают с осями Ox и Oy . Обобщенные координаты (z_0, φ, ψ) отображают вертикальное смещение центра масс

с помощью z_0 , угловые смещения вокруг главных осей – с помощью φ, ψ ; координаты (h_1, h_2, h_3) отображают вертикальные смещения точек A, B, C относительно положений статического равновесия. Векторы $\xi = (z_0, \varphi, \psi)^T$ и $h = (h_1, h_2, h_3)^T$ связаны между собой:

$$h = U\xi, \quad (1)$$

где $U = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}$, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты жесткости.

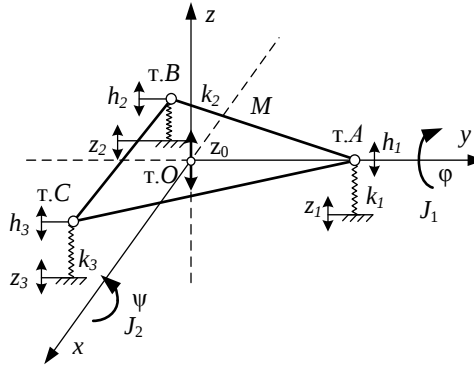


Рис. 1. Расчетная схема механической колебательной системы:

$Oxyz$ – неподвижная система координат; ABC – твердое тело; z_1, z_2, z_3 – опорные поверхности; k_1, k_2, k_3 – упругие элементы; h_1, h_2, h_3 – вертикальные смещения точек A, B, C ; z_0 – смещение центра масс; φ, ψ – малые углы поворотов твердого тела вокруг осей Oy, Ox ; J_1, J_2 – моменты инерции

Примечание: составлено авторами.

Полагая, что M_0 – масса, J_1, J_2 – моменты инерции, z_1, z_2, z_3 – возмущения опорных поверхностей, потенциальная и кинетическая энергии системы имеют вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} \langle K(h - z), (h - z) \rangle, \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{2} \langle M\dot{\xi}, \dot{\xi} \rangle, \quad (3)$$

$$\text{где } K = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} M_0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{pmatrix}, z =$$

$= (z_1, z_2, z_3)^T$, $\langle u, v \rangle$ – скалярное произведение векторов u и v . С учетом (1)–(3) уравнения Лагранжа 2-го рода принимают вид:

$$(U^{-1})^T MU^{-1}\ddot{h} + Kh = Kz. \quad (4)$$

Интегральное преобразование Лапласа (4) с учетом нулевых начальных условий имеет вид:

$$((U^{-1})^T MU^{-1}p^2 + K)\bar{h} = K\bar{z}, \quad (5)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная, $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, ω – частота внешнего возмущения, символ « $\rightarrow$ » над переменными означает преобразование Лапласа [10]. С учетом обозначений:

$$(U^{-1})^T MU^{-1} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где элементы m_{ij} – представляют собой приведенные массо-инерционные коэффициенты,

система (5) может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 2).

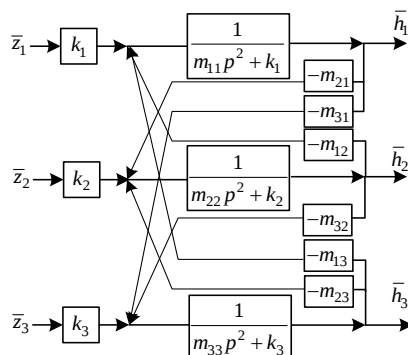


Рис. 2. Структурная схема системы рис. 1
 Примечание: составлено авторами.

На основе рис. 2 строятся передаточные функции, представляющие собой рычажные отношения:

$$W_{11}(p) = \frac{\bar{h}_1}{\bar{z}_1}, \quad (7)$$

$$W_{21}(p) = \frac{\bar{h}_2}{\bar{z}_1}, \quad (8)$$

$$W_{31}(p) = \frac{\bar{h}_3}{\bar{z}_1}. \quad (9)$$

Связность представлена условиями:

$$z_2 = \gamma_2 z_1, \quad (10)$$

$$z_3 = \gamma_3 z_1, \quad (11)$$

где γ_2, γ_3 – коэффициенты связанности.

С учетом (6)–(11) система (5) приводится к виду:

$$\left(\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \times p^2 + \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix} \right) \times \begin{pmatrix} W_{11}(p) \\ W_{21}(p) \\ W_{31}(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \gamma_2 \\ k_3 \gamma_3 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Для фиксированных значений (10), (11) передаточные функции (7)–(9) отражают со-

вокупность существенных динамических особенностей в виде фиксированного количества резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и количества знакоопределенных форм динамических взаимодействий. Множество коэффициентов связности может быть разбито на классы, в которых существенные динамические особенности, представляющие собой своеобразные динамические инварианты, остаются неизменными [8].

Определение граничных значений коэффициентов связности с помощью частотных кривых. Функции W_{11}, W_{21}, W_{31} принимают вид:

$$W_{i1}(p) = \frac{\bar{h}_i}{\bar{z}_1} = \frac{C_i(p)}{A(p)}, \quad (13)$$

где

$$C_i(p) = C_{i1}p^4 + C_{i2}p^2 + C_{i3}, \quad i = 1...3, \quad (14)$$

$$A(p) = A_1p^6 + A_2p^4 + A_3p^2 + A_4,$$

$$C_{11} = \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & m_{13} \\ k_2 \gamma_2 & m_{22} & m_{23} \\ k_3 \gamma_3 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$C_{12} = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & m_{13} \\ k_2 \gamma_2 & k_2 & m_{23} \\ k_3 \gamma_3 & 0 & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & 0 \\ k_2 \gamma_2 & m_{22} & 0 \\ k_3 \gamma_3 & m_{32} & k_3 \end{vmatrix}, \quad (15)$$

$$C_{13} = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ k_2 \gamma_2 & k_2 & 0 \\ k_3 \gamma_3 & 0 & k_3 \end{vmatrix},$$

$$C_{21} = \begin{vmatrix} m_{11} & k_1 & m_{13} \\ m_{21} & k_2 \gamma_2 & m_{23} \\ m_{31} & k_3 \gamma_3 & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$C_{22} = \begin{vmatrix} k_1 & k_1 & m_{13} \\ 0 & k_2 \gamma_2 & m_{23} \\ 0 & k_3 \gamma_3 & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{11} & k_1 & 0 \\ m_{21} & k_2 \gamma_2 & 0 \\ m_{31} & k_3 \gamma_3 & k_3 \end{vmatrix}, \quad (16)$$

$$C_{23} = \begin{vmatrix} k_1 & k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \gamma_2 & 0 \\ 0 & k_3 \gamma_3 & k_3 \end{vmatrix},$$

$$C_{31} = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & k_1 \\ m_{21} & m_{22} & k_2 \gamma_2 \\ m_{31} & m_{32} & k_3 \gamma_3 \end{vmatrix},$$

$$C_{32} = \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & k_1 \\ 0 & m_{22} & k_2 \gamma_2 \\ 0 & m_{32} & k_3 \gamma_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & k_1 \\ m_{21} & k_2 & k_2 \gamma_2 \\ m_{31} & 0 & k_3 \gamma_3 \end{vmatrix}, \quad (17)$$

$$C_{33} = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & k_1 \\ 0 & k_2 & k_2 \gamma_2 \\ 0 & 0 & k_3 \gamma_3 \end{vmatrix},$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & m_{13} \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & k_2 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & k_3 \end{vmatrix},$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ m_{21} & k_2 & 0 \\ m_{31} & 0 & k_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & m_{32} & k_3 \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} k_1 & 0 & m_{13} \\ 0 & k_2 & m_{23} \\ 0 & 0 & m_{33} \end{vmatrix}, A_4 = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Коэффициенты C_{ij} многочленов (14) могут быть представлены в виде:

$$C_{ij} = C_{ij}^{(2)} + \gamma_2 C_{ij}^{(2)} + \gamma_2 C_{ij}^{(3)}. \quad (20)$$

Условия $C_i(p) = 0$ (14) имеют вид:

$$C_{11}^{(1)} p^4 + C_{12}^{(1)} p^2 + C_{11}^{(1)} + \gamma_2 (C_{11}^{(2)} p^4 + C_{12}^{(2)} p^2 + C_{13}^{(2)}) +$$

$$+ \gamma_3 (C_{11}^{(3)} p^4 + C_{12}^{(3)} p^2 + C_{13}^{(3)}) = 0;$$

$$C_{21}^{(1)} p^4 + C_{22}^{(1)} p^2 + C_{23}^{(1)} + \gamma_2 (C_{21}^{(2)} p^4 + C_{22}^{(2)} p^2 + C_{23}^{(2)}) +$$

$$+ \gamma_3 (C_{21}^{(3)} p^4 + C_{22}^{(3)} p^2 + C_{23}^{(3)}) = 0;$$

$$C_{31}^{(1)} p^4 + C_{32}^{(1)} p^2 + C_{33}^{(1)} + \gamma_2 (C_{31}^{(2)} p^4 + C_{32}^{(2)} p^2 + C_{33}^{(2)}) +$$

$$+ \gamma_3 (C_{31}^{(3)} p^4 + C_{32}^{(3)} p^2 + C_{33}^{(3)}) = 0. \quad (21)$$

Если значение $\gamma_2 = \gamma_2^*$ фиксировано, то может быть построена частотная кривая из условий (21) $C_1(j\omega) = 0$:

$$\gamma_3(\omega) = \frac{C_{11}^{(1)} \omega^4 - C_{12}^{(1)} \omega^2 + C_{13}^{(1)} + (C_{11}^{(2)} \omega^4 - C_{12}^{(2)} \omega^2 + C_{13}^{(2)}) \gamma_2^*}{C_{11}^{(3)} \omega^4 - C_{12}^{(3)} \omega^2 + C_{13}^{(3)}}. \quad (22)$$

Граничные значения γ_Γ могут быть определены из условий:

$$\gamma_\Gamma = \gamma_3(\sigma_i), \gamma_\Gamma = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \gamma_3(\omega), \gamma_\Gamma = \lim_{\omega \rightarrow 0} \gamma_3(\omega),$$

$$\gamma_\Gamma = (\arg(\gamma_3'(\omega) = 0)). \quad (23)$$

Разбиение множества значений $(-\infty, +\infty)$ параметра γ_3 принимает вид:

$$(-\infty, \gamma_\Gamma^{(1)}), \{\gamma_\Gamma^{(1)}\}, (\gamma_\Gamma^{(1)}, \gamma_\Gamma^{(2)}), \{\gamma_\Gamma^{(2)}\},$$

$$\dots, \{\gamma_\Gamma^{(n)}\}, (\gamma_\Gamma^{(n)}, +\infty), \quad (24)$$

где в каждой точке или интервале набор динамических особенностей рычажных связей представлен динамическим инвариантом.

Построение динамических инвариантов рычажных отношений. Пусть параметры системы (рис. 1):

$$x_1 = 0, y_1 = l_1, x_2 = -l_2, y_2 = -l_3, x_3 = l_2,$$

$$y_3 = -l_3, l_1 = 0,5 \text{ м}, l_2 = 0,1 \text{ м}, l_3 = 0,3 \text{ м}, \quad (25)$$

$$M = 100 \text{ кг},$$

$$k_1 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Н/м}, k_2 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Н/м},$$

$$k_3 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Н/м}, J_1 = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (26)$$

$$J_2 = 80 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Собственные частоты:

$$\begin{aligned} \sigma_1 \approx 6,32 \text{ рад/с}, \sigma_2 \approx 28,07 \text{ рад/с}, \\ \sigma_3 \approx 63,74 \text{ рад/с}. \end{aligned} \quad (27)$$

Собственная частота σ_1 совпадает с одной из частот обнуления амплитуд колебаний θ_1 , не зависящей от коэффициента связанности γ_3 :

$$\theta_1 \approx 6,32 \text{ рад/с}. \quad (28)$$

Для построения разбиения (24) строится частотная кривая (22) на интервале $(0, +\infty)$ (рис. 3а):

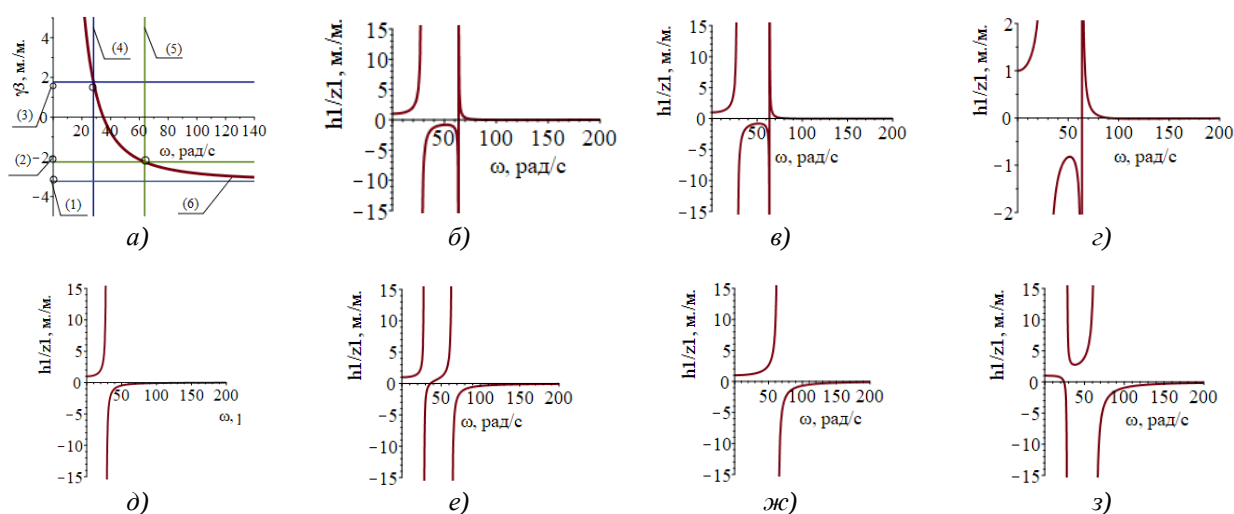


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики с фиксированными динамическими инвариантами:

а) частотная кривая; 1 – $\gamma_3^{(kp)} \approx -3,23$; 2 – $\gamma_3^{(3)} \approx -2,26$; 3 – $\gamma_3^{(2)} \approx 1,77$; 4 – линия $\omega = \sigma_2$; 5 – линия $\omega = \sigma_3$; 6 – частотная кривая; б) $\gamma_3 = -13,23, +S_0^2 F_1^2$; в) $\gamma_3 = -3,23, +S_0^2 F_1^2$; г) $\gamma_3 = -2,75, +S_1^2 F_2^2$; д) $\gamma_3 = -2,26, +S_0^1 F_1^1$; е) $\gamma_3 = -0,25, +S_1^2 F_2^2$; ж) $\gamma_3 = 1,77, +S_0^1 F_1^1$; з) $\gamma_3 = 3, +S_0^2 F_1^2$

Примечание: составлено авторами.

Существенные особенности (рис. 3 (б–з)) отображаются с помощью динамических инвариантов [8] $+S_k^l F_m^n$, где l – количество резонансов, k – количество режимов обнуления колебаний, n – количество положительных, m – отрицательных форм динамического взаимодействия, «+» – означает, что значение

Разбиение (24) принимает вид:

$$\begin{aligned} (-\infty, -3,23), \{-3,23\}, \\ (-3,23, -2,26), \{-2,26\}, (-2,26, 1,77), \\ \{1,77\}, (1,77, +\infty). \end{aligned} \quad (30)$$

На элементах (30) амплитудно-частотные характеристики сохраняют существенные особенности (рис. 3 (б–з)).

амплитудно-частотной характеристики для нулевой частоты положительно, «–» – отрицательно (табл. 1).

График характеристик динамических инвариантов имеет вид кусочно-постоянной функции (рис. 4).

Таблица 1

Динамические инварианты

	1	2	3	4	5	6	7
I	$(-\infty, \gamma_3^{(kp)})$	$\{\gamma_3^{(kp)}\}$	$(\gamma_3^{(kp)}, \gamma_3^{(3)})$	$\{\gamma_3^{(3)}\}$	$(\gamma_3^{(3)}, \gamma_3^{(2)})$	$\{\gamma_3^{(2)}\}$	$(\gamma_3^{(2)}, \infty)$
II	$+S_0^2 F_1^2$	$+S_0^2 F_1^2$	$+S_1^2 F_2^2$	$+S_0^1 F_1^1$	$+S_1^2 F_2^2$	$+S_0^1 F_1^1$	$+S_0^2 F_1^2$
III	$+J_5$	$+J_5$	$+J_7$	$+J_3$	$+J_7$	$+J_3$	$+J_5$

Примечание: составлено авторами.

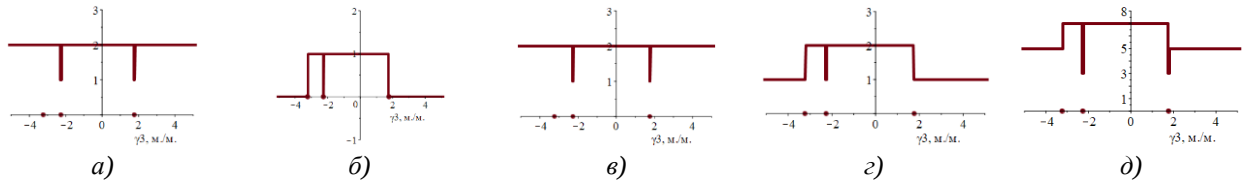


Рис. 4. Характеристики динамических инвариантов:

а) количество резонансов; б) количество частот обнуления;

в) количество положительных форм; г) количество отрицательных форм;

д) интегральная характеристика; $\gamma_3^{(kp)} \approx -3,23$, $\gamma_3^{(3)} \approx -2,26$, $\gamma_3^{(2)} \approx 1,77$ – граничные значения

Примечание: составлено авторами.

Варьирование γ_3 приводит к изменению интегральной характеристики, равной сумме частных характеристик динамических инвариантов (рис. 4 г).

Рычажная интерпретация динамических состояний механических колебательных систем. Амплитудно-частотная характеристика, отображающая рычажную связь между амплитудами колебаний координат и кинематических возмущений, рассматриваемых в качестве выходного и входного сигналов, может быть интерпретирована в виде семейства конкретных рычагов, зависящего от частоты. Для построения интерпретации рассматривается рычаг (рис. 5). Поворот рычага на малый угол θ приводит к верти-

кальным смещениям точек Z и H на величины Δz и Δh :

$$\theta \approx \frac{\Delta z}{l_z} = \frac{\Delta h}{l_H}. \quad (30)$$

Соответствие между амплитудно-частотной характеристикой и рычагом (30) строится на основе (13):

$$A_{11}(\omega) = \frac{\bar{h}_1(j\omega)}{\bar{z}_1(j\omega)} = \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{l_H}{l_z}, \quad (31)$$

где Δz – «входное» смещение, Δh – «выходное» смещение. На основе (31) для каждой частоты ω значению $A_{11}(\omega)$ сопоставлено отношение плеч l_H и l_z или отношение Δh и Δz .

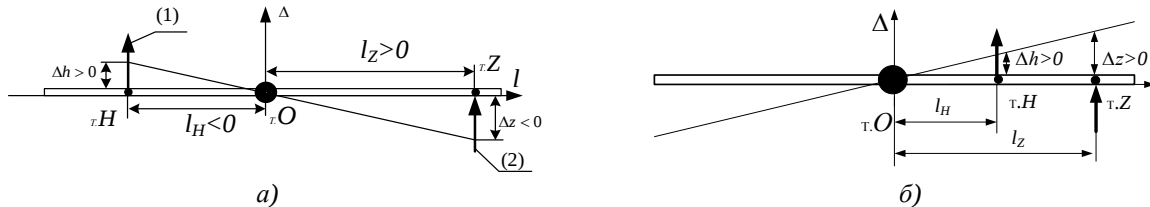


Рис. 5. Рычаг:

а) рычаг первого рода (двуплечный рычаг); б) рычаг второго рода (одноплечный рычаг);

1 – «выходное» смещение; 2 – «входное» смещение

Примечание: составлено по [11].

Если плечо задано $l_z = \text{const} > 0$, то плечо l_H определяется на основе (31) по формуле:

$$l_H = A_{11}(\omega) l_z. \quad (32)$$

В рамках данного исследования для фиксированного плеча $l_z = \text{const} > 0$ «основным» рычагом считается рычаг с плечами $A_{11}(\omega) l_z$, l_z , наравне к которым может быть определен «двойственный» рычаг, если задано плечо $l_H = \text{const} > 0$, а плечо l_z найдено по формуле:

$$l_z = \frac{l_H}{A_{11}(\omega)}. \quad (33)$$

Двойственный рычаг будет иметь плечи l_H , $l_H/A_{11}(\omega)$. Выражения (32), (33) каждой паре $(\omega, A_{11}(\omega))$ при $l_z = \text{const} > 0$ для рычага и $l_H = \text{const} > 0$ – для двойственного рычага определяют точки H и Z , отношения плеч которых имеют рычажное отношение $A_{11}(\omega)$. Для заданной частоты ω формально можно полагать, что для некоторого $l_z > 0$ пара $(l_z$,

$A_{11}(\omega) l_Z$ – «основной рычаг», для некоторого $l_H > 0 - (l_H/A_{11}(\omega), l_H)$ – двойственный рычаг. В свою очередь, совокупность $\{(l_Z, A_{11}(\omega) l_Z), \omega \in [0, \infty)\}$ – обобщенный рычаг, а для некоторого $l_H > 0$ совокупность $\{(l_H/A_{11}(\omega), l_H), \omega \in [0, \infty)\}$ – двойственный рычаг.

Динамические состояния резонансов, обнулений амплитуд колебаний, знакоопределенные формы динамических взаимодействий отображаются рычагами с нулевыми или бесконечными плечами, рычагами 1 или 2-го рода. Ветви амплитудно-частотных характеристик переходят в конечный или бесконечные интервалы. Для объединения интервалов строится проекция бесконечной прямой OX на окружность (рис. 6). Проекция определяется уравнением окружности с центром в точке $O(0, R)$ и прямой l_x , проходящей через точку $O_1(0, 2R)$ и точку H с координатой $(l_H, 0)$:

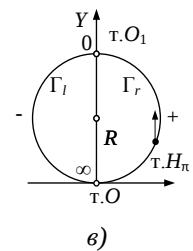
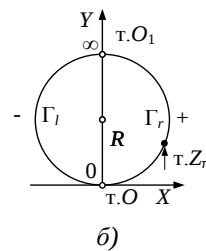
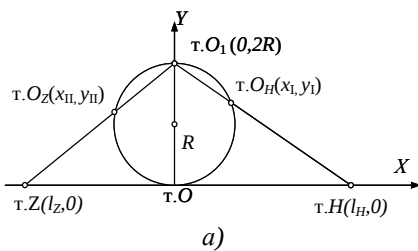


Рис. 6. Проекция рычагов на окружность:

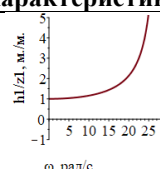
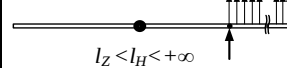
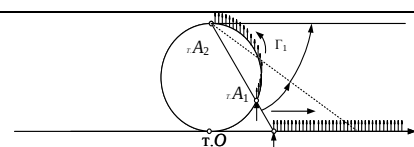
а) проекции точек H, Z рычага на точки O_H, O_Z окружности; б) проекция рычага, дуга Γ_l – проекция рычагов 1-го рода, дуга Γ_r – проекция рычагов 2-го рода; в) проекция двойственного рычага
 Примечание: составлено авторами.

Для представления совокупности значений амплитудно-частотной характеристики с помощью рычагов выбирается частотный интервал монотонности (табл. 2, столбцы а, б), затем с учетом фиксированного значения плеча $l_Z = \text{const} > 0$ точки Z строятся точки H с координатами l_H с помощью соотношения (32).

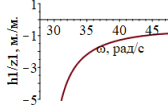
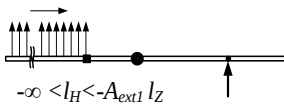
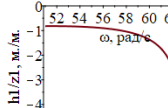
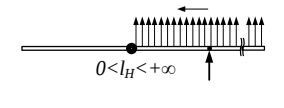
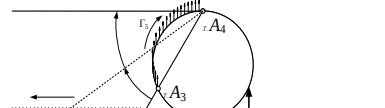
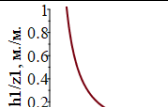
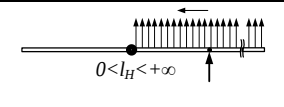
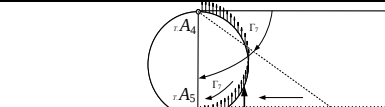
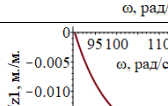
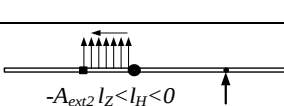
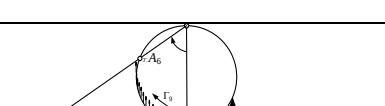
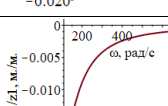
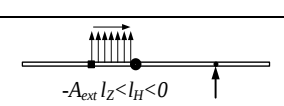
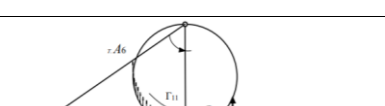
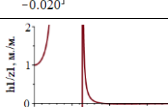
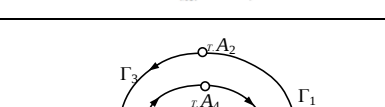
Построенные области точек H (табл. 2, столбец в) проецируются с помощью отображения (36) на окружность (табл. 2, столбец г). При рассмотрении частотного интервала $(0, +\infty)$ может быть сформирован обобщенный рычаг системы (табл. 2, строка 7, столбец б) путем объединения дуг $\Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_5, \Gamma_7, \Gamma_9, \Gamma_{11}$.

Таблица 2

Построение обобщенного рычага

	а	б	в	г
0	Область определения, область значения	Ветви амплитудно-частотной характеристики	Рычаги 1 или 2-го рода $l_Z = \text{const} > 0$, l_H – переменная	Отображение рычага на окружность
1	$\omega \in (0, \sigma_1)$, $1 < A_{11}(\omega) < \infty$			

Окончание табл. 2

0	Область определения, область значения	Ветви амплитудно-частотной характеристики	Рычаги 1 или 2-го рода $l_Z = \text{const} > 0$, l_H – переменная	Отображение рычага на окружность
2	$\omega \in (\sigma_1, \omega_{\text{ext}1})$, $-\infty < A_{11}(\omega) < -A_{\text{ext}1}$, $A_{\text{ext}1} > 0$			
3	$\omega \in (\omega_{\text{ext}1}, \sigma_2)$ $-\infty < A_{11}(\omega) < -A_{\text{ext}1}$			
4	$\omega \in (\sigma_2, \omega_0)$ $0 < A_{11}(\omega) < \infty$			
5	$\omega \in (\omega_0, \omega_{\text{ext}2})$ $-A_{\text{ext}2} < A_{11}(\omega) < 0$			
6	$\omega \in (\omega_{\text{ext}2}, +\infty)$ $-A_{\text{ext}2} < A_{11}(\omega) < 0$			
7	$\omega \in (0, +\infty)$ $-\infty < A_{11}(\omega) < \infty$			

Примечание: составлено авторами.

Обобщенный рычаг (табл. 2, столбец 2, строка 7) системы отображает динамические особенности в виде резонанса, режимов обнуления посредством специфических точек на кривой рычага, образованной объединением.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отображение совокупности динамических состояний системы в рамках представлений об обобщенных рычагах. Совокупности динамических состояний, соответствующих разбиению (30), могут быть представлены обобщенными рычагами (рис. 7–8).

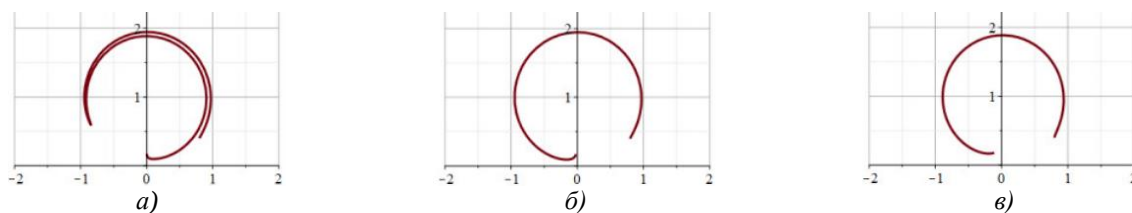


Рис. 7. Обобщенные рычаги, отображающие «точечные» динамические инварианты:
 а) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = -3,23$; б) $+S_0^1F_1^1 - \gamma_3 = -2,26$; в) $+S_0^1F_1^1 - \gamma_3 = 1,77$

Примечание: составлено авторами.

Совокупность обобщенных рычагов включает рычаги (рис. 7) для точечных значений коэффициентов связности $\{-3,23\}$, $\{-2,26\}$,

$\{1,77\}$ и рычаги (рис. 8) для интервальных значений $(-\infty, -3,23)$, $(-3,23, -2,26)$, $(-2,26, 1,77)$, $(1,77, +\infty)$.

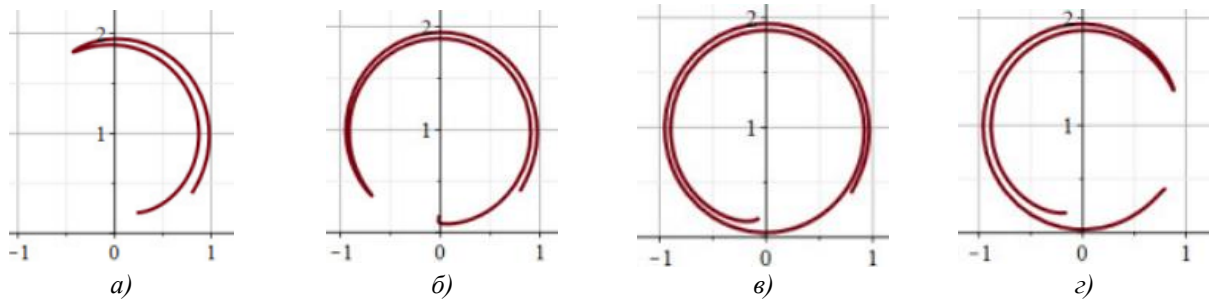


Рис. 8. Обобщенные рычаги, отображающие «интервальные» динамические инварианты:

а) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = -13,23$; б) $+S_1^2F_2^2 - \gamma_3 = -2,75$; в) $+S_1^2F_2^2 - \gamma_3 = -0,25$; з) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = 3,54$

Примечание: составлено авторами.

Варьирование коэффициента связности γ_3 в сколь угодно малых окрестностях точечных элементов разбиения вызывает скачкообразное изменение форм и размеров обобщенных рычагов, которое может рассматриваться как своеобразная структурная неустойчивость,

связанная с особенностями характеристик динамических инвариантов (рис. 4).

Обобщенный рычаг может быть представлен в пространственной форме, если в качестве третьего измерения добавить частоту внешнего возмущения (рис. 9–10).

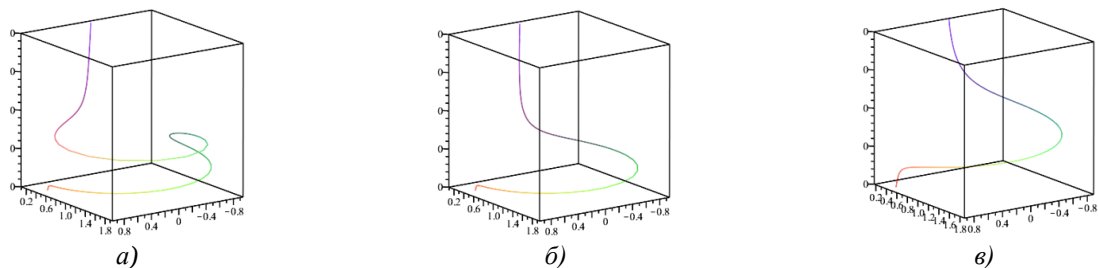


Рис. 9. Пространственное отображение обобщенных рычагов с «точечными» динамическими инвариантами:

а) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = -3,23$; б) $+S_0^1F_1^1 - \gamma_3 = -2,26$; в) $+S_0^1F_1^1 - \gamma_3 = 1,77$

Примечание: составлено авторами.

Обобщенные рычаги в пространственном представлении отличаются формой и разме-

рами образующих кривых, наличием особых точек.

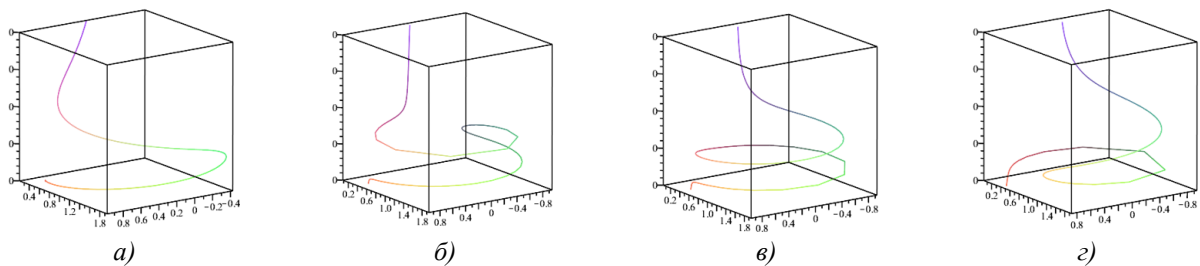


Рис. 10. Пространственное отображение обобщенных рычагов

с «интервальными» динамическими инвариантами:

а) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = -13,23$; б) $+S_1^2F_2^2 - \gamma_3 = -2,75$; в) $+S_1^2F_2^2 - \gamma_3 = -0,25$; з) $+S_0^2F_1^2 - \gamma_3 = 3,54$

Примечание: составлено авторами.

Изменение коэффициента связности внешних возмущений определяет форму и размер обобщенного рычага механической колебательной системы. Варьирование коэффициента связности в окрестностях граничных значений приводит к своеобразной «поломке» обобщенного рычага, выражающейся в скачкообразном изменении его формы и размера.

Динамические состояния механической колебательной системы могут быть отображены посредством статической условной рычажной структуры, характеристики которой зависят от частот и связности внешних возмущений.

Все рисунки и таблицы составлены авторами с использованием программного пакета символьной арифметики [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках методологии структурного математического моделирования разработан системный подход к решению задач оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем, находящихся в условиях связанных вибрационных нагружений. Для системы, динамическое

состояние которой оценивается на основе рычажных связей, разработана рычажная интерпретация концепции динамических состояний, основанная на обобщении представлений о рычагах 1 и 2-го рода. Разработана система обобщенных представлений, позволяющая отобразить роль связности внешних возмущений в формировании разнообразия динамических состояний механических колебательных систем. Показано, что совокупность обобщенных динамических состояний может быть отображена с помощью условной рычажной структуры, в которой изменение частоты и связности внешних возмущений отображается с помощью рычажных характеристик. Установлено, что в рамках рычажной интерпретации изменение связности внешних возмущений способно приводить к специфической неустойчивости, проявляющейся в скачкообразном изменении рычажных характеристик. Можно полагать, что технические объекты, находящиеся в условиях связанных вибрационных воздействий, способны существенным образом изменять совокупность динамических состояний.

Список источников

1. Москвичев В. В., Махутов Н. А., Шокин Ю. И. и др. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск : Наука, 2021. 796 с.
2. Ганиев Р. Ф., Низамов Х. Н., Дербуков Е. И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах. М. : Изд-во МГТУ, 1996. 257 с.
3. Острейковский В. А., Соловьев Н. А., Шевченко Е. Н. Анализ состояния обеспечения работоспособности компрессорных станций магистральных газопроводов на этапе эксплуатации // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 61–64.
4. De Silva C. W. Vibration. Fundamentals and practice. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2006. 1064 p.
5. Ганиев Р. Ф., Кононенко В. О. Колебание твердых тел. М. : Наука, 1976. 431 с.
6. Коловский М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М. : Наука, 1976. 319 с.
7. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020. 521 p.
8. Елисеев А. В., Ситов И. С., Кузнецов Н. К. Системный подход в оценке полной совокупности динамических состояний технических объектов в условиях связанных вибрационных нагружений // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1. С. 7–20.

References

1. Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Shokin Yu. I. et al. Prikladnye zadachi konstruktivnoy prochnosti i mekhaniki razrusheniia tekhnicheskikh sistem. Novosibirsk: Nauka; 2021. 796 p. (In Russian).
2. Ganiev R. F., Nizamov Kh. N., Derbukov E. I. Volnovaia stabilizatsiia i preduprezhdenie avarii na truboprovodakh. Moscow: Publishing House of the BMSTU; 1996. 257 p. (In Russian).
3. Ostreykovsky V. A., Solovyev N. A., Shevchenko E. N. Analiz sostoiianiia obespecheniia rabotosposobnosti kompressornykh stantsii magistralnykh gazoprovodov na etape ekspluatatsii. *International Symposium "Reliability & Quality"*. 2018;1:61–64. (In Russian).
4. De Silva C. W. Vibration. Fundamentals and practice. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2006. 1064 p.
5. Ganiev R. F., Kononenko V. O. Kolebanie tverdykh tel. Moscow: Nauka; 1976. 431 p. (In Russian).
6. Kolovsky M. Z. Avtomaticheskoe upravlenie vibrozashchitnymi sistemami. Moscow: Nauka; 1976. 319 p. (In Russian).
7. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020. 521 p.
8. Eliseev A. V., Sitov I. S., Kuznetsov N. K. Systematic approach to the assessment of the full set of dynamic states of technical objects under conditions of cohe-

9. Елисеев С. В., Каргапольцев С. К., Большаков Р. С. и др. Рычажные связи: возможности формирования динамических состояний в механических колебательных системах // *Транспорт Урала*. 2020. № 3. С. 17–23. DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-17-23.
10. Лурье А. И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М. : Наука, 1959. 368 с.
11. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. М. : Машиностроение, 1987. 560 с.
12. Maple. URL: <https://www.maplesoft.com> (дата обращения: 11.04.2023).
9. Eliseev S. V., Kargapol'tsev S. K., Bolshakov R. S. et al. Lever ties: Possibilities of creating dynamic conditions in mechanical oscillation systems. *Transport of the Urals*. 2020;(3):17–23. DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-17-23. (In Russian).
10. Lurye A. I. Operatsionnoe ischislenie i primeneniye v tekhnicheskikh prilozheniiakh. Moscow: Nauka; 1959. 368 p. (In Russian).
11. Krainev A. F. Slovar-spravochnik po mekhanizmam. Moscow: Mashinostroyeniye; 1987. 560 p. (In Russian).
12. Maple. URL: <https://www.maplesoft.com> (accessed: 11.04.2023).

Информация об авторах

А. В. Елисеев – кандидат технических наук, доцент.
Н. К. Кузнецов – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

A. V. Eliseev – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.
N. K. Kuznetsov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

Научная статья

УДК 519.115.4

DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-87-91

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ ДИЗЪЮНКТИВНОЙ НОРМАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Антон Георгиевич Назин

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

nazin_ag@surgu.ru

Аннотация. В статье изложен алгоритм, позволяющий осуществить направленный перебор для поиска минимальной дизъюнктивной нормальной формы с использованием лексикографического порядка.

Ключевые слова: простая импликанта, ДНФ, МДНФ, алгоритм, сокращенная ДНФ

Для цитирования: Назин А. Г. Модифицированный алгоритм минимизации дизъюнктивной нормальной формы // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 87–91. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-87-91.

Original article

A MODIFIED ALGORITHM FOR MINIMIZING THE DISJUNCTIVE NORMAL FORM

Anton G. Nazin

Surgut State University, Surgut, Russia

nazin_ag@surgu.ru

Abstract. The article describes an algorithm for a directed search to find the minimum disjunctive normal form using the lexicographic order.

Keywords: prime implicant, DNF, MDNF, algorithm, reduced DNF

For citation: Nazin A. G. A modified algorithm for minimizing the disjunctive normal form. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):87–91. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-87-91.

ВВЕДЕНИЕ

Задача минимизации дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ), как известно [1], относится к классу NP-полных задач, поэтому для ее решения представляет интерес поиск алгоритма, который близок по сложности к полиномиальному.

Проблема минимизации ДНФ обсуждается в литературе [2]. Для ее решения известны алгоритмы двух типов. Это алгоритмы, решающие задачу точно, и алгоритмы, позволяющие найти ДНФ, которые близки к минимальной. Приближенные алгоритмы описаны в [3–5], а точные – в [6–9]. Описанный в статье алгоритм является модификацией алгоритма, предложенного автором в работе [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть задана произвольная функция алгебры логики в виде сокращенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ):

$$f(x_1 \dots x_n) = K_1 \vee K_2 \vee \dots \vee K_m.$$

Пусть с помощью известного метода Квайна–Мак-Класки [11] получена ее сокращенная ДНФ: $f^{(s)}(x_1 \dots x_n) = K_1^{(s)} \vee K_2^{(s)} \vee \dots \vee K_l^{(s)}$.

Обозначим через $N_f = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\} \subseteq E^n$ множество вершин гиперкуба, в которых $f(x_1 \dots x_n) = 1$. Составим матрицу T размерности l на m . Заполним матрицу T . Элемент t_{ij} положим равным значению i -й простой импликанты в j -й вершине:

$$t_{ij} = \begin{cases} t_{ij} = 1, & \text{если } K_i^{(s)}(\alpha_j) = 1 \text{ в } j\text{-й вершине} \\ t_{ij} = 0, & \text{если } K_i^{(s)}(\alpha_j) = 0 \text{ в } j\text{-й вершине} \end{cases}.$$

Рассмотрим произвольную вершину с номером j из N_f . Условие, что хотя бы одна про-

стая импликанта в этой вершине обращается в 1, выглядит как:

$$\bigvee_{i=1}^l t_{ij} = 1. \quad (1)$$

Обозначим $I_p = (i_1 \dots i_p)$, $p \leq l$ – набор номеров строк матрицы T , упорядоченный по возрастанию. Для всех вершин гиперкуба условие (1) примет вид:

$$\bigwedge_{i=1}^m \bigvee_{j \in I_p} t_{ij} = 1. \quad (2)$$

Заметим, для того чтобы ДНФ, составленная из простых импликант $K_i^{(s)}$, где i пробегает по всем номерам из I_p , реализовала функцию f , то необходимо выполнение условия (2).

Сформулируем теперь известную задачу получения минимальной дизъюнктивной нормальной формы (МДНФ) из СДНФ [2]. Необходимо найти такой набор номеров $I_k \subseteq I_l$ строк матрицы T , для которого бы выполнялось: длина его должна быть минимальна и должно быть верно условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_k} t_{ij} = 1$. Тогда $\bigvee_{i \in I_k} K_i^{(s)}$ будет МДНФ для функции f .

Пусть $I_k \subseteq I_l$ – произвольный набор номеров строк матрицы T (набор номеров конъюнкций в СДНФ), для которого истинно условие (2). Обозначим через $M(I_k) = \{I_{k-1}^{(1)}, \dots, I_{k-1}^{(k)}\}$ – совокупность всех наборов номеров строк матрицы T , содержащихся в I_k и имеющих длину $k-1$. $M(I_k)$ лексикографически упорядочим по возрастанию: $I_{k-1}^{(1)} < I_{k-1}^{(2)} < \dots < I_{k-1}^{(k)}$, где $I_{k-1}^{(1)}$ – наименьший, а $I_{k-1}^{(k)}$ – наибольший наборы. Верхний индекс обозначает порядковый номер набора в совокупности $M(I_k)$, а нижний – длину набора.

Определение.

ДНФ $\bigvee_{j \in I_k} K_j^{(s)}$ называется тупиковой ДНФ для функции f , если для любого набора $I_{k-1}^{(i)} \in M(I_k)$ верно условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{k-1}^{(i)}} t_{ij} = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обратимся к описанию алгоритма, позволяющего найти все МДНФ функции f по ее СДНФ.

Сперва опишем процедуру проверки ДНФ на тупиковость. Пусть I_l – набор, состоящий из всех номеров строк матрицы T , упорядоченных по возрастанию. Для него по построению истинно условие (4). Требуется проверить, является ли ДНФ $\bigvee_{i \in I_l} K_i^{(s)}$,

соответствующая набору I_l , тупиковой. Рассмотрим $M(I_l) = \{I_{l-1}^{(1)}, \dots, I_{l-1}^{(l)}\}$ – лексикографически упорядоченную по возрастанию совокупность всех наборов $I_{l-1}^{(i)} \subset I_l$, $i = \overline{1, l}$.

Согласно определению необходимо проверить условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}^{(i)}} t_{ij} = 0$ для всех наборов из $M(I_l)$. Однако не всегда необходимо явно

проверять условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}^{(i)}} t_{ij} = 0$ для всех наборов из $M(I_l)$ и начинать проверку с наименьшего набора.

Рассмотрим ситуацию, когда явную проверку условия можно начинать не с младшего, а с некоторого другого набора из $M(I_l)$. Пусть для $q > 1$ наборов $I_{l-1}^{(1)} < I_{l-1}^{(2)} < \dots < I_{l-1}^{(q)}$ из $M(I_l)$ истинно условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}^{(i)}} t_{ij} = 0$. Обозначим совокупность этих наборов как $M^0(I_l)$. Пусть $I_{l-1}^{(q+1)} \in M(I_l)$ – первый по порядку набор, для которого условие ложно. Это означает, что ДНФ $\bigvee_{i \in I_l} K_i^{(s)}$ не тупиковая. Теперь проверим, является ли ДНФ $\bigvee_{i \in I_{l-1}^{(q+1)}} K_i^{(s)}$, соответствующая набору $I_{l-1}^{(q+1)}$, тупиковой. Рассмотрим $M(I_{l-1}^{(q+1)}) = \{I_{l-2}^{(1)}, \dots, I_{l-2}^{(q+1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$ – лексикографически упорядоченную по возрастанию совокупность всех наборов $I_{l-2}^{(i)} \subset I_{l-1}^{(q+1)}$. В этом случае можно начинать проверку с набора $I_{l-2}^{(q+1)}$. Покажем это, сформулировав сначала 2 вспомогательных утверждения.

Утверждение 1.

Любые два соседних набора $I_k^{(i)}$ и $I_k^{(i+1)}$ из одной совокупности $M(I_{k+1})$, $k+1 \leq l$ содержат набор I_{k-1} , который стоит на i -м месте в совокупностях $M(I_k^{(i)})$ и $M(I_k^{(i+1)})$.

Утверждение 2.

Для любого $I_{k-1}^{(i)} \in M(I_k^{(j)})$, $1 \leq j \leq i$, $i = \overline{1, k}$ справедливо: $I_{k-1}^{(i)}$ принадлежит совокупности $M(I_k^{(i+1)})$ и занимает в ней j -е место.

Покажем, что в совокупности $M(I_{l-1}^{(q+1)}) = \{I_{l-2}^{(1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-2)}\}$ существует непрерывная цепочка наборов $\{I_{l-2}^{(1)}, \dots, I_{l-2}^{(q)}\}$ начиная с первого, для всех элементов которой истинно условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 0$. Для каждого $I_{l-1}^{(i)} \in M^0(I_l)$, $i = \overline{1, q}$ существует совокупность $M(I_{l-1}^{(i)}) = \{I_{l-2}^{(1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$, $i = \overline{1, q}$. Для любого набора $I_{l-2}^{(i)}$, принадлежащего любой из совокупностей $M(I_{l-1}^{(i)})$, $i = \overline{1, q}$, верно условие

$$\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 0.$$

Рассмотрим наборы $I_{l-1}^{(q)}$ и $I_{l-1}^{(q+1)}$. Напомним, что $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}^{(q+1)}} t_{ij} = 1$,

$$\text{а } \bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}^{(q)}} t_{ij} = 0.$$

Согласно утверждению 1 оба эти набора содержат набор $I_{l-2}^{(q)}$, который стоит на q -й позиции в совокупностях $M(I_{l-1}^{(q)})$ и $M(I_{l-1}^{(q+1)})$ соответственно. Для набора $I_{l-2}^{(q)}$

$$\text{верно условие } \bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(q)}} t_{ij} = 0.$$

Осталось показать, что для всех наборов из $M(I_{l-1}^{(q+1)})$, младших набора $I_{l-2}^{(q)}$, также верно условие

$$\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 0, \quad i = \overline{1, q-1}.$$

Согласно утверждению 2 любой набор $I_{l-2}^{(i)}$, $i = \overline{1, q-1}$ содержится хотя бы в одной из совокупностей $M(I_{l-1}^{(i)})$, $i = \overline{1, q}$. Из этого следует, что для всех наборов из $M(I_{l-1}^{(q+1)})$, младших набора $I_{l-2}^{(q)}$,

$$\text{также верно условие } \bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 0, \quad i = \overline{1, q}.$$

Совокупность $M(I_{l-1}^{(q+1)})$ можно представить в виде $M(I_{l-1}^{(q+1)}) = \{I_{l-2}^{(1)}, I_{l-2}^{(2)}, \dots, I_{l-2}^{(q)}, I_{l-2}^{(q+1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$, где каждый из наборов $I_{l-2}^{(i)}$, $i = \overline{1, q} < l-1$ содержится в совокупности $M(I_{l-1}^{(i)})$, $i = \overline{1, q}$. Следовательно, проверку можно начинать с набора $I_{l-2}^{(q+1)}$.

При получении $I_{l-2}^{(q+1)}$ из $I_{l-1}^{(q+1)}$ возможны два случая:

1. В наборе $I_{l-1}^{(q+1)}$ $i_1 = 0$. Начиная с первого номера находим в $I_{l-1}^{(q+1)}$ максимальную по длине цепочку номеров $I_r = i_1 i_2 \dots i_r$, идущих по возрастанию, такую, что разность двух любых соседних номеров равна 1. Запишем $I_{l-1}^{(q+1)}$ в виде: $I_{l-1}^{(q+1)} = I_r i_{r+1} \dots i_{l-1}$. Набор, который необходимо получить, обозначим $I_{l-2}^* = i_1^* i_2^* \dots i_{l-2}^*$. Строим его следующим образом: первым $i_1^* i_2^* \dots i_{r-1}^*$ элементам присваиваем $I_{r-1} = i_1 i_2 \dots i_{r-1}$, далее $i_r^* = i_{r+1}$, $i_{r+1}^* = i_{r+2}$, ..., $i_{l-2}^* = i_{l-1}$.

2. В наборе $I_{l-1}^{(q+1)}$ $i_1 \neq 0$. Тогда ДНФ, соответствующая набору $I_{l-1}^{(q+1)}$, является тупиковой. Докажем это. Покажем сначала: $\forall I_{l-2} \subset I_{l-1}^{(q+1)} \exists I_{l-1}^{(\bar{q})} \supset I_{l-2} : I_{l-1}^{(\bar{q})} < I_{l-1}^{(q+1)}$.

Пусть $I_{l-2} = i_1 i_2 \dots i_{l-2}$ – произвольный набор, содержащийся в $I_{l-1}^{(q+1)}$, очевидно, что в нем $i_1 \neq 0$. Тогда, добавив слева к $I_{l-2} = i_1 i_2 \dots i_{l-2}$ $i_1 = 0$, а остальные сдвинув вправо на единицу, получим $I_{l-1}^{(\bar{q})} < I_{l-1}^{(q+1)}$. Возможны только два случая:

1. $\bigvee_{i \in I_{l-1}^{(\bar{q})}} K^{(s)}_i$ – тупиковая, тогда $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}} t_{ij} = 0$ по определению.

$$2. \bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-1}} t_{ij} = 0 \text{ очевидно } \bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}} t_{ij} = 0.$$

Итак, первым шагом проверки ДНФ на тупиковость является получение из текущего набора такого, с которого необходимо начать явную проверку условия.

Рассмотрим случай 1, т. е. в наборе $I_{l-1}^{(q+1)}$ $i_1 = 0$. Получаем, как описано выше, набор $I_{l-2}^{(q+1)}$. Если для какого-либо набора

$I_{l-2}^{(i)} \in \{I_{l-2}^{(q+1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$ выполняется условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 1$, выходим из процедуры. ДНФ, соответствующая набору $I_{l-1}^{(q+1)}$, не является тупиковой. Иначе проверяем условие для следующего набора из $\{I_{l-2}^{(q+1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$. Если для всех наборов из $\{I_{l-2}^{(q+1)}, \dots, I_{l-2}^{(l-1)}\}$ условие $\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-2}^{(i)}} t_{ij} = 0$ истинно, ДНФ, соответствующая набору $I_{l-1}^{(q+1)}$, является тупиковой.

Рассмотрим случай 2, т. е. в наборе $I_{l-1}^{(q+1)}$ $i_1 \neq 0$. Как показано выше, при этом ДНФ, соответствующая набору $I_{l-1}^{(q+1)}$, является тупиковой.

Рассмотрим алгоритм получения всех МДНФ по шагам.

Пусть I_l – набор, состоящий из всех номеров строк матрицы T . Положим $k = 0$.

Шаг 1.

Вычисляем выражение:

$$\bigwedge_{j=1}^m \bigvee_{i \in I_{l-k}^{(q)}} t_{ij}. \quad (3)$$

Если (3) равно 1, переходим к шагу 2, если (3) равно 0, переходим к шагу 3.

Шаг 2.

Проверяем, является ли ДНФ $\bigvee_{i \in I_{l-k}} K_i^{(s)}$, соответствующая набору $I_{l-k}^{(q)}$, тупиковой. Если

$\bigvee_{i \in I_{l-k}^{(q)}} K_i^{(s)}$ – тупиковая, переходим к шагу 4,

если $\bigvee_{i \in I_{l-k}^{(q)}} K_i^{(s)}$ – не тупиковая, нашелся

набор $I_{l-k}^{(\bar{q})}$, $k = k + 1$, для которого (5) равно 1.

Переходим к шагу 5.

Шаг 3.

Если $I_{l-k}^{(q)}$ соответствует исходной матрице ($k = 0$) или $I_{l-k}^{(q)}$ является наибольшим набором размерности $l - k$, алгоритм заканчивает работу. Если нет, получаем набор $I_{l-k}^{(q+1)}$, лексикографически следующий за набором $I_{l-k}^{(q)}$.

Переходим к шагу 1.

Шаг 4.

Присваиваем ДНФ $\bigvee_{i \in I_{l-k}^{(q)}} K_i^{(s)}$ метку Δ . Переходим к шагу 3.

Шаг 5.

Если у ДНФ $\bigvee_{i \in I_{l-k}^{(q)}} K_i^{(s)}$ есть метка Δ , удаляем ее. Переходим к шагу 2.

Все ДНФ с меткой Δ будут МДНФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный алгоритм был реализован в виде программы, проведены предварительные расчеты. В дальнейшем планируется проведение исследования по определению зависимости времени работы алгоритма от размерности матрицы.

Список источников

1. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / пер. с англ. Е. В. Левнера, М. А. Фрумкина. М.: Мир, 1982. 416 с.
2. Андреев А. Е. К проблеме минимизации дизъюнктивных нормальных форм // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 274, № 2. С. 265–269.
3. McGeer P., Sanghavi J., Brayton R. et al. ESPRESSO-SIGNATURE: A new exact minimizer for logic functions. In: 30th ACM/IEEE Design Automation Conference, Dallas, TX, USA. 1993. p. 618–624.
4. Hong S. J., Cain R. G., Ostapko D. L. MINI: A heuristic approach for logic minimization. IBM Journal Research and Development. 1974;18(5):443–458.
5. Hlavicka J., Fišer P. BOOM – a Heuristic Boolean Minimizer. In: IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design ICCAD-2001, San Jose, California (USA), November 4–8, 2001. p. 439–442.

References

1. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and intractability. Levner E. V., Frumkin M. A., translators. Moscow: Mir; 1982. 416 p. (In Russian).
2. Andreev A. E. On the problem of minimization of disjunctive normal forms. Doklady Akademii nauk SSSR. 1984;274(2):265–269. (In Russian).
3. McGeer P., Sanghavi J., Brayton R. et al. ESPRESSO-SIGNATURE: A new exact minimizer for logic functions. In: 30th ACM/IEEE Design Automation Conference, Dallas, TX, USA. 1993. p. 618–624.
4. Hong S. J., Cain R. G., Ostapko D. L. MINI: A heuristic approach for logic minimization. IBM Journal Research and Development. 1974;18(5):443–458.
5. Hlavicka J., Fišer P. BOOM – a Heuristic Boolean Minimizer. In: IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design ICCAD-2001, San Jose, California (USA), November 4–8, 2001. p. 439–442.

6. Brayton R. K., Hachtel G. D., McMullen C. et al. Logic minimization algorithms for VLSI synthesis. Hingham, MA: Kluwer Academic Publishers; 1984. 194 p.
7. Hachtel G. D., Somenzi F. Logic synthesis and verification algorithms. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers; 1996. 564 p.
8. Журавлев Ю. И. Алгоритмы построения минимальных дизъюнктивных нормальных форм для функций алгебры логики // Дискретная математика и математические вопросы кибернетики / под общ. ред. С. В. Яблонского, О. Б. Лупанова. Т. 1. М. : Наука, 1974. 312 с.
9. Стрыгин В. З. Полиномиальный алгоритм минимизации случайных («почти всех») булевых функций. М. : ЦАГИ, 1992. 8 с.
10. Назин А. Г. Алгоритм получения всех минимальных дизъюнктивных нормальных форм из сокращенной дизъюнктивной нормальной формы с использованием лексикографического порядка // Исследовано в России. 2002. С. 942–947. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-polucheniya-vseh-minimalnyh-dizyunktivnyh-normalnyh-form-iz-sokraschyonnoy-dizyunktivnoy-normalnoy-formy-s-ispolzovaniem> (дата обращения: 01.03.2023).
11. Колдуэлл С. Х. Логический синтез релейных устройств / пер. с англ. Г. К. Москатова, А. Д. Таланцева ; под ред. М. А. Гаврилова. М. : Изд-во иностр. лит., 1962. 740 с.
6. Brayton R. K., Hachtel G. D., McMullen C. et al. Logic minimization algorithms for VLSI synthesis. Hingham, MA: Kluwer Academic Publishers; 1984. 194 p.
7. Hachtel G. D., Somenzi F. Logic synthesis and verification algorithms. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers; 1996. 564 p.
8. Zhuravlev Yu. I. Algoritmy postroeniia minimalnykh dizyunktivnykh normalnykh form dlia funktsii algebrы logiki. In: Yablonsky S. V., Lupanov O. B., editors. Diskretnaia matematika i matematicheskie voprosy kibernetiki. Vol. 1. Moscow: Nauka; 1974. 312 p. (In Russian).
9. Strygin V. Z. Polinomialnyi algoritm minimizatsii sluchainykh (“pochti vsekh”) bulevykh funktsii. Moscow: Central Aerohydrodynamics Institute; 1992. 8 p. (In Russian).
10. Nazin A. G. Algoritm polucheniia vseh minimalnykh dizyunktivnykh normalnykh form iz sokrashchennoi dizyunktivnoi normalnoi formy s ispolzovaniem leksikograficheskogo poriadka. *Investigated in Russia*. 2002:942–947. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-polucheniya-vseh-minimalnyh-dizyunktivnyh-normalnyh-form-iz-sokraschyonnoy-dizyunktivnoy-normalnoy-formy-s-ispolzovaniem> (accessed: 01.03.2023). (In Russian).
11. Caldwell S. H. Switching circuits and logical design. Moskatov G. K., Talantsev A. D., translators; Gavrilov M. A., editor. Moscow: Izd-vo inostr. lit.; 1962. 740 p. (In Russian).

Информация об авторе

А. Г. Назин – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the author

A. G. Nazin – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья
УДК 662.6/.9 + 519.87
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ ПЛОТНОГО СЛОЯ КУСКОВ УГЛЯ, ПРОДУВАЕМОГО ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Николай Николаевич Синицын^{1✉}, **Наталья Владимировна Запатрина**²,
Юлия Владимировна Грибкова³, **Ирина Анатольевна Сарычева**⁴,
Елена Викторовна Голицына⁵, **Ксения Александровна Шушкова**⁶

^{1,6} Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

^{1,2,3,4,5} Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники Минобороны России,
Череповец, Россия

¹ nnsinitcyn@chsu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ 150475@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁴ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ ka.shushkova1@severstal.com

Аннотация. В статье предложена методика расчета аэродинамического сопротивления плотного слоя натурального твердого топлива для прогнозирования размеров сушильной установки с учетом фазового перехода влаги из жидкого состояния в паровое и продолжительность сушки отходящими газами котлоагрегата слоя разной высоты. Представлен алгоритм и выполнен расчет температурных полей материала и газа в продуваемом движущемся плотном слое угля с учетом аэродинамического сопротивления плотного слоя при изменении скорости газов, проходящих через слой.

Ключевые слова: плотный слой, нагрев, твердое топливо, математическая модель, температурное поле, отходящие газы котлоагрегата

Для цитирования: Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Грибкова Ю. В., Сарычева И. А., Голицына Е. В., Шушкова К. А. Математическое моделирование сушки плотного слоя кусков угля, продуваемого отходящими газами котлоагрегатов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 92–99. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF DRYING DENSE COAL LAYER VENTILATED BY BOILER UNITS' EXHAUST GASES

Nikolay N. Sinitsyn^{1✉}, **Natalya V. Zapatrina**², **Yuliya V. Gribkova**³, **Irina A. Sarycheva**⁴,
Elena V. Golitsyna⁵, **Kseniya A. Shushkova**⁶

^{1,6} Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

^{1,2,3,4,5} Military Order of Zhukov University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

¹ nnsinitcyn@chsu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ 150475@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁴ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ ka.shushkova1@severstal.com

Abstract. The article proposes a method for calculating air resistance of a dense layer of natural solid fuel in order to forecast the drying installation size while taking into account the moisture phase change from

liquid to steam and duration of drying process of various height layers with boiler unit's exhaust gases. An algorithm is presented and temperature patterns of material and gas in ventilated moving dense coal layer is calculated considering air resistance of a dense layer when velocity of gas passing through the layers changes.

Keywords: dense layer, heating, solid fuel, mathematical model, temperature pattern, boiler unit's exhaust gases

For citation: Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Gribkova Yu. V., Sarycheva I. A., Golitsyna E. V., Shushkova K. A. Mathematical modeling of drying dense coal layer ventilated by boiler units' exhaust gases. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):92–99. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей решения проблемы экономии топлива и повышения энергоэффективности котельных установок является разработка глубокой утилизации теплоты уходящих газов из котлов [1–4]. Методы расчета температурных полей в плотном слое железорудных окатышей при перекрестном токе газа и материала представлено в [5, с. 152–175], аналитическое решение температурного поля плотного слоя окатышей представлено в [6]. Твердое топливо при сжигании в камерных топках предварительно измельчают и в виде пыли в смеси с воздухом вдувают в топочную камеру котлоагрегатов, где оно сгорает. Недостатком сжигания топлива в пылевидном состоянии является сложность, громоздкость и в большинстве случаев высокая стоимость оборудования пылеприготовления, а также значительный расход на него электроэнергии. Для улучшения размола топлива, хранения и транспортировки пыли, а также интенсификации ее зажигания и горения топливо подсушивают. Сушка топлива повышает его теплотворную способность, позволяет эффективно использовать низкосортное топливо в различных топочных устройствах и промышленных печах, требующих высокотемпературного режима. На электростанциях имеются отходящие газы котлов, используя которые на сушку

топлива можно значительно уменьшить расход тепла на 1 кг испаренной влаги при испарении ее в топке парового котла.

В данной работе рассматривается возможность сушки твердого топлива отходящими дымовыми газами котельного агрегата. Процесс сушки проводится в движущемся плотном поперечно продуваемом слое угольного топлива. Для моделирования процесса необходимо разработать математическую модель прогрева плотного продуваемого слоя твердого натурального топлива и провести моделирование прогрева этого слоя при температурах отходящих газов из котлоагрегатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве математического аппарата при такого рода расчетах используются решения Шумана и Анцелиуса [7, 8]. Они позволяют найти температурное поле в нагреваемом неподвижном плотном слое, в продуваемом газом слое или в поперечно продуваемом движущемся плотном слое. Приводимые решения справедливы для случаев, когда начальная температура во всех точках слоя одинакова, а температура газа на входе в слой постоянна во времени.

На рис. 1 представлена расчетная схема для температурного поля плотного движущегося продуваемого слоя материала.

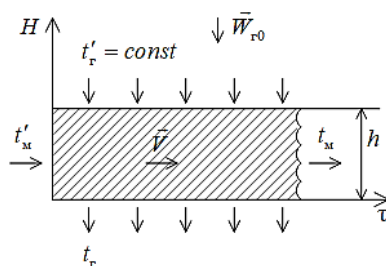


Рис. 1. Расчетная схема для температурного поля плотного продуваемого движущегося слоя материала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Здесь t'_r – температура газа на входе в слой; t_r – температура газа на выходе из слоя в момент времени τ ; t'_m – начальная температура материала в слое; t_m – температура материала в момент времени τ ; $\vec{W}_{r0}$ – вектор скорости газа на входе в слой; $\vec{V}$ – вектор скорости слоя; h – высота слоя.

Плотный слой угля расположен на продуваемой цепкой решетке. Отходящие дымовые газы котлоагрегатов продувают поперечно движущийся слой угля. Температура горячего газа t'_r постоянна по всей площади слоя. Температура материала на входе в слой также постоянна. Слой топлива высотой h движется с постоянной скоростью $\vec{V}$.

Для этих условий решения задачи Шумана в наиболее удобной для расчетов форме представляются следующими выражениями [8]:

$$\theta_m = \frac{t_m - t'_m}{t'_r - t'_m} = e^{-Y} \int_0^Z e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Y\varepsilon}) d\varepsilon; \quad (1)$$

$$\theta_r = \frac{t_r - t'_m}{t'_r - t'_m} = 1 - e^{-Z} \int_0^Y e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Z\varepsilon}) d\varepsilon, \quad (2)$$

в которых относительная температура для материала θ_m и для газа θ_r определяются безразмерными числами высоты слоя Y и времени

Z : $Y = \frac{k_v \cdot h}{C_r \cdot W_{r0}}$; $Z = \frac{k_v \cdot \tau}{C_m \cdot (1-f)}$, а $I_0(x)$ является функцией Бесселя первого рода от мнимого аргумента; $k_v = \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{d_m^2}{A(1-f)\lambda_m} \right)^{-1}$ – суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³К); $\alpha_v = \alpha_F \cdot F$ – объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³К); α_F – коэффициент теплообмена Вт/(м²К); $F = \frac{6(1-f)}{d_m}$, м² – для кусков сферической формы, а для кусков неправильной формы $F = \frac{7,5(1-f)}{d_m}$, м²; d_m – диаметр куска, м; λ_m – коэффициент теп-

лопроводности материала, Вт/(мК); $A = 60$ для частиц сферической формы и $A = 75$ для кусков неправильной формы; h – высота слоя, м; f – порозность слоя; C_r – объемная теплоемкость газа, Дж/(м³К); W_{r0} – скорость газа на свободное сечение при нормальных условиях, м/с; C_m – кажущаяся теплоемкость слоя материала, Дж/(м³К), учитывающая испарение влаги; τ – время прогрева, с.

Для частиц правильной сферической или близкой к ней формы расчет коэффициентов теплоотдачи α_F при нагреве термически тонких частиц, для которых число Био не превышает 1, выполнен по уравнениям [7, 8]:

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67} \text{ (для } Re > 200 \text{)}, \quad (3)$$

$$Nu = 0,106 \cdot Re \text{ (для } Re \leq 200 \text{)}, \quad (4)$$

где $Nu = \frac{\alpha_F \cdot d_m}{\lambda_r}$; $Re = \frac{W_{r0} \cdot d_m}{\nu_t}$; λ_r – коэффициент теплопроводности газов; ν_t – коэффициент кинематической вязкости газа. Свойства газа выбирают для средней температуры системы.

Расчет кажущейся теплоемкости C_m проводят по выражению (5):

$$C_m = \rho_{\text{нас}} \cdot C_c + \frac{(\rho_{\text{нас}} \cdot W \cdot R_t + \rho_{\text{нас}} \cdot W \cdot C_{H_2O} \cdot \Delta t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{нас}} = 800 \text{ кг/м}^3$ для каменных углей; C_c – удельная теплоемкость сухого угля; Δt – интервал температур нагрева; W – влажность угля в долях; R_t – теплота испарения влаги, равная 2 256,8 кДж/кг; C_{H_2O} – удельная теплоемкость воды, равная 4,2 кДж/кг; порозность слоя угля определяется по формуле $f = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_m}$; $\rho_m = \rho_{m1} \cdot \frac{100 - w_1^r}{100 - w_2^r}$; $\rho_{m1} = \rho_{k0} \cdot (1 + K \cdot A^d)$; $\rho_{k0} = 1205 \text{ кг/м}^3$; $K = 0,0095$ [9] для кузнечного каменного угля; A^d – зольность на сухую массу, равная по опытным данным 3,3...5,8 % [9]; w_1^r и w_2^r – влажность в состоя-

нии 1 и в состоянии 2 в % масс. Для кузнецкого угля $\lambda_m = 0,201$ Вт/(мК).

Начало выхода летучих веществ $T_{\text{лет}}^{\text{вых}} = 320$ °С.

Теплоемкость материала угля рассчитывается по формуле (6):

$$C_2 = \frac{(100 - w^r) \cdot C_c + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot w^r}{100}, \quad (6)$$

где w^r – влажность материала угля, %.

Примем для определенности каменный кузнецкий газовый уголь. Температура начала выхода летучих веществ 320 °С. Расчетный расход воздуха на горение $V^0 = 6,88$ м³/кг, дымовых газов $V_r^0 = 7,42$ м³/кг [10]. Для котлов производительностью до 12 т/ч температура уходящих газов принимается 160–180 °С. Коэффициент избытка в уходящих $\alpha_{yx} = 1,6$, количество газов на выходе $V_r = 13,87$ м³/кг.

Из уравнения теплового баланса определяется расход топлива по выражению [10]:

$$B = \frac{D \cdot (i_{\text{пп}} - i'_{\text{пв}})}{Q_H^P \cdot \eta_{\text{ка}}} \cdot 100, \text{ кг/с}, \quad (7)$$

где D – паропроизводительность; $i_{\text{пп}}$ и $i'_{\text{пв}}$ – энтальпии перегретого пара и питательной воды; Q_H^P – теплота сгорания топлива, Дж/кг; $\eta_{\text{ка}}$ – коэффициент полезного действия котлоагрегата.

Объем воздуха и продуктов сгорания определяются по [10]. Количество сжигаемого твердого топлива в топке котла производительностью, например, 12 т/ч = 0,3476 т/с. Количество уходящих дымовых газов $V_{yx} = 7,42 \cdot 1,6 \cdot 0,3476 = 4,335$ м³/с.

При ширине конвейерной ленты 0,5 м и скорости газа $W_{r0} = 0,6$ м/с площадь поперечного сечения потока отходящих дымовых газов равна $F = 7,225$ м². Длина конвейерной ленты:

$$L = \frac{F}{0,5} = 14,45 \text{ м}. \quad (8)$$

Местное сопротивление поперечно продуваемого слоя рассчитывается по формуле [11]:

$$\Delta h_m = \xi_{\text{сл}} \cdot \frac{W_{r0}^2}{2} \cdot \rho_r, \quad (9)$$

где ρ_r – плотность газа от средней для системы температуры имеет вид (табл. 1) [10]:

Таблица 1

Зависимость плотности газа от температуры

t, °С	0	100	200	300
ρ_r , кг/м ³	1,295	0,950	0,748	0,617

Примечание: составлено авторами.

Сопротивление движущегося поперечно продуваемого слоя потоку газов определяется по формуле [11]:

$$\xi_{\text{сл}} = \xi_0 \cdot h \cdot \frac{a}{f^3}, \quad (10)$$

где $\xi_0 = \frac{36,3}{\text{Re}_a} + 0,4$.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_a = \frac{4W_{r0}}{\nu_t \cdot a}, \quad (11)$$

где W_{r0} – скорость фильтрации продуваемой среды, м/с принимается равной скорости потока в сечении, свободном от сыпучего материала; $a = \frac{6}{d_m}(1 - f)$ – удельная поверхность нагрева (на единицу объема), м²/м³; d_m – диаметр частиц сыпучего материала, м; m – порозность (доля пустот в слое).

По производительности V_r и потере давления Δh_m производится выбор дымососа по методике [11].

Алгоритм расчета температурного поля.

На рис. 2 представлена блок-схема расчета температурного поля материала слоя и газа в поперечно продуваемом движущемся плотном слое.

В блоке № 1 осуществляется ввод исходных данных. В блоке № 2 рассчитываются теплофизические свойства газа. В блоке № 3

осуществляется расчет числа Рейнольдса, плотности материала в зависимости от влажности, кажущейся теплоемкости материала слоя.

В блоке № 4 сравнивается число Рейнольдса с критическим значением. В блоках № 5, 6, 7 проводится расчет коэффициентов теплоотдачи α_F и α_V .

В блоке № 8 выполняется расчет коэффициента теплопередачи в слое, безразмерная величина слоя и безразмерное время.

В блоке № 9 определяются безразмерные температуры газа и материала слоя.

В блоке № 10 печатаются результаты расчетов.

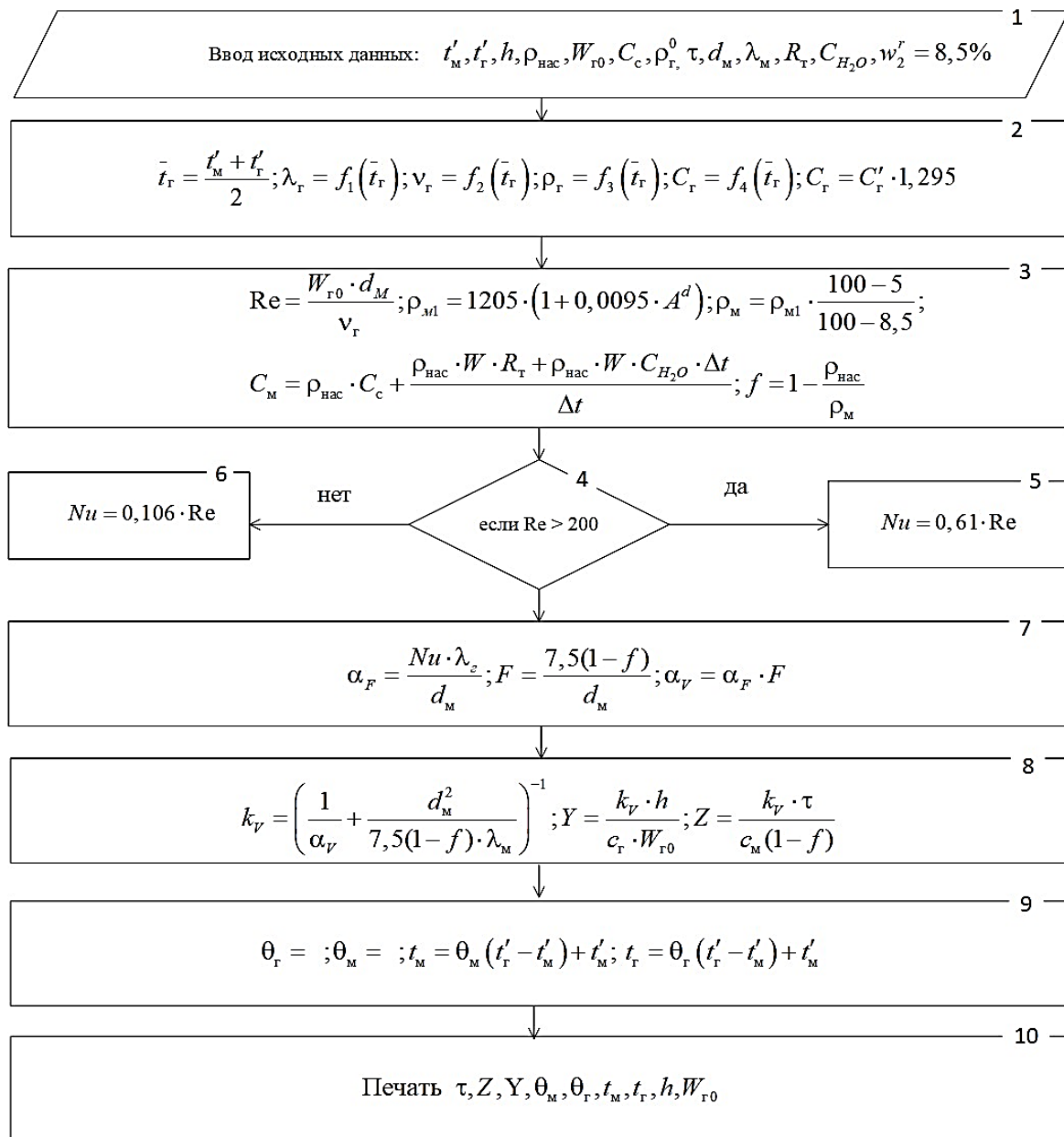


Рис. 2. Блок-схема расчета температурных полей газа и материала в движущемся поперечно продуваемом плотном слое

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 3 представлено температурное поле материала слоя при температуре газа на входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ при $W_{r0} = 0,67$ м/с.

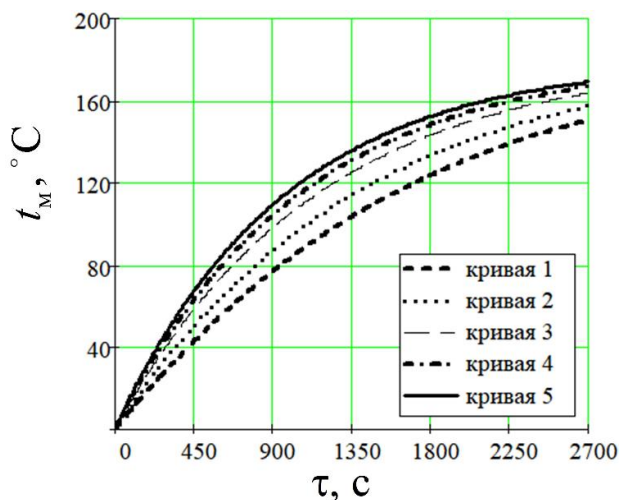


Рис. 3. Температура материала слоя:

1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$; 5 – $h = 0,01$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Из рис. 3 видно, что при скорости газа при $W_{r0} = 0,67$ м/с материал высушивается через 1 125 с при высоте слоя $h = 0,3$ м.

входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ при $W_{r0} = 0,1$ м/с. Из рис. 4 видно, что материал высушивается через 2 450 с при высоте слоя $h = 0,3$ м.

На рис. 4 представлено температурное поле материала слоя при температуре газа на

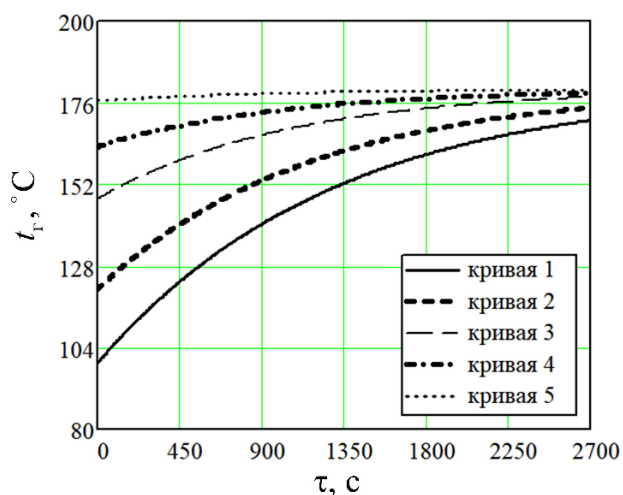


Рис. 4. Температура материала слоя:

1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$; 5 – $h = 0,01$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 представлено температурное поле газа на выходе из слоя при температуре газа на входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ и $W_{r0} = 0,67 \text{ м/с}$.

Высота слоя $h = 0,3 \text{ м}$. Температура газа на выходе из слоя через 1125 с равна $t_m = 150^\circ\text{C}$.

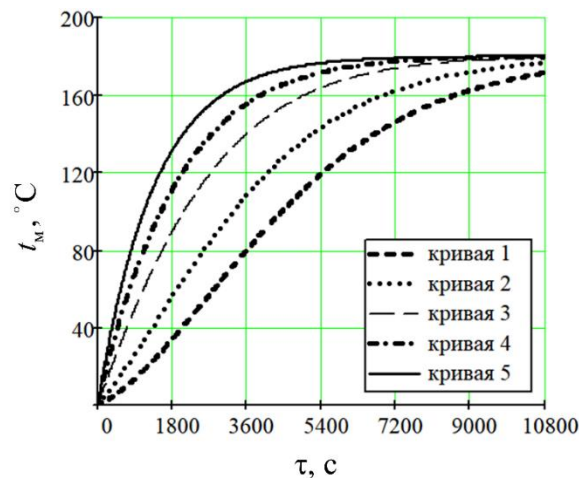


Рис. 5. Температура газа на выходе из слоя:
1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная математическая модель прогрева движущегося поперечно продуваемого плотного слоя твердого натурального топлива позволяет получать температурные поля материала слоя и проходящего через слой газа с учетом фазового перехода влаги из жидкого состояния в паровое. Разработан алгоритм расчета температурных полей в поперечно продуваемом плотном слое. Температурное поле материала слоя позволяет определить продолжительность прогрева и сушки слоя, содержащего твердое натуральное топливо (рис. 3) при характерных скоростях на живое сечение при нормальных условиях газового потока (рис. 3–4), а также оценить температуру греющих газов на выходе плотного слоя в любой момент времени прогрева (рис. 5). Учет аэродинамики плотного слоя позволяет определить характерные размеры сушильной установки и подобрать

нагнетатель для преодоления сил аэродинамического сопротивления плотного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель прогрева плотного слоя топлива с учетом фазового перехода влаги отходящими газами котлоагрегата позволяет определить характерные размеры сушильной установки при проектировании. Полученные данные показывают, что топливо перед подачей в котельный агрегат можно нагреть и удалить часть или всю влагу. Удаление влаги топлива повышает теплотворность твердого натурального топлива. Утилизация теплоты отходящих газов котлоагрегатов повышает коэффициент полезного действия котельной установки. Для управления процессом сушки твердого натурального топлива необходимо разработать систему управления процессом сушки на промышленном объекте.

Список источников

1. Гарбер В., Козлов В., Кириллов К. Условия безопасной работы аппаратов термической сушки угля // Уголь. 2014. № 6. С. 62–65.
2. Шадек Е. Г. Оценка эффективности глубокой утилизации тепла продуктов сгорания котлов электростанций // Энергосбережение. 2016. № 2. С. 62–68.

References

1. Garber V., Kozlov V., Kirillov K. Conditions of safe operation of coal thermal drying units. *Ugol'*. 2014;(6):62–65. (In Russian).
2. Shadok E. G. Evaluation of efficiency of deep recuperation of power plant boilers' combustion productions. *Energoberezhenie*. 2016;(2):62–68. (In Russian).

3. Мильто О. А., Калмыков К. С., Амосов Н. Т. Утилизация низкопотенциальной теплоты уходящих газов котельных агрегатов // Энергетические системы. 2018. № 1. С. 298–302.
4. Лунева С. К. Повышение энергоэффективности котельной путем утилизации тепловых потерь // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 1. С. 48–54.
5. Юрьев Б. П., Брук Л. Б., Спирин Н. А. и др. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей : моногр. Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 310 с.
6. Китаев Б. И., Тимофеев В. Н., Боковиков Б. А. и др. Тепло- и массообмен в плотном слое. М. : Metallurgiya, 1972. 430 с.
7. Казанцев Е. Н. Промышленные печи. М. : Metallurgiya, 1975. 368 с.
8. Зобнин Б. Ф., Казяев М. Д., Китаев Б. И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М. : Metallurgiya, 1982. 358 с.
9. Любов В. К., Любова С. В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск : Солти, 2010. 495 с.
10. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. СПб. : НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
11. Аэродинамический расчет котельных установок: нормативный метод / под ред. С. Н. Мочана. Л. : Энергия, 1977. 256 с.
3. Milto O. A., Kalmykov K. S., Amosov N. T. Utilization of low-potential heat of exhaust gases of boiler room aggregates. *Energy System*. 2018;(1):298–302. (In Russian).
4. Luneva S. K. Increase of energy efficiency of the boiler room by utilization of thermal losses. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2016;(1):48–54. (In Russian).
5. Yuryev B. P., Bruk L. B., Spirin N. A. et al. *Osnovy teorii protsessov pri obzhige zhelezorudnykh okatyshei*. Monograph. Nizhny Tagil: STI (branch) UFU; 2018. 310 p. (In Russian).
6. Kitaev B. I., Timofeev V. N., Bokovikov B. A. et al. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe*. Moscow: Metallurgiya; 1972. 430 p. (In Russian).
7. Kazantsev E. N. *Promyshlennye pechi*. Moscow: Metallurgiya; 1975. 368 p. (In Russian).
8. Zobnin B. F., Kazyayev M. D., Kitaev B. I. et al. *Teplo- i tekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei*. Moscow: Metallurgiya; 1982. 358 p. (In Russian).
9. Lyubov V. K., Lyubova S. V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispolzovaniia biotopliv*. Arkhangelsk: Solti; 2010. 495 p. (In Russian).
10. *Teplovoi raschet kotlov: normativnyi metod*. St. Petersburg: NPO TsKTI; 1998. 256 p. (In Russian).
11. Mochan S. N., editor. *Aerodinamicheskii raschet kotelnnykh ustanovok: normativnyi metod*. Leningrad: Energiya; 1977. 256 p. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Н. Синицын – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования.

Н. В. Запатрина – кандидат технических наук, доцент.

Ю. В. Грибкова – кандидат технических наук.

И. А. Сарычева – кандидат технических наук.

Е. В. Голицына – кандидат технических наук, доцент.

К. А. Шушкова – аспирант.

Information about the authors

N. N. Sinitsyn – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Honored Worker of Higher Professional Education.

N. V. Zapatrina – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Yu. V. Gribkova – Candidate of Sciences (Engineering).

I. A. Sarycheva – Candidate of Sciences (Engineering).

E. V. Golitsyna – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

K. A. Shushkova – Postgraduate.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются
на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных
Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются
в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 07.07.2023. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 10. Заказ № 215. Цена свободная