

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 3 (71)

2024

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Бождай А. С., Горшенин Л. Н. Метод классификации объектов с гетерогенным набором информационных признаков, основанный на генерации графо-хроматических карт	5
Филиппов И. А., Волков В. А., Никишин К. И., Гурин Е. И. Моделирование коммутатора программно-конфигурируемой сети с поддержкой протокола OpenFlow в среде AnyLogic	14
Иванов А. И., Малыгина Е. А., Серикова Ю. И., Ермакова А. И., Гужова С. А. Бионика: оценка числа кодовых состояний обмена данными в структуре микропотребляющих, высокоразмерных, природоподобных нейровычислителей.....	25
Иванов А. И., Годунов А. И., Малыгина Е. А., Папуша Н. А., Ермакова А. И. Нейросетевой анализ малых выборок с использованием большого числа статистических критериев для проверки последовательности гипотез о значении математических ожиданий коэффициентов корреляции	37
Гужова С. А. Дифференциальный критерий Джини для нейросетевого анализа малых выборок биометрических данных.....	47
Борисов Н. Н., Солодухин М. Ю., Годунов А. И. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микромеханических датчиков в составе танковых управляемых ракет	55

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

Юрков Н. К., Рыбаков И. М., Вершинин Е. А. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора.....	64
Светлов А. В., Колдов А. С. Измерительная установка для определения параметров многоэлементных электрических цепей.....	78
Ашанин В. Н., Доспехов А. А., Кожеевников М. А. Автоматизированная система регулирования выходных напряжений электрических подстанций радиальной системы электроснабжения	89

<i>Бардин В. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Базыкина Н. А., Самохина К. С., Урваев И. Н.</i> Источник питания беспроводных устройств информационно-измерительных и управляющих систем на основе усовершенствованного пьезоэлектрического виброгенератора.....	98
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Курносков Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г.</i> Оценка возможности сборки длинномерных цилиндрических деталей	115
<i>Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е.</i> Силы в зацеплении планетарно-цевочной передачи с сателлитом, имеющим эксцентриситет	128
<i>Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О.</i> Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования	142
<i>Янов Е. С., Антонычев С. В., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И.</i> Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик.....	157

ПАМЯТИ УЧЕНЫХ

Владимир Васильевич Смогунов (к восьмидесятилетию со дня рождения)	167
--	-----

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 3 (71)

2024

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Bozhday A.S., Gorshenin L.N.</i> A method for classifying objects with a heterogeneous set of information features based on the generation of graph-chromatic maps	5
<i>Filippov I.A., Volkov V.A., Nikishin K.I., Gurin E.I.</i> Modelling of SDN switch with OpenFlow protocol in AnyLogic.....	14
<i>Ivanov A.I., Malygina E.A., Serikova Yu.I., Ermakova A.I., Guzhova S.A.</i> Bionics: estimation the number of code states of data exchange in the structure of microconsuming, high-dimensional, nature-like neurocomputers.....	25
<i>Ivanov A.I., Godunov A.I., Malygina E.A., Papusha N.A., Ermakova A.I.</i> Neural network analysis of small samples using a large number of statistical criteria to test the sequence of hypotheses about the value of mathematical expectations of correlation coefficients.....	37
<i>Guzhova S.A.</i> The Gini differential test for neural network analysis of small biometric data samples	47
<i>Borisov N.N., Solodukhin M.Yu., Godunov A.I.</i> Strapdown inertial navigation system based on micromechanical sensors as a part of tank guided missiles.....	55

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Yurkov N.K., Rybakov I.M., Vershinin E.A.</i> Optimizing the thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink.....	64
<i>Svetlov A.V., Koldov A.S.</i> A measurement installation for determining multi-element electrical circuit parameters	78
<i>Ashanin V.N., Dospekhov A.A., Kozhevnikov M.A.</i> Automated system for regulating output voltages of electrical substations of the radial power supply system.....	89
<i>Bardin V.A., Volkov V.S., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Samohina K.S., Urvaev I.N.</i> Power supply for wireless devices of information measuring and control systems based on an improved piezoelectric vibration generator.....	98

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

Kurnosov N.E., Salmin V.V., Elistratova A.G. Assessing the possibility of assembling long cylindrical parts	115
Tchufistov E.A., Tchufistov O.E. Forces in the engagement of planetary-pinion gear with satellite having eccentricity	128
Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Ustification of the parameters for setting up operations of through-pass centerless grinding	142
Yanov E.S., Antonychev S.V., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Studying methods for controlling the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics	157

IN THE MEMORY OF SCIENTISTS

Vladimir Vasilyevich Smogunov (on the eightieth anniversary of his birth)	167
---	-----

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 004.023

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-1

Метод классификации объектов с гетерогенным набором информационных признаков, основанный на генерации графо-хроматических карт

А. С. Бождай¹, Л. Н. Горшенин²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹bozhday@yandex.ru, ²gorshenin.lev@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном мире непрерывно обрабатываются большие объемы данных. Один из видов обработки данных – классификация. Задача классификации часто осложняется необходимостью классифицировать объекты с гетерогенным набором признаков. Одним из основных путей решения таких задач является приведение разнородных признаков объекта к одному универсальному типу. В данной работе изложен собственный оригинальный подход к решению таких задач. *Материалы и методы.* Предлагаемый метод основан на приведении объектов к универсальному растровому представлению графо-хроматических карт и имеет ряд особенностей, выгодно отличающих его от аналогичных методов. Рассмотрена возможность использования уже существующих сверточных нейронных сетей в качестве классификатора создаваемых графо-хроматических карт. *Результаты и выводы.* Разработана структурная схема системы классификации объектов предложенным методом и описаны ее составные элементы. Предложен алгоритм генерации графо-хроматической карты. Сделаны выводы о потенциальных возможностях и преимуществах предложенного подхода.

Ключевые слова: классификация, методы классификации, гетерогенные данные, машинное обучение, нейронные сети, графо-хроматическая карта

Для цитирования: Бождай А. С., Горшенин Л. Н. Метод классификации объектов с гетерогенным набором информационных признаков, основанный на генерации графо-хроматических карт // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 5–13. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-1

A method for classifying objects with a heterogeneous set of information features based on the generation of graph-chromatic maps

A.S. Bozhday¹, L.N. Gorshenin²

© Бождай А. С., Горшенин Л. Н., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

¹bozhday@yandex.ru, ²gorshenin.lev@gmail.com

Abstract. *Background.* In the modern world, large volumes of data are continuously processed. One type of data processing is classification. A classification task is often complicated by the need to classify objects with a heterogeneous set of features. One of the main ways to solve such problems is to reduce heterogeneous features of an object to one type. This work outlines our own original approach to solving such problems. *Materials and methods.* The proposed method is based on transformation objects to a universal raster representation of grapho-chromatic maps, and has a number of features that distinguish it for the better from similar methods. The possibility of using already existing convolutional neural networks as a classifier of created grapho-chromatic maps is considered. *Results and conclusions.* A block diagram of a system for classifying objects using the proposed method has been developed. Each element of the system is described in detail. An algorithm for generating a grapho-chromatic map is proposed. Conclusions are drawn about the potential capabilities and advantages of the proposed approach.

Keywords: classification, methods of classification, heterogeneous data, machine learning, neural networks, graph-chromatic map

For citation: Bozhday A.S., Gorshenin L.N. A method for classifying objects with a heterogeneous set of information features based on the generation of graph-chromatic maps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-1

Введение

Сегодня в мире создаются и обрабатываются огромные объемы разнородных данных. При этом одним из самых распространенных способов обработки и анализа является классификация [1, 2].

В качестве примера рассмотрим задачу нейросетевой классификации пользователей социальной сети. Ее решение во многом будет зависеть от заданных целевых установок, связанных с формированием множества пользовательских признаков, их сравнительной значимостью, способами их измерения и т.п. Очевидно, что целевые установки могут постоянно меняться и поэтому необходимо обеспечить возможность гибкой настройки параметров классификации без переобучения нейронной сети. К тому же профиль пользователя может не иметь полного набора необходимых признаков, и поэтому должна быть предусмотрена возможность работы с объектами в условиях недостаточности данных. Задача усложняется еще и тем, что объект, представляющий пользователя, может обладать признаками различной природы: числовыми, категориальными, текстовыми, мультимедиа, функционально-поведенческими и др.

Существует ряд методов, позволяющих классифицировать объекты с гетерогенным набором информационных признаков: M3DN [3], Extended k-NN [4], методы, основанные на деревьях решений, Extended Naive Bayes [5], методы, основанные на нечеткой логике. Из перечисленного только классификатор M3DN, представляющий собой по сути набор объединенных нейросетей, может быть расширен для работы с признаками любого типа. Остальные методы способны обрабатывать только численные и категориальные признаки. При этом для классификации с возможностью задания важности отдельных признаков не подходит ни один из перечисленных методов.

Это делает актуальной разработку метода, способного решить подобного рода задачи без необходимости многократного (т.е. под разные наборы признаков) переобучения нейронного классификатора.

Одним из возможных методов решения поставленной задачи является приведение признаков к общему типу [4]. При этом желательно, чтобы приведение было обратимым и существенным образом не искажало пространство признаков объекта. В настоящей работе предлагается оригинальный подход, использующий приведение информации об объекте к унифицированному графическому виду с использованием растровых примитивов с управляемыми характеристиками.

Материалы и методы

Предлагаемый метод классификации в качестве универсального типа, к которому будут приводиться все другие типы признаков, использует растровое изображение (графо-хроматическую карту – ГХК) по аналогии с QR-кодами. Информация о свойствах объекта наносится (кодируется) на ГХК в виде управляемого множества графических примитивов, что позволяет учитывать сравнительный вес каждого признака в их общем наборе. При этом управляемость процесса кодирования обеспечивается за счет предварительного установления корреляции между весом (важностью) каждого признака и параметрами соответствующего ему графического кода: количеством графических элементов, их размером, цветом, формой, плотностью расположения, штриховкой, заливкой и т.д. В случае пропусков значений отдельных признаков (или их явной неадекватности) они просто не будут закодированы в ГХК, что существенным образом не повлияет на общий результат классификации. Это позволяет уменьшить требования к предобработке данных.

Приведение разнородных признаков объекта к графическому виду значительно упрощает процесс классификации в сложных предметных областях, поскольку задача сводится к хорошо изученному и унифицированному процессу нейросетевой классификации изображений. При этом в качестве классификатора, как правило, используются сверточные нейросети, которые хорошо справляются с анализом растровых изображений. На сегодня существует множество сверточных нейронных сетей с самой разной архитектурой: AlexNet [6], GoogleNet [6], ResNet50 [7], VGG16 [7], DenseNet [8]. Выбор одной из готовых архитектур потребует лишь единовременного дообучения нейросети на специальной обучающей выборке, составленной из множества ГХК, сгенерированных автоматическим образом.

Предлагаемый метод классификации включает в себя следующие этапы:

1. Формирование запроса к базе данных для выборки объектов, подлежащих классификации.
2. Настройка управляющих параметров, связанных с заданием набора признаков классификации и их весовых коэффициентов.
3. Предобработка данных (признаков) выбранных объектов (очистка, фильтрация, унификация числовых единиц измерения и масштабов измерительных шкал).
4. Формирование информационного вектора признаков.
5. Автоматическая генерация ГХК с учетом заданных управляющих параметров.

6. Преобразование растрового изображения ГХК в одномерный входной вектор для нейросети.

7. Нейросетевая классификация ГХК.

Результаты и обсуждение

С учетом перечисленных этапов на рис. 1 предлагается структурная схема системы классификации объектов, включающая 8 основных подсистем: блок выборки объектов, блок предобработки данных, блок подготовки вектора информационных признаков, блок генерации ГХК, блок классификации ГХК, блок обработки результатов, блок управления и настройки параметров, блок генерации обучающих выборок ГХК. Также у системы имеются графический и программный интерфейсы, через которые пользователь может управлять процессом классификации и оценивать полученные результаты. Кроме того, на схеме показаны хранилища для обучающего набора ГХК и для данных об объектах, подлежащих классификации.



Рис. 1. Структурная схема системы классификации

Взаимодействие пользователя с системой осуществляется через графический интерфейс. Интерфейс предусматривает две основные панели. С помощью первой пользователь может формировать запросы на выборку объектов,

управлять параметрами и весами признаков, получать результаты классификации. С помощью второй – управлять генерацией обучающей выборки ГХК.

Блок выборки объектов отвечает за формирование набора объектов, соответствующих критериям, описанным в запросе. Через соответствующий интерфейс API пользовательский запрос транслируется в SQL-представление на уровень системы управления базами данных с последующим возвратом требуемых данных на вход блока предобработки.

Блок предобработки данных отвечает за предварительную обработку данных об объектах [9]. Предобработка включает в себя устранение несоответствий формату и аномальных значений, нормализацию числовых значений (приведение их к одному масштабу). Также в этом блоке происходит извлечение метаданных из признаков, имеющих формат мультимедиа, и преобразование графовых признаков в матрицы весов. Обработанные объекты передаются блоку формирования вектора информационных признаков.

Блок формирования вектора информационных признаков преобразовывает данные об объекте в формат «понятный» блоку генерации ГХК, – вектор трехэлементных кортежей вида *<идентификатор признака, тип признака, значение признака>*. При этом признак может иметь массив данных определенного типа, тогда этот массив целиком записывается в значение признака. Вектор информационных признаков передается блоку генерации ГХК.

Блок генерации ГХК является одним из ключевых элементов системы и отвечает за создание графо-хроматической карты по вектору информационных признаков с учетом управляющих параметров, полученных с блока управления. От блока управления в виде числового вектора, содержащего значения от 0 до 255, передается информация о важности каждого признака в классификации. Если значение важности равно нулю – данный признак не наносится на ГХК и, следовательно, вообще не участвует в классификации. Сгенерированное растровое изображение передается в блок классификации.

Информация о признаке включает в себя пять составляющих: семантику признака, его тип, значение (-ия), количество значений, важность для классификации. Эта информация отображается на ГХК в виде графических примитивов различных форм и цветов, в различном количестве расположенных в определенных местах ГХК. Цвет пустой ГХК следует выбрать черным (RGB – 0,0,0), так как при этом по умолчанию на вход сверточной нейросети будут поданы нули. Семантика признаков передается с помощью формы примитивов. Если признак имеет несколько значений (набор текстов постов, набор изображений на странице пользователя и т.п.), то он наносится на ГХК в виде нескольких примитивов. Важность признаков передается с помощью прозрачности примитивов – чем меньше важность, тем менее заметен (вплоть до полной прозрачности) примитив на ГХК. Отмасштабированные значения численных признаков можно передавать с помощью размера примитива. Значения категориальных признаков лучше передавать с помощью формы примитива, как и их семантику, так как их значения не имеют отношения порядка, в отличие от численных. Значения текстовых признаков можно наносить на ГХК в формате модифицированного QR-кода, поверх которого будет изображаться графический примитив, передающий семантику. Тем же способом предлагается отображать и метаданные мультимедиа признаков. Графовые признаки можно наносить на ГХК, кодируя их матрицу весов в виде клетчатого поля, где каждая клетка соответствует ребру, а ее цвет – весу.

В качестве примера рассмотрим три тестовых объекта и возможные варианты ГХК для каждого из них. Объектам соответствуют несколько гетерогенных признаков (табл. 1): возраст (числовой признак), пол (категориальный признак), социальный статус (категориальный признак) и профессия (текстовый признак). Возможные варианты растрового кодирования показаны на рис. 2.

Таблица 1

Информация об объектах

Объекты\Признаки	Возраст	Пол	Социальный статус	Профессия
1	17	Ж	не в браке	–
2	35	М	в браке	учитель
3	52	М	разведен	сварщик



Рис. 2. Варианты ГХК для тестовых объектов

Численный признак возраста закодирован в виде треугольного векторного примитива, размер которого меняется в зависимости от значения признака. Категориальные признаки пола и социального статуса отображены на карте в виде составных примитивов, одна из частей которых меняет форму в зависимости от значения. Значение текстового признака профессии представлено в виде упрощенного QR-кода. При этом семантика этого признака отображена в виде графического примитива в правом верхнем углу упрощенного QR-кода. У первого объекта отсутствует значение признака профессии, и поэтому признак отсутствует на соответствующей ГХК.

Для преобразования вектора информационных признаков в ГХК используется алгоритм, состоящий из следующих шагов:

1. Получение вектора информационных признаков от предыдущего блока.
2. Получение вектора, содержащего информацию о важности каждого признака, от блока управления.
3. Если вектор признаков не пуст, то переход к шагу 4, иначе – к шагу 10.
4. Взятие очередного элемента вектора (кортежа *<идентификатор, тип, значение>*).
5. Если важность признака с таким идентификатором не равна нулю, то переход к шагу 6, иначе – к шагу 3.
6. Выбор векторного графического примитива в зависимости от идентификатора признака.
7. Выбор способа изображения на ГХК в зависимости от типа признака и его важности.

8. Нанесение выбранного векторного графического примитива выбранным способом на ГХК с учетом значения признака.

9. Переход к шагу 3.

10. Преобразование ГХК в растровый формат.

Блок классификации также является одним из ключевых элементов системы и отвечает за классификацию ГХК с учетом целевых параметров, полученных с блока управления.

Принимая во внимание, что требуется классифицировать растровое изображение, лучшим вариантом будет использовать одну из существующих сверточных нейросетей [6–8], дообученную на обучающем наборе ГХК.

Сверточная нейросеть извлекает абстрактные признаки из изображений [10]. Для проведения классификации в ее структуре чаще всего имеется завершающая полносвязная часть. За счет наличия нескольких полносвязных частей, каждая из которых обучена определению класса ГХК из заданного набора классов, одни и те же ГХК можно классифицировать по разным наборам классов.

Алгоритм классификации состоит из следующих шагов:

1. Получение ГХК от блока генерации в виде одномерного вектора данных.

2. Получение идентификатора цели классификации от блока управления.

3. Выделение абстрактных признаков из ГХК с помощью сверточной части нейросети.

4. Выбор той полносвязной части нейросети, которая обучена определять класс ГХК из набора классов, соответствующего цели классификации.

5. Выполнение классификации полносвязной частью нейросети.

6. Передача результатов классификации (числового вектора) и идентификатора цели классификации блоку обработки результатов.

Блок обработки результатов отвечает за анализ результатов классификации. При работе в режиме обучения этот блок передает на пользовательский интерфейс результаты классификации и показатели точности классификации на обучающей выборке. При работе в обычном режиме этот блок передает на пользовательский интерфейс распределение объектов по классам.

Блок управления отвечает за управление параметрами блока генерации ГХК и параметрами блока классификации. Пользователь посредством этого блока может настраивать важность тех или иных признаков при классификации, проводить классификацию по определенному им поднабору признаков, а также задавать целевой набор классов. Данные о важности признаков передаются в виде числового вектора блоку генерации ГХК. Идентификатор целевого набора классов передается блоку классификации.

Блок генерации обучающих выборок ГХК по запросу пользователя производит наборы обучающих ГХК, соответствующие заданным пользователем критериям. Сгенерированные ГХК передаются либо в банк обучающих выборок, либо напрямую блоку классификации.

Заключение

В ходе работы была рассмотрена задача классификации объектов с гетерогенным пространством информационных признаков. Для ее решения был предложен оригинальный метод классификации, основанный на преобразо-

вании гетерогенного пространства признаков объекта в универсальное представление графо-хроматической карты. Была разработана и подробно описана структурная схема системы, классифицирующей с помощью этого метода. Изложен алгоритм генерации ГХК.

Предложенный подход к классификации объектов с разнородными признаками обладает рядом преимуществ:

1. Изменение набора признаков объекта потребует лишь регенерации графо-хроматической карты, но не переобучения нейронной сети.

2. Благодаря унифицированному представлению информации об объекте классификатор (в данном случае – нейросеть) значительно упрощается. На текущий момент существует достаточное количество свободно распространяемых нейронных сетей различной архитектуры, специально обученных выделению признаков из графического растрового изображения. Для практической реализации предлагаемого подхода достаточно дообучить готовую нейросеть на выборке ГХК, которая может быть сгенерирована автоматически в достаточном объеме и разнообразии.

3. Метод может работать с самыми разными типами данных, достаточно иметь алгоритм преобразования данных этого типа в графический формат.

4. Классифицируемые объекты могут отличаться друг от друга не только типами признаков, но и их количественным составом, позволяя применять данный подход в условиях низкого качества данных (пропуски данных, «мусорные» значения и т.п.).

Список литературы

1. Berisha B., Mëziu E., Shabani I. Big Data Analytics in Cloud Computing: An overview // Journal of cloud computing. 2022. № 11 (24). doi: 10.1186/s13677-022-00301-w
2. Lim J. What is data classification? // Alation. URL: <https://www.alation.com/blog/what-is-data-classification/> (дата обращения: 12.04.2024).
3. Yang Y., Yi-Feng Wu, De-Chuan Zhan, Zhi-Bin Liu, Yuan Jiang. Complex object classification: A multi-modal multi-instance multi-label deep network with optimal transport // Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2018. P. 2594–2603.
4. Ali N., Neagu D., Trundle P. Evaluation of k-nearest neighbour classifier performance for heterogeneous data sets // SN Applied Sciences. 2019. № 1 (1559). doi: 10.1007/s42452-019-1356-9
5. Chung-Chian Hsu, Yan-Ping Huang, Keng-Wei Chang. Extended Naive Bayes classifier for mixed data // Expert Systems with Applications. 2008. № 3. P. 1080–1083. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.031
6. Waseem Rawat, Zenghui Wang. Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review // Neural Computation. 2017. № 29. P. 2352–2449.
7. Theckedath D., Sedamkar R. R. Detecting affect states using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 networks // SN Computer Science. 2020. № 1. P. 79. doi: 10.1007/s42979-020-0114-9
8. Zhang K., Guo Y., Wang X., Yuan J., Ding Q. Multiple feature reweight densenet for image classification // IEEE Access. 2019. № 7. P. 9872–9880. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890127
9. Data Preprocessing in Data Mining // Geeks For Geeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/data-preprocessing-in-data-mining/> (дата обращения: 01.05.2024).
10. Introduction to Convolution Neural Network // GeeksForGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-convolution-neural-network/> (дата обращения: 03.05.2024).

References

1. Berisha B., Mëziu E., Shabani I. Big Data Analytics in Cloud Computing: An overview. *Journal of cloud computing*. 2022;(11). doi: 10.1186/s13677-022-00301-w
2. Lim J. What is data classification? *Alation*. Available at: <https://www.alation.com/blog/what-is-data-classification/> (accessed 12.04.2024).
3. Yang Y., Yi-Feng Wu, De-Chuan Zhan, Zhi-Bin Liu, Yuan Jiang. Complex object classification: A multi-modal multi-instance multi-label deep network with optimal transport. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2018:2594–2603.
4. Ali N., Neagu D., Trundle P. Evaluation of k-nearest neighbour classifier performance for heterogeneous data sets. *SN Applied Sciences*. 2019;(1). doi: 10.1007/s42452-019-1356-9
5. Chung-Chian Hsu, Yan-Ping Huang, Keng-Wei Chang. Extended Naive Bayes classifier for mixed data. *Expert Systems with Applications*. 2008;(3):1080–1083. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.031
6. Waseem Rawat, Zenghui Wang. Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review. *Neural Computation*. 2017;(29):2352–2449.
7. Theckedath D., Sedamkar R.R. Detecting affect states using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 networks. *SN Computer Science*. 2020;(1):79. doi: 10.1007/s42979-020-0114-9
8. Zhang K., Guo Y., Wang X., Yuan J., Ding Q. Multiple feature reweight densenet for image classification. *IEEE Access*. 2019;(7):9872–9880. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890127
9. Data Preprocessing in Data Mining. *GeeksForGeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/data-preprocessing-in-data-mining/> (accessed 01.05.2024).
10. Introduction to Convolution Neural Network. *GeeksForGeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-convolution-neural-network/> (accessed 03.05.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Бождай

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: bozhday@yandex.ru

Aleksandr S. Bozhday

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of computer
aided design systems, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Лев Николаевич Горшенин

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: gorshenin.lev@gmail.com

Lev N. Gorshenin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.08.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

УДК 004.72

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-2

Моделирование коммутатора программно-конфигурируемой сети с поддержкой протокола OpenFlow в среде AnyLogic

И. А. Филиппов¹, В. А. Волков², К. И. Никишин³, Е. И. Гурин⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ilya_filippov_2002@inbox.ru, ²valek.volkov.2001@mail.ru,

³nkipnz@mail.ru, ⁴gurin2@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Малая гибкость и управляемость программного управления сетевым оборудованием – одна из проблем современных сетей. С целью решения этой проблемы прибегают к использованию программно-конфигурируемых сетей (ПКС), основным компонентом которых является коммутатор, поддерживающий протокол *OpenFlow*. Цель исследования заключается в моделировании коммутатора ПКС с поддержкой протокола *OpenFlow* в среде моделирования *AnyLogic*, для того чтобы получить характеристики передачи трафика в ПКС, экспериментально их оценить. *Материалы и методы.* Рассмотрена имитационная модель коммутатора ПКС в среде моделирования *AnyLogic*. Кратко описаны основные компоненты коммутатора, такие как таблицы потоков, правила действий над пакетом на входном и выходном портах коммутатора, управляющий процессор, очереди коммутатора. Отлажена работа схемы с коммутатором ПКС и поддержкой протокола *OpenFlow*. Произведены тесты, замерены данные, описаны преимущества представленной модели. *Результаты.* В рамках исследования проведен анализ процессов управления трафиком и конфигурации сетевого оборудования с использованием протокола *OpenFlow*, построена модель и выявлены потенциальные области применения и перспективы развития данной модели в ПКС. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы ПКС и разработки эффективных методов управления сетевым трафиком. *Выводы.* Была рассмотрена модель коммутатора ПКС с поддержкой протокола *OpenFlow*. Выявлены положительные и отрицательные моменты работы модели с использованием протокола *OpenFlow* в ПКС, а также продемонстрировано решение об увеличении пропускной способности сети для повышения эффективности работы модели.

Ключевые слова: протокол *OpenFlow*, ПКС, архитектура ПКС, *AnyLogic*, автоматизация сети, принцип разделения сети

Для цитирования: Филиппов И. А., Волков В. А., Никишин К. И., Гурин Е. И. Моделирование коммутатора программно-конфигурируемой сети с поддержкой протокола OpenFlow в среде AnyLogic // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 14–24. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-2

Modelling of SDN switch with OpenFlow protocol in AnyLogic

I.A. Filippov¹, V.A. Volkov², K.I. Nikishin³, E.I. Gurin⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

¹ilya_filippov_2002@inbox.ru, ²valek.volkov.2001@mail.ru,

³nkipnz@mail.ru, ⁴gurin2@yandex.ru

© Филиппов И. А., Волков В. А., Никишин К. И., Гурин Е. И., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* Low flexibility and manageability of software control of network equipment is one of the problems of modern networks. In order to solve this problem, software-defined networks (SDN) are used, the main component of which is switch with OpenFlow protocol. The purpose of the study is to model a SDN switch with OpenFlow protocol in AnyLogic, in order to obtain the transmission characteristics of SDN, experimentally evaluate these characteristics. *Materials and methods.* The article considers the simulation model of SDN switch in AnyLogic. The main components of the switch, such as flow tables, rules of packet actions on the input and output ports of switch, control processor, switch queues are briefly described. The work of the scheme with SDN switch and OpenFlow protocol is debugged. Tests are performed, data are measured, and the advantages of the presented model are described. *Results.* The research analyses the processes of traffic management and network equipment configuration using OpenFlow protocol, builds a model and identifies potential areas of application and prospects for the development of this model in SDN. The results obtained can be used for optimization of SDN operation and development of effective methods of network traffic management. *Conclusion.* The model of SDN switch with OpenFlow protocol was considered. Positive and negative aspects of the model using OpenFlow protocol in SDN were revealed, and the decision to increase the network bandwidth to improve the efficiency of the model was demonstrated.

Keywords: OpenFlow protocol, SDN, SDN architecture, AnyLogic, network automation, network partitioning principle

For citation: Filippov I.A., Volkov V.A., Nikishin K.I., Gurin E.I. Modelling of SDN switch with OpenFlow protocol in AnyLogic. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):14–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-2

Введение

В настоящее время существует большой интерес к технологиям программно-конфигурируемых сетей (ПКС), которые предоставляют возможности для гибкого управления сетевым трафиком [1]. Одной из ключевых технологий, способствующих развитию ПКС, является протокол *OpenFlow*, который используется для управления сетевой инфраструктурой.

Основная идея *OpenFlow* заключается в том, что принятие решений о передаче трафика в сети происходит централизованно в рамках контроллера, который управляет работой коммутаторов посредством управляющих сообщений. Это отличается от классического подхода, где интеллектуальные решения о маршрутизации и управлении потоками принимаются распределенно на уровне каждого отдельного коммутатора.

Применение коммутаторов *OpenFlow* в контексте современных сетевых сред приносит ряд значительных преимуществ, таких как повышение гибкости сетевой инфраструктуры, улучшение масштабируемости, оптимизация управления трафиком и более эффективное реагирование на динамические требования приложений и услуг.

Таким образом, внедрение коммутаторов с поддержкой протокола *OpenFlow* в современные сети представляет собой актуальное направление для сетевых инженеров и специалистов по управлению сетями, требующего комплексного изучения и проектирования для достижения оптимальных параметров в различных конфигурациях сетей. В связи с этим в статье рассматриваются коммутаторы с поддержкой протокола *OpenFlow* в ПКС, их основные принципы работы, преимущества и возможные области применения.

Основные компоненты коммутатора ПКС с поддержкой протокола *OpenFlow*

В ходе исследования необходимо было изучить поведение сложного телекоммуникационного оборудования и получить параметры передачи трафика. Это становится возможным благодаря только имитационному моделированию. Моделирование позволяет предсказывать поведение системы в различных условиях и оценивать потенциальные риски и возможности для улучшения работоспособности системы.

Коммутатор с поддержкой протокола *OpenFlow* представляет собой ключевой элемент ПКС, который используется для управления трафиком в сетевых устройствах [2–4]. Достоинства коммутаторов с поддержкой протокола *OpenFlow* включают гибкость и возможность централизованного управления, что позволяет администраторам эффективно контролировать сетевые ресурсы и применять политики трафика. Также благодаря открытому протоколу *OpenFlow* коммутаторы становятся совместимыми с различными устройствами и вендорами, обеспечивая свободу выбора оборудования. Важным преимуществом является возможность программного управления трафиком, что упрощает внедрение новых сервисов и изменения в сети [5–7].

Однако у коммутаторов, поддерживающих протокол *OpenFlow*, имеются и недостатки. Например, централизованное управление может привести к уязвимостям и задержкам в обработке трафика. Кроме того, для эффективной работы *OpenFlow* требуется высокий уровень навыков управления сетями и обеспечения безопасности, что может создать дополнительные сложности для администраторов.

В связи с этими особенностями необходимо было разработать модель коммутатора ПКС с поддержкой *OpenFlow* в среде *AnyLogic*. Данная среда предлагает широкий спектр возможностей для создания мультипарадигменных моделей, включая дискретно-событийное моделирование, системную динамику и агентное моделирование. *AnyLogic* также обладает интуитивно понятным интерфейсом, имеет обширную библиотеку компонентов и предоставляет возможности интеграции с различными источниками данных, что делает ее привлекательным выбором для моделирования сложных систем и процессов [8, 9].

В составе коммутатора ПКС можно выделить 4 основных узла: таблицы потоков (нахождение и сверка правил поступившего пакета), узел анализа прописанных в правилах действий по отношению к пакету на входе (сопоставление найденного правила соответствующему действию, выполнение прописанного действия), управляющий процессор (анализ поступившего пакета, обнаружение новых устройств для отправки пакета), узел анализа прописанных в правилах действий по отношению к пакету на выходе (подготовка и распределение пакетов перед отправкой) [10, 11]. Основными функциями коммутатора ПКС являются обработка, проверка и передача данных в сети (рис. 1).

Построение входных узлов коммутатора ПКС с поддержкой протокола *OpenFlow*

Работа коммутатора с поддержкой протокола *OpenFlow* исследована на основе модели ПКС сети в среде *AnyLogic*. Представленная модель показыва-

ет работу основных узлов, которые будут описываться далее, и динамику передачи пакетов от входного порта до его отправки. Рассмотрим первый узел модели, который представлен на рис. 2.

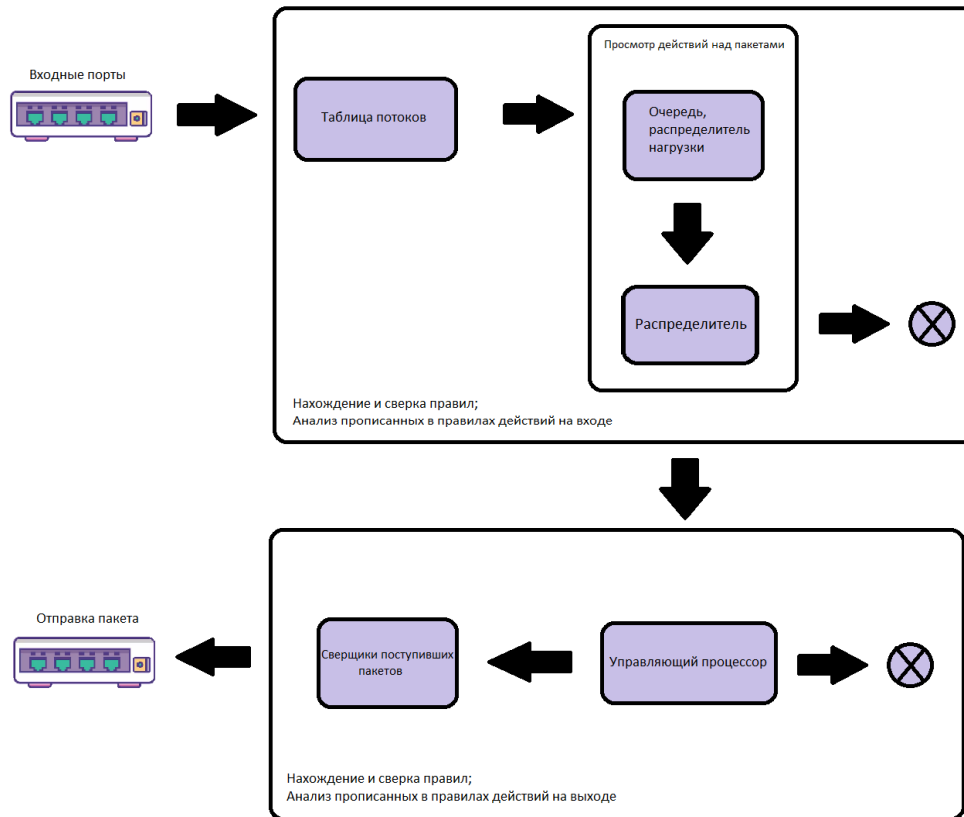


Рис. 1. Компоненты коммутатора, поддерживающего протокол *OpenFlow*

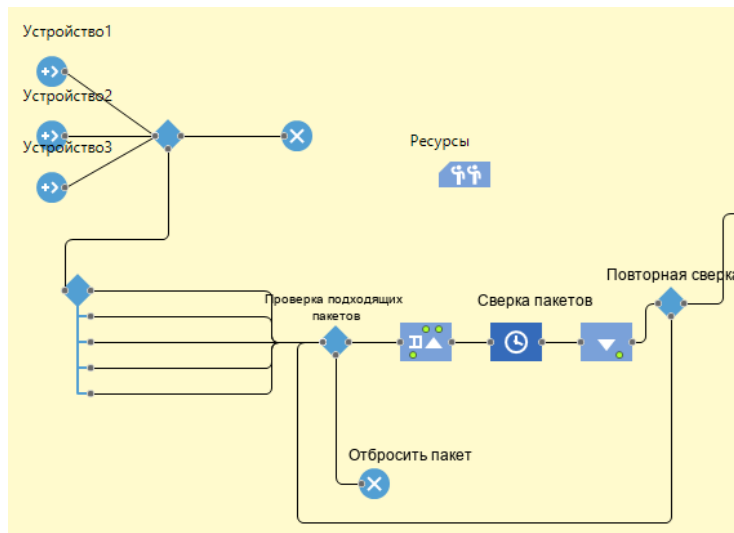


Рис. 2. Узел таблицы потоков

Когда пакет данных поступает на вход коммутатора или маршрутизатора, он проходит через правила обработки трафика. Коммутатор ищет правило, соответствующее пакету, на основе полей заголовка пакета, таких как исходный и целевой IP-адреса, порты и т.д. В начале узла стоит распределитель потока для предотвращения переполнения фрагмента сверки правил. Далее идет блок сверки правил, который состоит из узла, отбрасывающего пакеты, не подходящие под эти правила. После чего идет сверка указанных правил, и если в одном из них указано возвращение на повторную сверку, то данный пакет проходит этот этап повторно.

Далее идет узел просмотра действий над пакетом. Основной принцип данного узла заключается в следующем: если правило найдено, коммутатор применяет действия, указанные в правиле. Сам узел представлен на рис. 3. На нем представлены очередь и распределитель нагрузки, необходимые для предотвращения переполнения на участке сверки действий. Далее установлен распределитель, если в правиле считано действие передачи пакета на выход, то он проходит дальше, иначе отбрасывается.

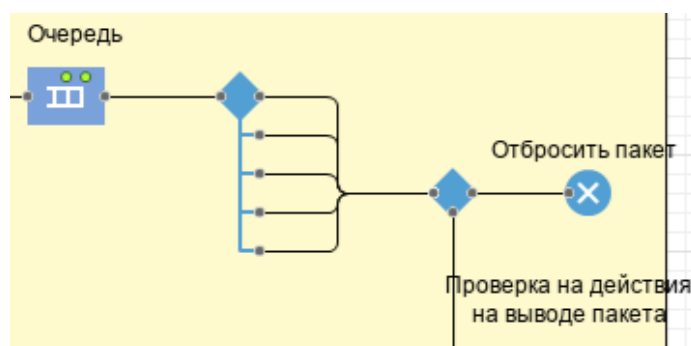


Рис. 3. Узел проверки действий над пакетами на входе коммутатора

После прохождения участка обработки на входе коммутатора пакеты проходят дальше, подготавливаясь к передаче через выходной порт, описание моделирования представлено дальше.

Построение выходных узлов коммутатора ПКС с поддержкой протокола *OpenFlow*

Пакету после прохождения предписанных действий больше нет необходимости находиться в предыдущем узле, и он перенаправляется в узел управляющего процессора. Участок данного узла представлен на рис. 4.

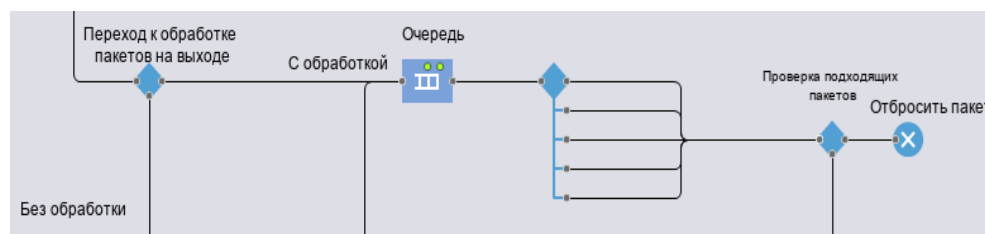


Рис. 4. Узел управляющего процессора

Когда управляющий процессор находит соответствующее правило, он выполняет определенные действия, которые установлены в правиле. Если правило для пакета отсутствует или в правиле указано отправить пакет на контроллер *OpenFlow*, такой пакет перенаправляется на централизованный контроллер, где происходит принятие решения об обработке пакета.

Сам узел, представленный на рис. 4, состоит из сверщика пакета, который определяет необходимость обработки пакета. Если в правиле пакета установлена отправка без обработки, то такой пакет передается непосредственно на отправку. Иначе пакет отправляется на дальнейшую обработку, в которой предусмотрена защита от переполнения на участке сверки с помощью очередей и распределителя нагрузки. Подходящий пакет передается в узел проверки действий над пакетами. Данный узел представлен на рис. 5.



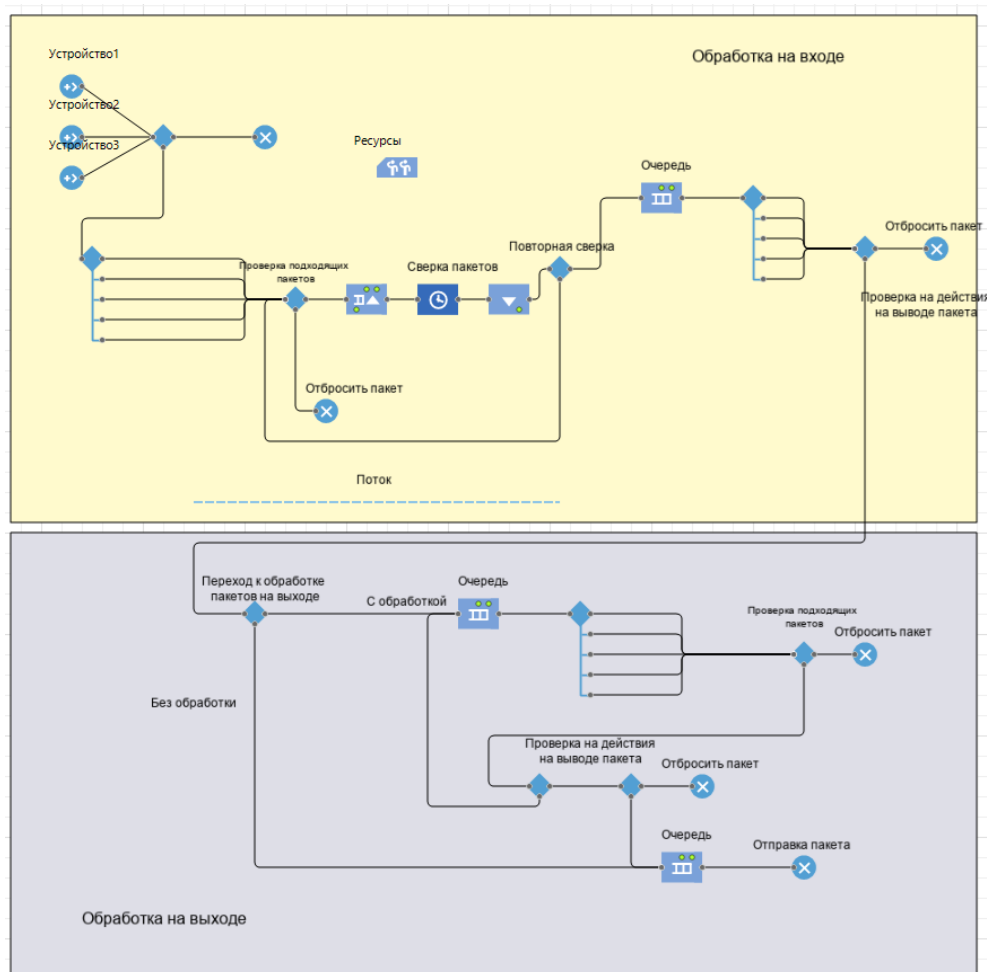
Рис. 5. Узел проверки действий над пакетами

Узел проверки действий над пакетом может определить направление передачи в выходной порт коммутатора. На рис. 5 установлены два сверщика. Первый проверяет пакет на наличие действия в правиле, в случае отсутствия действия отправляет его на повторную сверку правил. Второй сверщик проверяет конкретно действие и доводит его на отправку.

Концептуальная модель коммутатора, поддерживающего протокол *OpenFlow*, построена с целью передачи пакетов в ПКС (рис. 6). Сетевая модель, основанная на *OpenFlow* (часть архитектуры ПКС), отделяет управление от пересылки трафика. В этой модели коммутаторы выполняют инструкции, которые были заданы контроллером *OpenFlow*. Контроллер представляет централизованное управление сетью, позволяя администраторам программно определять и контролировать потоки данных, управлять пропускной способностью, изменять маршрутизацию и применять политики без необходимости вручную настраивать каждое сетевое устройство в сети.

Результаты

В процессе моделирования пакеты поступают на входные порты коммутатора. На момент тестирования было зафиксировано поступление 40 пакетов/с при пропускной способности 65 пакетов/с. Интенсивность поступления пакетов была подобрана таким образом, чтобы обеспечить умеренную плотность потока и отобразить работу всех узлов под нагрузкой. В случае необходимости увеличения количества поступающих пакетов требуется увеличить пропускную способность на узле обработки правил пакета.

Рис. 6. Модель коммутатора ПКС с поддержкой *OpenFlow*

В первом случае передавался поток данных, равный 40 пакетам/с, что соответствовало корректной работе модели. Во втором случае пропускная способность была уменьшена без изменения входящего потока, что привело к тому, что узел обработки не успевал сверять правила, вызывая переполнение. Графики обработки пакетов показаны на рис. 7, 8.

На рис. 7 показан полностью прошедший поток данных через коммутатор, не вызывающий переполнения. По графику в конце работы модели видно, что пакеты проходят своевременную обработку в течение 0,05 с не перегружая работу модели. На следующем эксперименте было показано переполнение в коммутаторе за счет уменьшения ресурсов (рис. 8).

На рис. 8 демонстрируется, что поток не успевает обрабатываться и вызывает переполнение. Путем исследования было выяснено, что решением данной проблемы является увеличение ресурсов. Также в процессе исследования видно, как идет обработка пакетов в разных узлах смоделированной схемы (рис. 9). Из рис. 9 видно, что пакеты идут через каждый узел, проходя полную обработку.



Рис. 7. График обработки пакетов в начале работы модели

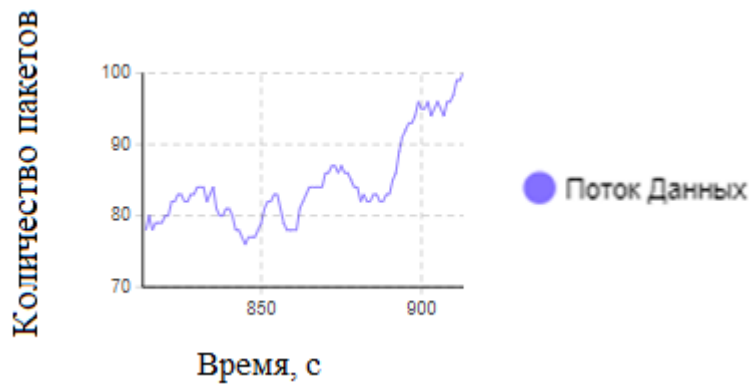


Рис. 8. График обработки пакетов в конце работы модели с переполнением

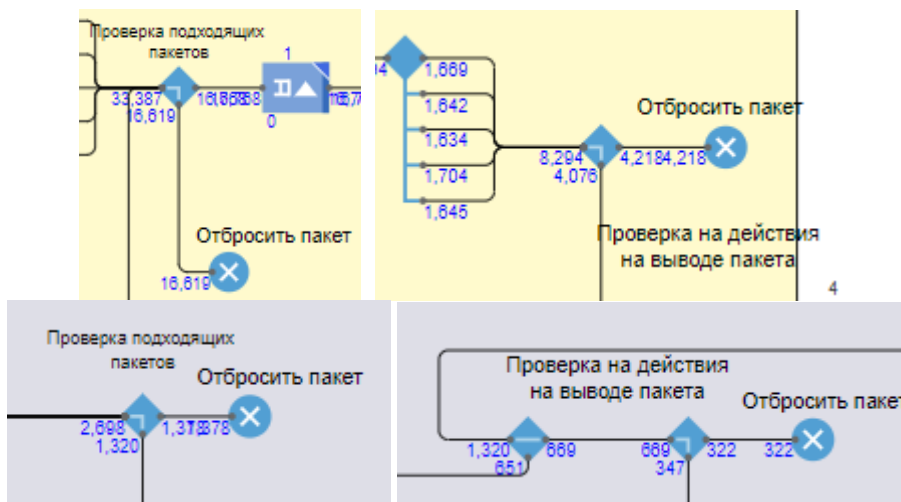


Рис. 9. Обработка пакетов

Заключение

Исследованы возможности и ограничения коммутатора с поддержкой протокола *OpenFlow* в ПКС. Представленная модель демонстрирует значи-

тельные преимущества, такие как гибкость, централизованное управление, возможность реализации политик безопасности и управления трафиком. Она показала, что сетевые администраторы могут эффективно управлять потоками данных, улучшая производительность сети и гибко настраивая ее в соответствии с требованиями приложений и бизнес-процессов.

Преимущества модели коммутатора *OpenFlow* становятся особенно ярко выраженными в средах с большим количеством виртуальных машин, облачных вычислений и технологий ПКС. Она может быть успешно использована в центральных и участвующих в пересылке узлах сети, в центрах обработки данных, дата-центрах, а также для управления трафиком в корпоративных и кампусных сетях.

На протяжении всего анализа данная модель показала, что количество тестируемых пакетов составило максимально допустимое значение, которое позволяет моделировать среда *AnyLogic*, а показатель обработанных пакетов поднялся с 35 000 до 50 000. Средняя длина пакета составляла 1,3 Кб (длина варьировалась от 1200 до 2500 байт).

Список литературы

1. Мухизи С., Шамшин Г. И., Мутханна А. С., Киричек Р. В. Исследование и разработка имитационной модели функционирования фрагмента программно-конфигурируемой сети как системы массового обслуживания // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 49–57.
2. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб. : Питер, 2010. 943 с.
3. Shalimov A., Zuikov D., Zimarina D., Pashkov V., Smeliansky R. [et al.]. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM. 2013. P. 1–6.
4. Никульчев Е. В., Паяин С. В., Плужник Е. В. Динамическое управление трафиком программно-конфигурируемых сетей в облачной инфраструктуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 54–57.
5. Никишин К. И. Моделирование и верификация топологий программно-конфигурируемых сетей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 67–74.
6. Антонова В. М., Бужин И. Г., Гайфутдинов Э. А., Гнездилов В. С., Кузнецов Н. А., Миронов Ю. Б. Система управления трафиком в перспективных мобильных сетях на основе технологий SDN/NFV // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 1. С. 113–125.
7. Buzhin I. G., Antonova V. M., Gaifutdinov E. A., Mironov Yu. B. Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies // T-Comm. 2022. Vol. 16, № 12. P. 40–45.
8. Никишин К. И. Метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в программно-конфигурируемых сетях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 2. С. 142–158.
9. Jensen K., Kristensen L. M. Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin : Springer, 2009. 384 p.
10. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. [et al.]. Openflow: enabling innovation in campus networks // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Vol. 38, № 2. P. 69–74.
11. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments // Computer Networks. 2014. Vol. 61. P. 151–175.

References

1. Mukhizi S., Shamshin G.I., Mutkhanna A.S., Kirichek R.V. Research and development of a simulation model of the functioning of a fragment of a software-defined network as a queuing system. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information technology and telecommunications*. 2016;4(4):49–57. (In Russ.)
2. Olifer V.G., Olifer N.A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly. 4-e izd. = Computer networks. Principles, technologies, protocols. The 4th edition*. Saint Petersburg: Piter, 2010:943. (In Russ.)
3. Shalimov A., Zuikov D., Zimarina D., Pashkov V., Smeliansky R. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers. *Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM*. 2013:1–6.
4. Nikul'chev E.V., Payain S.V., Pluzhnik E.V. Dynamic traffic management of software-defined networks in cloud infrastructure. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*. 2013;(3):54–57. (In Russ.)
5. Nikishin K.I. Modeling and verification of software-defined network topology. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*. 2022;(80):67–74. (In Russ.)
6. Antonova V.M., Buzhin I.G., Gayfutdinov E.A., Gnezdilov V.S., Kuznetsov N.A., Mironov Yu.B. Traffic management system in advanced mobile networks based on technologies of SDN/NFV. *Informatsionnye protsessy = Information processes*. 2023;23(1):113–125. (In Russ.)
7. Buzhin I.G., Antonova V.M., Gaifutdinov E.A., Mironov Yu.B. Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies. *T-Comm*. 2022;16(12):40–45. (In Russ.)
8. Nikishin K.I. Method for early diagnostics of real-time traffic losses with timeout monitoring in software-defined networks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the South-West State University*. 2022;26(2):142–158. (In Russ.)
9. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets. *Modelling and Validation of Concurrent Systems*. Berlin: Springer, 2009:384.
10. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008;38(2):69–74.
11. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments. *Computer Networks*. 2014;61:151–175.

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Александрович Филиппов

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ilya_filippov_2002@inbox.ru

Илья А. Филиппов

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Валентин Алексеевич Волков

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: valek.volkov.2001@mail.ru

Valentin A. Volkov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Игоревич Никишин

кандидат технических наук, доцент
кафедры вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: nkipnz@mail.ru

Kirill I. Nikishin

Candidate of engineering sciences, associate
professor of the sub-department of computer
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Евгений Иванович Гурин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительной
техники, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: gurin2@yandex.ru

Evgeny I. Gurin

Doctor of engineering sciences,
professor, professor of the sub-department
of computer engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.03.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.04.2024

Принята к публикации / Accepted 11.05.2024

УДК 519.24; 53; 57.017

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-3

**Бионика: оценка числа кодовых состояний
обмена данными в структуре микропотребляющих,
высокоразмерных, природоподобных нейровычислителей**

**А. И. Иванов¹, Е. А. Малыгина²,
Ю. И. Серикова³, А. И. Ермакова⁴, С. А. Гужова⁵**

¹Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

^{4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ivan@pniei.penza.ru, ²malygina@mirea.ru, ³julia-ska@yandex.ru,

⁴aermakova27061992@mail.ru, ⁵1996svetlanaserikova@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время возрос интерес разработчиков к нейроморфным вычислениям и построению искусственных нейронов, хотя бы частично повторяющим работу естественных нейронов простейших живых организмов. Целями работы являются оценка ранее полученных данных и исследование легко наблюдаемых характеристик микропотребляющих, высокоразмерных, природоподобных нейровычислителей с их последующей упрощенной проекцией в структуру искусственных нейронов. *Материалы и методы.* Использованы методы континуально-дискретной обработки информации естественными и искусственными нейронами с применением нейросетевых аналогов статистических критериев, а также реальных данных, полученных при исследовании нейросетевой активности живых существ с середины прошлого века по настоящее время. В процессе анализа информации особое внимание уделено передаче данных между естественными нейронами по длинным аксонам. Предложено рассматривать естественные нейроны как некоторое подобие импульсного модема, выполняющего кодирование передаваемых по аксону данных другим естественным нейронам в Q-арной системе нейроисчисления. *Результаты и выводы.* Выявлено, что во всех зафиксированных ранее пачках импульсов в аксонах естественных нейронов максимальное число импульсов существенно больше двух. Это интерпретируется как отсутствие у живых организмов бинарных естественных нейронов. Такой тезис подтверждается численным моделированием бинарных и троичных искусственных нейронов. Бинарные искусственные нейроны намного хуже троичных искусственных нейронов по обогащению информации при ее добыче и при увеличении энтропии при нейросетевой защите знаний. Предложено приближенно оценивать Q-арность используемой системы нейроисчисления по максимальному числу импульсов, содержащихся в передаваемой пачке данных конкретных как естественных, так и искусственных нейронов.

Ключевые слова: импульсные модемы передачи данных, максимум импульсов в пачке-отклике естественных нейронов, оценка эквивалентного числа стабильных состояний многоуровневых выходных квантователей искусственных нейронов

Для цитирования: Иванов А. И., Малыгина Е. А., Серикова Ю. И., Ермакова А. И., Гужова С. А. Бионика: оценка числа кодовых состояний обмена данными в структуре микропотребляющих, высокоразмерных, природоподобных нейровычислителей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 25–36. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-3

Bionics: estimation the number of code states of data exchange in the structure of microconsuming, high-dimensional, nature-like neurocomputers

A.I. Ivanov¹, E.A. Malygina², Yu.I. Serikova³, A.I. Ermakova⁴, S.A. Guzhova⁵

¹Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

²MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia

³Research and Production Enterprise “Rubin”, Penza, Russia

^{4,5}Penza State University, Penza, Russia

¹ivan@pniei.penza.ru, ²malygina@mirea.ru, ³julia-ska@yandex.ru,

⁴aermakova27061992@mail.ru, ⁵1996svetlanaserikova@gmail.com

Abstract. *Background.* At present, the interest of developers in neuromorphic calculations and the construction of artificial neurons that at least partially repeat the work of natural neurons of the simplest living organisms has increased. The objectives of the article are to evaluate the previously obtained data and to study the easily observable characteristics of microconsuming, high-dimensional, nature-like neurocomputers with their subsequent simplified projection into the structure of artificial neurons. *Materials and methods.* Methods of continuous-discrete information processing by natural and artificial neurons are used using neural network analogues of statistical criteria, as well as real data obtained in the study of neural network activity of living beings from the middle of the last century to the present. In the process of information processing analysis, special attention is paid to the transfer of data between natural neurons along long axons. It is proposed to consider natural neurons as a kind of impulse modem that encodes data transmitted via the axon to other natural neurons in the Q-ar system of neurocalculus. *Results and conclusions.* It was obtained that in all the previously recorded bursts of impulses in the axons of natural neurons, the maximum number of impulses is significantly greater than two. This is interpreted as the absence of binary natural neurons in living organisms. This thesis is supported by numerical simulations of binary and ternary artificial neurons. Binary artificial neurons are much worse than ternary artificial neurons in terms of information enrichment during its extraction and with an increase in entropy with neural network protection of knowledge. It is proposed to approximate the Q-arity of the neuron number system used by the maximum number of impulses contained in the transmitted data pack of specific neurons, both natural and artificial neurons.

Keywords: pulsed modems of data transmission, maximum pulses in the response packet of natural neurons, estimation of the equivalent number of stable states of multilevel output quantizers of artificial neurons

For citation: Ivanov A.I., Malygina E.A., Serikova Yu.I., Ermakova A.I., Guzhova S.A. Bionics: estimation the number of code states of data exchange in the structure of microconsuming, high-dimensional, nature-like neurocomputers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):25–36. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-3

Общие положения функционирования живых и искусственных нейросетевых вычислителей

Ламповые ЭВМ и нейросетевые вычислительные конструкции начали развиваться в середине прошлого века во время Второй мировой войны. Так, в 1943 г. с США Массачусетский технологический университет начал работы по созданию ламповых ЭВМ. В этом же году была опубликована первая работа по нейросетевым вычислениям Мак-Каллока и Питтса [1]. При практически одновременном старте создания двух разных ветвей вычислителей се-

годня мы наблюдаем доминирование дискретных логических компьютеров над аналого-дискретными нейровычислителями.

В прошлом веке развитие ламповых ЭВМ привело к появлению транзисторных реализаций компьютеров, что сказалось на существенном снижении потребления энергии и повышении быстродействия. Переход к использованию микросхем низкого уровня интеграции также привел к снижению потребления по энергии с параллельным ростом быстродействия вычислений.

Переход к процессорам высокой степени интеграции привел к значительному росту корзины с браком. Чем выше степень интеграции, тем выше вероятность того, что часть транзисторов логических элементов попадет на дефекты кристаллов кремния. Снизить брак удастся через переход к созданию внутри процессора множества однотипных вычислительных ядер. Если ядер больше, чем заявлено производителем, то ядра с дефектами могут быть отключены после тестирования. Это позволяет снизить объем корзины с браком.

Маркетологи рынка вычислительной техники в конце прошлого века активно продвигали многоядерные процессоры как перспективу существенного ускорения вычислений за счет их распараллеливания. Однако типовая архитектура процессоров с общей шиной передачи и получения данных оказалась узким звеном многоядерного распараллеливания вычислений.

Еще одной проблемой логико-цифровых современных процессоров является их неспособность решать задачи высокой и сверхвысокой размерности при приемлемых затратах энергии и времени.

В этом отношении живые организмы, обладающие вычислителями на естественных нейронах, оказываются гораздо более эффективными [2, 3]. В частности, люди способны решать 10000-мерные задачи в реальном времени. В математике это соответствует записи $f(x_1, x_2, \dots, x_{10000})$ [4]. Если при записи отказаться от многоточия, то полное перечисление всех переменных займет примерно пять страниц текста. При этом решение принимается естественными нейронами при их крайне экономичном потреблении энергии на уровне порядка 40 Вт.

Одной из значительных проблем работы естественных нейронов является то, что их линии передачи данных (аксоны) являются «плохими» длинными линиями.

Обычные медные провода с хорошей изоляцией способны передавать импульсы со скоростью, близкой к скорости света. Аксоны естественных нейронов имеют длину от 10 до 1000 раз больше длины основного тела. Плохая электроизоляция длинных линий-аксонов от окружающей их среды приводит к тому, что скорость передачи данных по ним близка к скорости звука в воде.

Физиологи давно наблюдают импульсы тока в аксонах естественных нейронов [5]. Первые электрограммы импульсов получены физиологами в 30-х гг. прошлого века. На сегодня в специализированной литературе зафиксированы несколько тысяч изображений пачек электроимпульсов, передаваемых от одного нейрона к другим нейронам по его аксону.

Следует отметить, что естественный нейрон можно рассматривать как некоторый модем, ориентированный на формирование пачки импульсов по аксону, как это отображено на рис. 1. Такая достаточно очевидная интерпре-

тация работы естественного нейрона не противоречит гипотезе Мак-Каллока – Питтса 1943 г. [1].

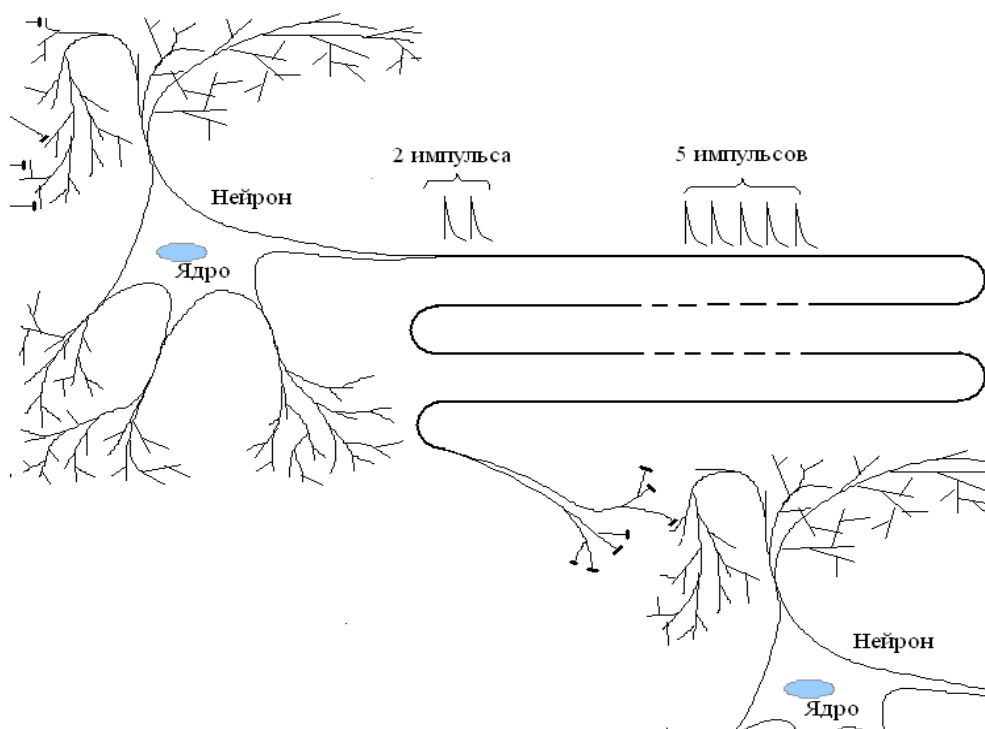


Рис. 1. Естественный нейрон одновременно является и вычислителем, и «модемом» передачи данных по длинной линии – аксону (импульсы – это вынужденный прием, являющийся следствием отсутствия «батареек» внутри «нейромодема»)

Обычный компьютер вполне может быть бинарным, если его выходной модем способен воспроизводить достаточно сложный протокол передачи данных. Однако это относится только к обычным компьютерам, по отношению к искусственным нейронам это далеко не так.

На рис. 2 условно отображена ситуация применения естественных и/или искусственных нейронов с многоуровневыми выходными квантователями [6, 7]. Искусственный нейрон в этом случае представлен обогатителем относительно бедных входных данных. Выходной квантователь искусственного нейрона может быть бинарным (как того требует гипотеза Мак-Каллока – Питтса 1943 г.), однако вполне может быть использован и более сложный многоуровневый квантователь [6, 7].

Искусственный нейрон с многоуровневым выходным квантователем формально можно рассматривать как некоторую «математическую» молекулу [8, 9]. Входными данными для такой «математической» конструкции являются континуумы, так же как для естественной молекулы водорода является окружающая ее температура среды. Откликами молекулы водорода являются дискретные кванты света. При скачках электронов водорода с орбиталей низкого уровня на орбитали высокого уровня могут появляться кванты света примерно 32 разных частот.

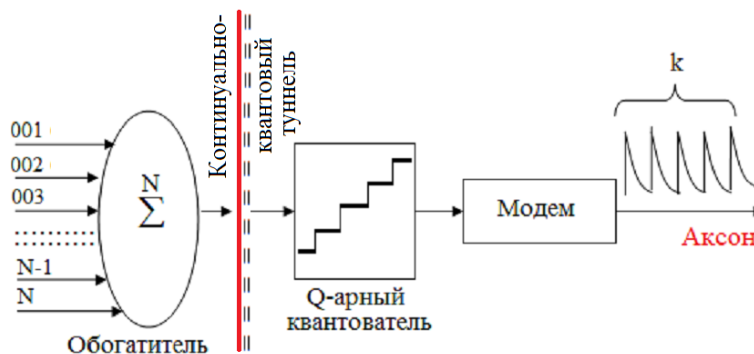


Рис. 2. Представление естественных нейронов в виде программной реализации нейромолекулы, воспроизводящей эффект континуально-квантового перехода на микроуровне

Формально континуально-дискретный переход, формируемый искусственным нейроном, вполне может быть настроен (обучен) воспроизводить отклики некоторой реальной молекулы какого-то реального вещества. Однако подобная задача сегодня неактуальна, более актуальными являются иные задачи. Для описания реальных молекул могут использоваться уравнения Шредингера, и нет смысла их дополнительно дублировать сложно формализуемыми конструкциями нейросетевой математики.

Совершенно иная ситуация возникает при статистическом анализе малых выборок в контексте проверки гипотезы нормальности и/или гипотезы равномерности [8, 9]. Малые выборки в 16 опытов не дают решений с достаточно высокой доверительной вероятностью при использовании одного из многих известных статистических критериев.

Однако положение меняется, если каждому из статистических критериев построить эквивалентный ему искусственный нейрон и объединить их в одну нейросеть [8, 9]. В первом приближении сеть из 20 искусственных нейронов (нейросетевое объединение 20 разных статистических критериев) позволяет увеличить эквивалентную анализируемую выборку примерно на 20 примеров (рост выборки с 16 опытов до 36 опытов). Хи-квадрат и иные классические статистические критерии хорошо работают при выборках примерно в 160 опытов. То есть для получения применимых на практике статистических оценок, ориентированных на малые выборки, необходимо иметь примерно 140 разных статистических критериев, преобразованных в форму искусственных нейронов. Именно по этой причине в начале XXI в. возродился интерес к синтезу новых статистических критериев и их нейросетевых аналогов [9].

Эффект замены бинарных квантователей искусственных нейронов на троичные выходные квантователи

Основной задачей искусственного интеллекта, ориентированного на добычу знаний, является обогащение относительно бедной входной информации, которая способна снижать энтропию данных в той или иной прикладной задаче. Возможна иная постановка задачи, построенная на нейросетевой защите знаний, зашитых в структуру и параметры обученной нейросети.

В этом случае нейросеть должна увеличивать энтропию выходных откликов при предъявлении образа «Чужой» и практически полностью устранять энтропию при предъявлении образа «Свой». В этом случае нейросеть выполняет функцию шифрования при защите знаний. При распознавании образа «Свой» она выполняет функцию расшифровывания знаний, практически полностью устраняя энтропию.

Рассмотрим подробнее простейшую сеть бинарных нейронов, обобщающую несколько разных статистических критериев [8, 9]. Структура такой сети, ориентированной на анализ малых выборок в 16 опытов, приведена в левой части рис. 3.

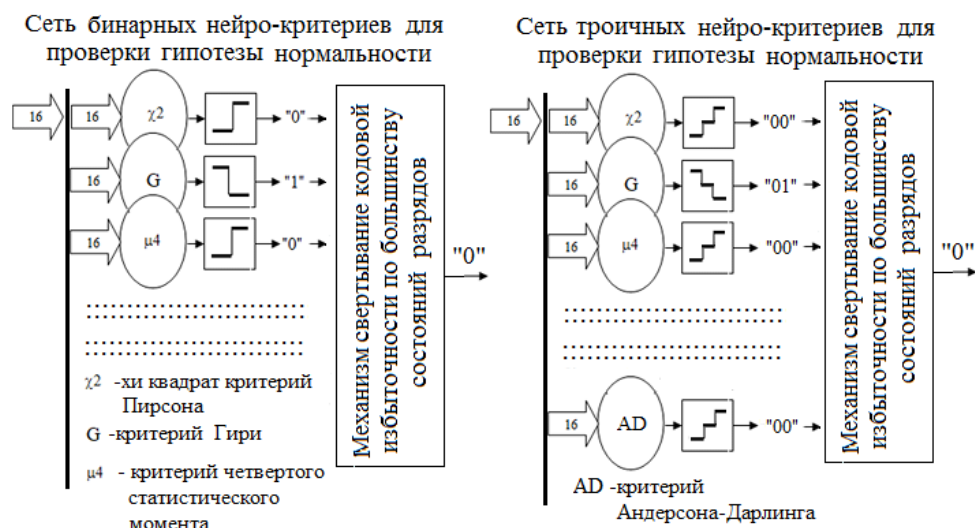


Рис. 3. Сеть бинарных нейронов и сеть троичных нейронов с существенно большей кодовой избыточностью

В случае обобщения нескольких статистических критериев сетью бинарных нейронов всегда возникает кодовая избыточность.

Последующей обработкой необходимо свернуть кодовую избыточность, например, подсчетом числа состояний «0» в выходном коде нейронной сети. Если разрядов с состоянием «0» больше, чем с состоянием «1», механизм свертывания должен выдавать состояние «0». Это один из самых простых и понятных алгоритмов свертывания кодовой избыточности через «голосования» состояний.

При таком свертывании кодовой избыточности происходит обнаружение и устранение ошибочных откликов некоторых нейрокритериев. Из теории известно, что подобные самокорректирующиеся коды имеют монотонно растущую корректирующую способность по мере роста входной кодовой избыточности.

В этом контексте очевидным является преимущество сетей троичных искусственных нейронов перед аналогичными сетями бинарных искусственных нейронов. В правой части рис. 3 представлена сеть троичных искусственных нейронов, каждый из которых является аналогом какого-то из классических статистических критериев [8, 9].

Очевидно, что замена бинарных выходных квантователей у каждого из искусственных нейронов на троичный выходной квантователь приводит к двукратному росту кодовой избыточности. Нейросеть из бинарных нейронов всегда хуже обнаруживает и исправляет собственные кодовые ошибки по сравнению с такой же нейросетью, чьи нейроны имеют троичные квантователи. Это логическое утверждение хорошо подтверждается численными экспериментами [10–13].

Описанная выше ситуация складывается при нейросетевой добыче дополнительной информации из малых выборок реальных данных. Совершенно такая же ситуация складывается для средств нейросетевой защиты персональных биометрических данных. При исследовании бинарных сетей искусственных нейронов, обученных по ГОСТ Р 52633.5–2011, всегда наблюдается симметрия двух минимальных значений энтропии выходных кодов. Первый минимум энтропии полезен и обеспечивает стабильные отклики на примеры образов «Свой». Второй минимум энтропии вреден, так как позволяет сократить пространство перебора выходных кодовых состояний [14].

Если же мы заменяем бинарные квантователи нейронов на троичные, то симметрия двух провалов энтропии выходных кодов рушится [15, 16]. Последнее весьма и весьма выгодно, так как приводит к более чем двукратному росту эквивалентного криптографического ключа с независимыми разрядами.

Формальное обоснование этого эффекта дано в конце прошлого века нашим соотечественником А. Ю. Хренниковым [17]. Видимо, подобный эффект роста энтропии при нейросетевой защите знаний и роста уровня добываемой информации по Хренникову должен наблюдаться для p -арных квантователей с числом устойчивых состояний, равным простому числу $p = \{2, 3, 5, 7, 11, 17, 23, \dots\}$.

При этом выходные квантователи искусственных нейронов всегда будут обеспечивать монотонный рост энтропии при всех значениях модулей коэффициентов корреляционной сцепленности разрядов выходных кодов нейросети [18] при одинаковых входных функционалах накопления (обогащения) входных данных:

$$E_2(r) < E_3(r) < E_5(r) < E_7(r) < \dots < E_p(r) < \dots, \quad (1)$$

для всех нейронных сетей, выполняющих функцию защиты, размещенных в них знаний.

Предположительно, для всех нейросетевых преобразователей, выполняющих функцию извлечения информации, справедливо аналогичное утверждение:

$$I_2(r) < I_3(r) < I_5(r) < I_7(r) < \dots < I_p(r) < \dots \quad (2)$$

Чем выше порядок p -арности выходных квантователей искусственных нейронов, тем больший объем информации $I_p(r)$ они способны извлекать при добыче знаний и тем лучше защищать данные, скрывая их большим уровнем энтропии $E_p(r)$.

Для нас принципиально важно, что как для естественных нейронов, так и для искусственных нейронов выгодно стремиться к использованию p -арных выходных квантователей с как можно более высоким простым числом p .

**Оценка числа состояний многоуровневого квантователя
естественных и искусственных нейроморфных вычислителей
по ранее полученным физиологами данным**

Одним из важнейших следствий соотношений (1) и (2) является то, что бинарные квантователи ($p = 2$) являются наихудшими и, видимо, редко встречаются в природе. Этот тезис легко подтвердить, анализируя уже опубликованные физиологами данные. Так, в работе [19] 1955 г. ее авторы получили данные о импульсах электроактивности нейронов, контролирующих напряжение мышцы пиявки в разных условиях ее работы. Данные приведены на рис. 4.

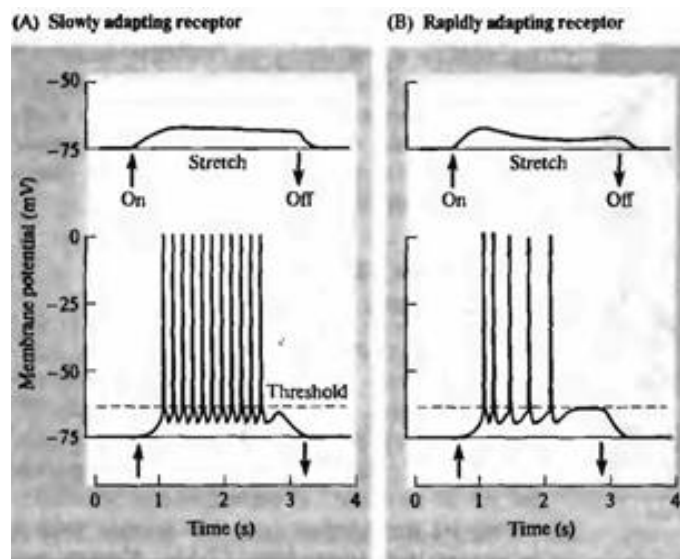


Рис. 4. Ответ нейронов рецептора контроля растяжения живой мышцы пиявки при разных условиях ее работы

Из этих данных следует, что выходной квантователь нейронов рецептора должен иметь не менее 11 уровней ($q \geq 11$).

При этом физиологи, выполнившие в 1955 г. исследования [19], не ставили перед собой целью оценку показателя p -арности, использованного природой нейроквантователя.

Аналогичные результаты получены в 1979 г. физиологами при анализе активности сетчатки глаза обезьяны [20]. Их данные приведены на рис. 5.

Из данных рис. 5 следует, что яркое пятно света на сетчатке глаза обезьяны приводит к ее отклику в форме пачки из 22 импульсов ($q \geq 22$). Снижение яркости пятна света, возбуждающего сетчатку глаза, приводит к снижению числа импульсов в отклике естественных нейронов.

Анализ данных физиологов, полученных с 30-х гг. прошлого века до его окончания [5], не подтвердил гипотезу 1943 г. Мак-Каллока – Питтса об использовании природой бинарных естественных нейронов. Видимо, это связано с тем, что бинарные естественные нейроны намного хуже более сложных и более эффективных естественных нейронов с многоуровневыми квантователями.

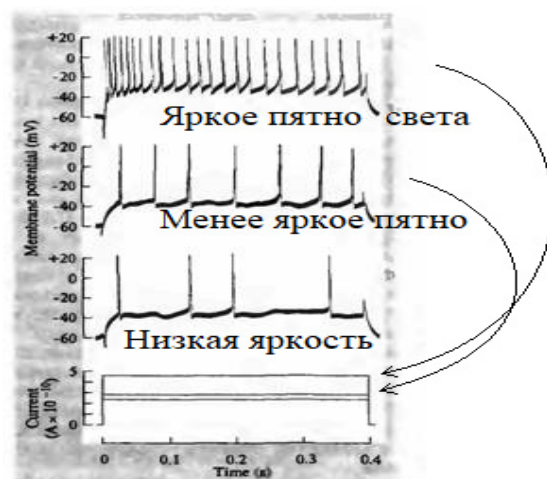


Рис. 5. Отклик ганглиозной клетки сетчатки глаза обезьяны на короткие импульсы света разной яркости

В силу того, что в настоящее время значительное внимание уделяется нейроморфным вычислениям с микропотреблением энергии [2, 3], разработчикам природоподобных вычислителей следует ориентироваться на применение p -арных квантователей с числом уровней квантования от 11 до 23.

По крайней мере, такой уровень сложности квантователей уже обнаружен физиологами у естественных нейронов живых существ.

Список литературы

1. McCulloch W. S., Walter P. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. Vol. 5. P. 115–133.
2. Сандомирская Ю. Искусственный интеллект и нейроморфные вычисления: второе дыхание // Коммерсантъ наука. 2021. № 47. С. 26–29.
3. Иванов А. И. Микропотребление нейроморфных вычислителей: почему это возможно и технически целесообразно? // Системы безопасности. 2023. № 6. С. 126–130.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М. : Вильямс, 2006. С. 1104.
5. Николлс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. От нейрона к мозгу / пер. с англ. П. М. Балабана, А. В. Галкина, Р. А. Гиниатуллина, Р. Н. Хазипова, Л. С. Хируга. М. : Едиториал УРСС, 2003. 672 с.
6. Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Малыгина Е. А. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 88–99.
7. Малыгина Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 114 с.
8. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
9. Иванов А. И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 160 с.
10. Иванов А. И., Иванов А. П., Макарычев П. П., Безяев А. В., Савинов К. Н. Рост корректирующей способности нейросетевых конструкций с избыточностью за счет замены в них бинарных нейронов на троичные нейроны // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 27–36.

11. Иванов А. И., Савин К. Н., Еременко Р. В. Эффект перехода от применения бинарных искусственных нейронов к троичным нейронам при совместном использовании пяти классических статистических критериев проверки гипотез нормальности или равномерности распределений малых выборок // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2022. № 3 (58). С. 59–67. doi: 10.17072/1993-0550-2022-3-59-67
12. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П., Еременко Р. В., Савинов К. Н. Номограммы для сравнения корректирующих способностей бинарных и троичных нейронов, используемых при многокритериальной проверке гипотезы независимости данных малых выборок // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 5–16.
13. Иванов А. И., Иванов А. П., Савинов К. Н., Еременко Р. В. Виртуальное усиление эффекта распараллеливания вычислений при переходе от бинарных нейронов к использованию Q-арных искусственных нейронов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 89–97.
14. Волчихин В. И., Иванов А. И., Щербаков М. А. Использование программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции для ускорения решения задачи направленного перебора биометрических данных при извлечении из нейросети знаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 15–21.
15. Технический отчет для ТК 164. «Защищенные приложения искусственного интеллекта: модификация алгоритма автоматического обучения бинарных персептронов по ГОСТ Р 52633.5-2011 под троичные искусственные нейроны». Пенза : Пензенский государственный университет, 2023. Инв. № 1/16-23 от 06.07.2023.
16. Иванов А. И., Малыгина Е. А., Савинов К. Н., Папуша Н. А., Кирич А. С. Использование сети бинарных персептронов в живой природе // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 334.
17. Хренников А. Ю. Моделирование процессов мышления в р-адических системах координат. М. : Физматлит, 2004. 296 с.
18. Иванов А. И. Малые выборки, нейроморфные вычисления: быстрые алгоритмы оценки энтропии Шеннона – Пирсона квадратичной сложности : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 32 с.
19. Eyzaguirre C., Kuffler S. W. Processes of excitation in the dendrites and in the soma of single isolated sensory nerve cells of the lobster and crayfish // Journal of General Physiology. 1955. Vol. 39 (1). P. 87–119.
20. Baylor D. A., Fettiplace R. Synaptic drive and impulse generation in ganglion cells of turtle retina // Journal of Physiology. 1979. Vol. 288. P. 107–127.

References

1. McCulloch W.S., Walter P. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943;5:115–133.
2. Sandomirskaya Yu. Artificial intelligence and neuromorphic computing: a second wind. *Kommersant" nauka = Kommersant science*. 2021;(47):26–29. (In Russ.)
3. Ivanov A.I. Micro-consumption of neuromorphic computers: why is it possible and technically feasible? *Sistemy bezopasnosti = Security systems*. 2023;(6):126–130. (In Russ.)
4. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs = Neural networks: a complete course*. Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
5. Nikolls D., Martin R., Vallas B., Fuks P. *Ot neyrona k mozgu = From neuron to brain*. Transl. from Eng. by P.M. Balaban, A.V. Galkin, R.A. Giniatullin, R.N. Khazipov, L.S. Khirug. Moscow: Editorial URSS, 2003:672. (In Russ.)
6. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Malygina E.A. Perspectives of using artificial neural networks with multilayer quantizer in technology of biometric-neural network authentication. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region*.

- Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2013;(4):88–99. (In Russ.)
7. Malygina E.A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadratichnykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem biometricheskikh dannykh: preprint = Biometric neuron authentication: prospects for the implementation of a set of quadratic neurons with multi-level quantization of biometric data: preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:114. (In Russ.)
 8. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in the MathCAD language): Preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
 9. Ivanov A.I. *Neyrosetevoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok: spravochnik = Neural network multicriteria statistical analysis of small samples: handbook.* Penza: Izd-vo PGU, 2022:160. (In Russ.)
 10. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Makarychev P.P., Bezyaev A.V., Savinov K.N. The growth of the corrective ability of neural network structures with redundancy due to the replacement of binary neurons in them with ternary neurons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(3):27–36. (In Russ.)
 11. Ivanov A.I., Savinov K.N., Eremenko R.V. The effect of transition from the use of binary neural networks to ternary neurons with the combined use of five classical statistical criteria to prove the hypothesis of normality or uniformity of distribution of small samples. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2022;(3):59–67. (In Russ.). doi: 10.17072/1993-0550-2022-3-59-67
 12. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P., Eremenko R.V., Savinov K.N. Nomograms for comparing the corrective abilities of binary and ternary neurons used in multicriteria testing of the hypothesis of small sample data independence. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(4):5–16. (In Russ.)
 13. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Savinov K.N., Eremenko R.V. Virtual enhancement of the effect of parallelization of computations when moving from binary neurons to the use of Q-ary artificial neurons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):89–97. (In Russ.)
 14. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Shcherbakov M.A. Using software support for quantum superposition effects to speed up the solution of the problem of directed biometric data transfer when extracting neural information. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):15–21. (In Russ.)
 15. *Technical report for TK 164. "Removed applications of artificial intelligence: modification of the algorithm for automatic learning of binary perceptrons according to GOST R 52633.5-2011 for ternary artificial neurons".* Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy universitet, 2023;Inv. №1/16-23 from 06.07.2023. (In Russ.)
 16. Ivanov A.I., Malygina E.A., Savinov K.N., Papusha N.A., Kirin A.S. Using binary perceptron networks in living nature. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of International Symposium Reliability and Quality.* 2024;1:334. (In Russ.)
 17. Khrennikov A.Yu. *Modelirovanie protsessov myshleniya v p-adicheskikh sistemakh koordinat = Modeling of thinking processes in spatial coordinate systems.* Moscow: Fizmatlit, 2004:296. (In Russ.)
 18. Ivanov A.I. *Malye vyborki, neyromorfnye vychisleniya: bystrye algoritmy otsenki entropii Shennona – Pirsona kvadratichnoy slozhnosti: spravochnik = Small samples, neuromorphic computing: fast algorithms for estimating Shannon-Pearson entropy with quadratic complexity: handbook.* Penza: Izd-vo PGU, 2023:32. (In Russ.)

19. Eyzaguirre C., Kuffler S.W. Processes of excitation in the dendrites and in the soma of single isolated sensory nerve cells of the lobster and crayfish. *Journal of General Physiology*. 1955;39(1):87–119.
20. Baylor D.A., Fettiplace R. Synaptic drive and impulse generation in ganglion cells of turtle retina. *Journal of Physiology*. 1979;288:107–127.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, professor,
scientific adviser, Penza Scientific
Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Елена Александровна Малыгина

доктор технических наук, доцент
кафедры информационных технологий
в государственном управлении,
МИРЭА – Российский технологический
университет (Россия, г. Москва,
пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: malygina@mirea.ru

Elena A. Malygina

Doctor of engineering sciences, associate
professor of the sub-department
of information technologies in public
administration, MIREA – Russian
Technological University (78 Vernadskogo
avenue, Moscow, Russia)

Юлия Игоревна Серикова

кандидат технических наук, инженер-
программист, Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия, г. Пенза,
ул. Байдукова, 2)

E-mail: julia-ska@yandex.ru

Yuliya I. Serikova

Candidate of engineering sciences,
software engineer, Research and Production
Enterprise “Rubin” (2 Baydukova street,
Penza, Russia)

Анна Игоревна Ермакова

преподаватель кафедры радио-
и спутниковой связи Военного
учебного центра, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aermakova27061992@mail.ru

Anna I. Ermakova

Lecturer of the sub-department of
radio and satellite communications,
Military Training Center, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Светлана Андреевна Гужова

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: 1996svetlanaserikova@gmail.com

Svetlana A. Guzhova

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.06.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.07.2024

Принята к публикации / Accepted 30.08.2024

УДК 519.24; 53; 57.017
doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-4

Нейросетевой анализ малых выборок с использованием большого числа статистических критериев для проверки последовательности гипотез о значении математических ожиданий коэффициентов корреляции

А. И. Иванов¹, А. И. Годунов², Е. А. Малыгина³, Н. А. Папуша⁴, А. И. Ермакова⁵

¹Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

^{2,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹ivan@pnici.penza.ru, ²avitep@pnici.penza.ru, ³malygina@mirea.ru,

⁴vus@pnzgu.ru, ⁵aermakova27061992@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является повышение точности нейросетевых оценок коэффициентов корреляции. *Материалы и методы.* Коэффициент корреляции является одним из наиболее значимых статистических моментов второго порядка. При обучении сетей квадратичных нейронов на малых выборках необходимо многократно снижать вероятности ошибок первого и второго рода, классических статистических критериев. Ранее было показано, что представление различных статистических критериев искусственными нейронами приводит к появлению некоторого эквивалента сверточных нейронных сетей, повышающих точность оценки коэффициентов корреляции. *Результаты.* Сети повышают точность оценок коэффициентов корреляции при проверке последовательности разных статистических гипотез вторым слоем, устраняющим кодовую избыточность большого числа нейронов первого слоя. Число проверяемых гипотез должно совпадать с числом выходных состояний сверточных искусственных нейронов. *Выводы.* В работе рассмотрены искусственные сверточные нейроны с выходными квантователями, имеющими восемь порогов квантования с математическими ожиданиями $E(r) \approx \{0,0; \pm 0,3; \pm 0,5; \pm 0,7; \pm 0,9\}$ коэффициентов корреляции.

Ключевые слова: коэффициенты корреляции, малые выборки, статистические критерии проверки гипотезы независимости, искусственные нейроны, повышение точности оценок за счет устранения кодовой избыточности

Для цитирования: Иванов А. И., Годунов А. И., Малыгина Е. А., Папуша Н. А., Ермакова А. И. Нейросетевой анализ малых выборок с использованием большого числа статистических критериев для проверки последовательности гипотез о значении математических ожиданий коэффициентов корреляции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 37–46. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-4

Neural network analysis of small samples using a large number of statistical criteria to test the sequence of hypotheses about the value of mathematical expectations of correlation coefficients

A.I. Ivanov¹, A.I. Godunov², E.A. Malygina³, N.A. Papusha⁴, A.I. Ermakova⁵

¹Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

^{2,4,5}Penza State University, Penza, Russia

© Иванов А. И., Годунов А. И., Малыгина Е. А., Папуша Н. А., Ермакова А. И., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

³MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia¹ivan@pnpei.penza.ru, ²avitelpgu@mail.ru, ³malygina@mirea.ru,⁴vus@pnzgu.ru, ⁵aermakova27061992@mail.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the article is to improve the accuracy of neural network estimates of correlation coefficients. *Materials and methods.* The correlation coefficient is one of the most significant second-order statistical points. When training networks of quadratic neurons on small samples, it is necessary to repeatedly reduce the probabilities of errors of the first and second kinds, classical statistical criteria. Previously, it was shown that the representation of various statistical criteria by artificial neurons leads to the emergence of some equivalent of convolutional neural networks, which increase the accuracy of estimating correlation coefficients. *Results.* The networks increase the accuracy of estimates of correlation coefficients when testing the sequence of different statistical hypotheses with a second layer, which eliminates the code redundancy of a large number of neurons of the first layer. The number of hypotheses to be tested must coincide with the number of output states of convolutional artificial neurons. The paper discusses artificial convolutional neurons with output quantizers having 8 quantization thresholds with mathematical expectations $E(r) \approx \{0.0; \pm 0.3; \pm 0.5; \pm 0.7; \pm 0.9\}$ correlation coefficients.

Keywords: correlation coefficients, small samples, statistical criteria for testing the independence hypothesis, artificial neurons, improving the accuracy of estimates by eliminating code redundancy

For citation: Ivanov A.I., Godunov A.I., Malygina E.A., Papusha N.A., Ermakova A.I. Neural network analysis of small samples using a large number of statistical criteria to test the sequence of hypotheses about the value of mathematical expectations of correlation coefficients. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):37–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-4

Постановка задачи

К сожалению, большинство статистических вычислений построено на использовании выборок реальных данных большого объема. Например, для достоверной оценки данных по хи-квадрат критерию [1] желательно иметь выборку в 200 и более опытов.

Аналогичная ситуация возникает и при попытках оценки коэффициентов корреляции на малых выборках по следующей формуле:

$$r_1(x, y) = \sum_{i=1}^{16} \frac{(x_i - E(x)) \cdot (y_i - E(y))}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}, \quad (1)$$

где $E(\cdot)$ – операция вычисления математического ожидания; $\sigma(\cdot)$ – операция вычисления стандартного отклонения.

Далеко не всегда удается получить большую выборку реальных данных в приложениях экономики, медицины, биометрии. Имитационное моделирование вычислений по формуле (1) показывает значительный разброс оценок. Пример полученных моделированием распределений дан на рис. 1.

Нетрудно заметить, что пороги квантования рис. 1 совпадают с точками пересечения плотностей распределения соседних разделяемых классов.

Из рис. 1 следует, что наименее точными являются оценки малых значений коэффициентов корреляции. Так, если получать от программного генератора псевдослучайных данных выборки по 16 опытов, то вычисления по

формуле (1) дают разброс в интервале от $-0,75$ до $+0,75$ с нулевым математическим ожиданием $E(r_1) \approx 0,0$ и стандартным отклонением $\sigma(r_1) \approx 0,256$. Как следует из рис. 1, это распределение близко к нормальному. По мере увеличения модуля коэффициента корреляции распределение его значений существенно отклоняется от нормального.

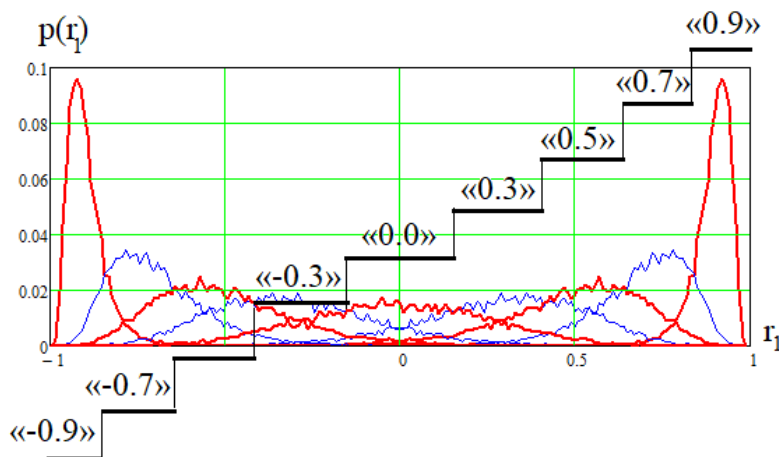


Рис. 1. Распределения плотности вероятности значений $p(r_1)$ коэффициентов корреляции, вычисленных на малой выборке в 16 опытов

При этом разброс оценок существенно уменьшается. Так, при $E(r_1) \approx 0,9$ ошибка оценок Δr_1 снижается примерно в 4 раза по сравнению с наихудшей ситуацией оценок слабо коррелированных данных.

В связи с тем, что наиболее неустойчивыми являются оценки слабо коррелированных данных при вычислениях по формуле (1) в прошлом веке физико-математической общественностью создано порядка 20 статистических критериев проверки гипотезы независимости [2].

Многоуровневое квантование данных модификации корреляционно-нейросетевого критерия Пирсона

Корреляционный критерий (1) активно использовался статистиками в конце XIX в. Он оказался настолько эффективным, что использование его стало общепринятой мировой практикой. Однако эта удачная математическая конструкция имеет ряд менее эффективных аналогов. В частности, в работе [3] описаны четыре более слабых аналога. Например, мы можем воспользоваться следующим аналогичным преобразованием:

$$r_4(x, y) = \sum_{i=1}^{16} \frac{(x_i - E(x)) \cdot (y_i - E(y))}{|x_i - E(x)| + |y_i - E(y)| + 0,02}. \quad (2)$$

Преобразование (2) существенно хуже базового преобразования (1). Вероятности ошибок первого и второго рода классического преобразования (1) примерно на 30 % меньше величин своего аналога (2). На рис. 2 приведены распределения откликов критерия (2) при разных математических ожиданиях базового критерия (1).

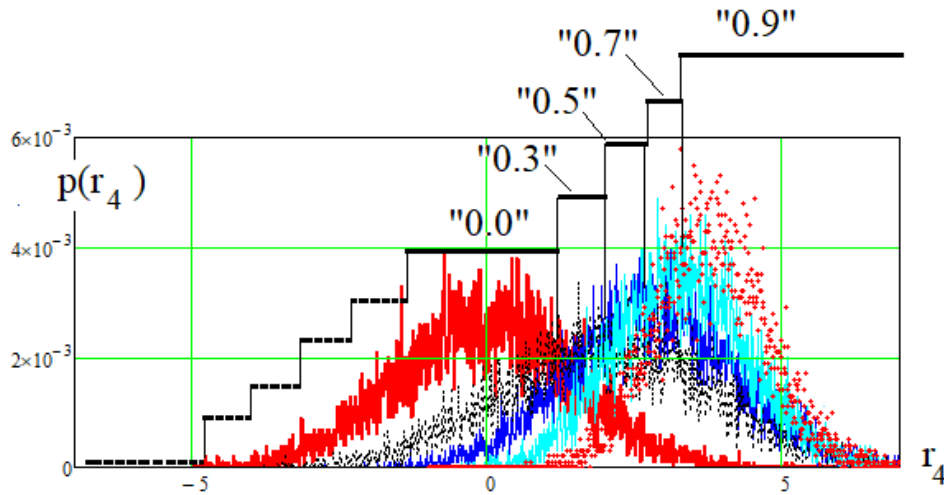


Рис. 2. Выходное 5-уровневое квантование откликов критерия, вычисленного по формуле (2)

Следует отметить, что дополнительную информацию о данных малой выборки удастся получить, если отклики критериев (1) и (2) слабо коррелированы. По данным, приведенным в справочнике [4], показатель корреляционной сцепленности двух рассматриваемых критериев составляет – $\text{corr}(r, r_4) \approx 0,194$.

Еще одним свойством второго критерия является то, что он чувствителен только к модулю коэффициента корреляции:

$$r_4(x, y) = |\pm r_4(x, y)| = |\mp r_4(x, y)|. \quad (3)$$

По этой причине перед вычислением функционала (2) обязательно следует выполнять центрирование данных малой выборки:

$$E(x) \approx E(y) \approx 0,00. \quad (4)$$

Статистических корреляционных функционалов, чувствительных только к модулю коэффициентов корреляции, достаточно много [4]. В частности, к ним относятся все дискретные критерии, построенные на ранжировании данных и все автокорреляционные критерии $r(x, x)$, построенные на учете только одной переменной. Для всех функционалов этого типа обязательно выполнение операции центрирования (4). В противном случае может возникнуть существенная методическая ошибка. На рис. 2 пунктиром выделены состояния 9-уровневого квантователя, которые могут быть восстановлены, если используются данные иных корреляционных функционалов.

Повышение устойчивости оценок при нейрокорреляционной многократной проверке гипотезы независимости на малой выборке за счет использования большого числа статистических критериев

Каждому из классических статистических критериев проверки гипотезы независимости [2] может быть поставлен в соответствие эквивалентный ему искусственный нейрон [3–5]. Тогда, объединив все эквивалентные

нейроны, получим однослойную сеть, способную откликаться на малую выборку бинарным кодом с 21-кратной избыточностью. Эта ситуация отображена на рис. 3.

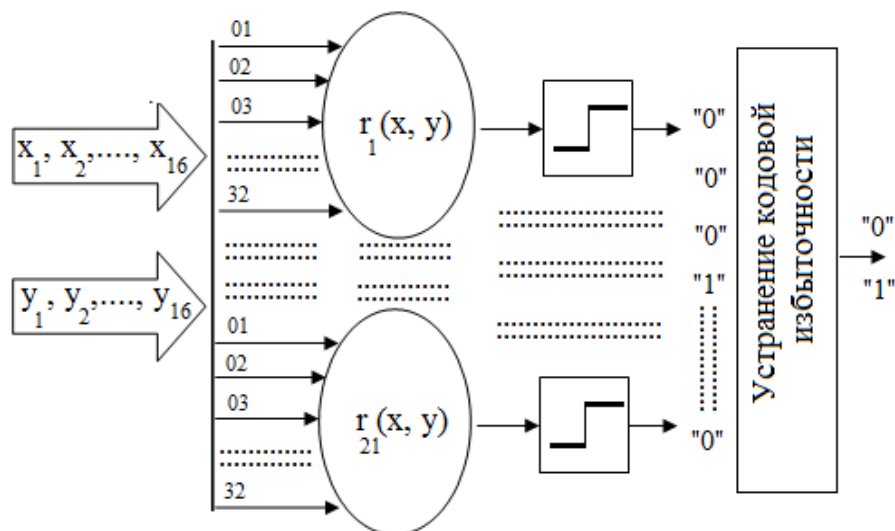


Рис. 3. Устранение кодовой избыточности
простейшим правилом подсчета состояний «0»

Большое число искусственных нейронов, параллельно обрабатывающих малую выборку, позволяет повысить достоверность принимаемых сетью решений. Самым простым является свертывание кодовой избыточности подсчетом состояний «0». Если состояний «0» большинство, то принимается итоговое решение «0». Если большинство разрядов имеет состояние «1», то итоговое решение соответствует состоянию «1».

Заметим, что только использование классических критериев проверки гипотезы независимости дает 21-кратную кодовую избыточность. Уже в начале этого века было создано еще порядка 180 новых статистических критериев [3–5]. То есть этим способом могут быть получены достаточно большие сети бинарных искусственных нейронов, обеспечивающие приемлемые для практики доверительные вероятности.

Преимущества перехода к использованию искусственных нейронов с многоуровневыми выходными квантователями

К сожалению, бинарные искусственные нейроны являются самыми низкоэффективными по способности получать информацию или по способности защищать информацию [6, 7]. Гораздо более эффективными являются искусственные нейроны с многоуровневыми выходными квантователями [8–11].

На рис. 3 представлена сеть бинарных нейронов, позволяющая поднимать достоверность проверки гипотезы независимости данных. Эта сеть фактически проверяет гипотезу $E(r_1) = 0,0$. Для того чтобы проверять две гипотезы одновременно, необходимо использовать 21 корреляционный нейрон с троичными квантователями. Если использовать квантователи с 9 уровнями

(см. рис. 1), то такая нейросеть будет способна параллельно проверять 9 статистических гипотез. Применение корреляционных нейронов, способных чувствовать только модуль коэффициента корреляции (3), дает возможность проверять не 9, а только 5 статистических гипотез.

Одной из положительных сторон применения более сложных нейросетевых конструкций является то, что открываются технические возможности параллельной проверки не одной, а нескольких статистических гипотез. Если классические критерии прошлого века [2] строились только для самого плохого случая проверки гипотезы независимости, или $E(r_1) = 0,0$, то применение квантователя с 9 площадками и 8 порогами сравнения приводит проверки 9 гипотез $\{E(r_1) = -0,9; E(r_1) = -0,7; \dots, E(r_1) = 0,7; E(r_1) = 0,9\}$.

Формально в каждом из известных на сегодня корреляционных нейронов [10, 12] вместо бинарного квантователя могут быть использованы более сложные 9-арные квантователи. Пороги этих квантователей всегда могут быть настроены на то, чтобы в центр каждой стабильной площадки квантователя попадали математические ожидания распределений, соответствующих условиям $\{E(r_1) = -0,9; E(r_1) = -0,7; \dots, E(r_1) = 0,7; E(r_1) = 0,9\}$ по первой классической шкале корреляций (1).

Естественно, что каждый новый статистический критерий будет иметь свою собственную шкалу «корреляций» и свой вектор порогов сравнения. Масштаб допустимых значений для каждой из шкал корреляций будет свой, однако под каждую шкалу может быть построен свой полином, приводящий ее к классической корреляционной шкале (1). Может быть построен как прямой, так и обратные полиномы, переводящие одну корреляционную шкалу в другую. То есть связи между первой и второй корреляционными шкалами могут быть приближенно представлены следующим образом:

$$r_1 = f(r_2) = a_0 + a_1 \cdot r_2^1 + a_2 \cdot r_2^2 + a_3 \cdot r_2^3 + a_4 \cdot r_2^4 + a_5 \cdot r_2^5, \quad (5)$$

$$r_2 = f(r_1) = b_0 + b_1 \cdot r_1^1 + b_2 \cdot r_1^2 + b_3 \cdot r_1^3 + b_4 \cdot r_1^4 + b_5 \cdot r_1^5. \quad (6)$$

Связывание разных шкал дискретными таблицами и полиномами является типовым приемом стандартизации данных при изменении температур термopарами.

В нашем случае каждый из 21-го критерия (нейрона) будет всегда давать 9 дискретных откликов-состояний $\{\langle -0,9 \rangle; \langle -0,7 \rangle; \dots; \langle 0,0 \rangle; \dots; \langle 0,9 \rangle\}$. Если мы подадим на нейросеть малую выборку в 16 опытов, то получим 21 дискретный отклик от каждого из искусственных нейронов. На рис. 4 приведен пример гистограммы наблюдения вероятностей 4 откликов-состояний $\{\langle -0,5 \rangle; \langle -0,3 \rangle; \langle 0,0 \rangle; \langle 0,3 \rangle\}$.

Из рис. 4 видно, что с наибольшей вероятностью 0,619 сеть из 21 нейрона откликается состоянием $\langle 0,0 \rangle$. С существенно меньшей вероятностью 0,238 сеть нейронов откликается состоянием $\langle -0,3 \rangle$.

С наименьшей вероятностью 0,048 возникает наименьший ответ $\langle -0,5 \rangle$. Наибольший ответ нейросети $\langle 0,3 \rangle$ возникает с вероятностью 0,095.

В рассмотренном примере свертывание 21 кратной кодовой избыточности нейросети происходит через вычисление математического ожидания данных гистограммы рис. 4:

$$r_1 \approx (-0,5) \cdot 0,048 + (-0,3) \cdot 0,238 + (0,0) \cdot 0,619 + (0,3) \cdot 0,095 = -0,067. \quad (7)$$

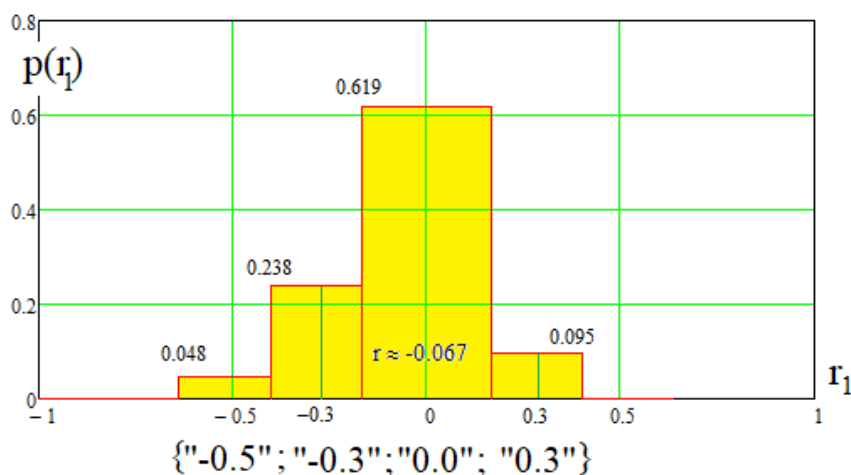


Рис. 4. Гистограмма вероятностей появления кодов, соответствующих математическим ожиданиям $\{E(r_1) = -0,5; E(r_1) = -0,3; E(r_1) = 0,0; E(r_1) = 0,3\}$ в шкале наиболее часто используемого классического функционала (1)

Многократное повторение численного эксперимента и свертывание кодовой избыточности взвешенным суммированием вида (7) дает снижение стандартного отклонения до величины $\sigma(r_1) \approx 0,191$. Как результат, мы получаем сжатие интервала ошибок в $0,256/0,191 \approx 1,34$ раза.

Последнее почти эквивалентно удвоению объема использованной малой выборки. В первом приближении можно утверждать, что добавление одного критерия (одного нейрона) в нашем случае приводит к росту объема анализируемой выборки примерно на один опыт.

Список литературы

1. Р 50.1.037-2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . Госстандарт России. М., 2001. 140 с.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
3. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Zolotareva T. A., Skudnev D. M. Synthesis of four new neuro-statistical tests for testing the hypothesis of independence of small samples of biometric data // APITECH III 2021 Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2094. P. 032013. doi: 10.1088/1742-6596/2094/3/032013
4. Иванов А. И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок. Проверка гипотезы независимости : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 218 с.
5. Иванов А. И., Золотарева Т. А. Искусственный интеллект в защищенном исполнении: синтез статистико-нейросетевых автоматов многокритериальной проверки гипотезы независимости малых выборок биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 105 с.
6. Иванов А. И. Малые выборки, нейроморфные вычисления: быстрые алгоритмы оценки энтропии Шеннона – Пирсона квадратичной сложности : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 32 с.
7. Иванов А. И. Бионика: обучение «на лету» с использованием генетически поразному предобученных искусственных нейронов // Системы безопасности. 2023. № 4. С. 122–125.

8. Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Малыгина Е. А. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 88–99.
9. Иванов А. И., Юнин А. П., Бояршинов М. А., Иванов А. П. Перспектива совместного использования двоичных и троичных искусственных нейронов при анализе качества «белого» шума в пространстве сверток Хэмминга, вычисленных по разным модулям // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 88–92. doi: 10.22213/2410-9304-2022-3-88-93
10. Малыгина Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 114 с.
11. Иванов А. И., Сулавко А. Е. Использование сетей корреляционных нейронов с многоуровневым квантованием: защита от извлечения знаний из параметров решающего правила : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 48 с.
12. Ложников П. С. Биометрическая защита гибридного документооборота : монография / М-во обр. и науки РФ, ФГБОУ ВО «ОмГТУ». Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 130 с.

References

1. R 50.1.037-2002. *Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. Chast' I. Kriterii tipa χ^2 . Gosstandart Rossii = Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for proving agreement between experimental and theoretical distribution. Part I. Criteria of type χ^2 . State Standard of Russia*. Moscow, 2001:140. (In Russ.)
2. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
3. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Zolotareva T.A., Skudnev D.M. Synthesis of four new neuro-statistical tests for testing the hypothesis of independence of small samples of biometric data. *APITECH III 2021 Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2094:032013. doi: 10.1088/1742-6596/2094/3/032013
4. Ivanov A.I. *Neyrosetevoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok. Proverka gipotezy nezavisimosti: spravochnik = Neural network multicriteria statistical analysis of small samples. testing the hypothesis of independence: handbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:218. (In Russ.)
5. Ivanov A.I., Zolotareva T.A. *Iskusstvennyy intellekt v zashchishchennom ispolnenii: sintez statistiko-neyrosetevykh avtomatov mnogokriterial'noy proverki gipotezy nezavisimosti malykh vyborok biometricheskikh dannykh: preprint = Artificial intelligence in secure implementation: synthesis of statistically-neutral machines for multi-criterial proof of hypothesis of independence of small samples of biometric data: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:105. (In Russ.)
6. Ivanov A.I. *Malye vyborki, neyromorfnye vychisleniya: bystrye algoritmy otsenki entropii Shennona – Pirsona kvadrachnoy slozhnosti: spravochnik = Small samples, neuromorphic computing: fast algorithms for estimating Shannon-Pearson entropy with quadratic complexity: handbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:32. (In Russ.)
7. Ivanov A.I. Bionics: learning on the fly using genetically differently engineered artificial neurons. *Sistemy bezopasnosti = Security systems*. 2023;(4):122–125. (In Russ.)
8. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Malygina E.A. Prospects for the use of artificial neural networks with multi-level quantizers in biometric-neural network authentication technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2013;(4):88–99. (In Russ.)

9. Ivanov A.I., Yunin A.P., Boyarshinov M.A., Ivanov A.P. The prospect of joint use of binary and ternary artificial neurons in analyzing the quality of “white” noise in the transmission of Khemming coils calculated in different modules. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intelligent systems in production*. 2022;20(3):88–92. (In Russ.). doi: 10.22213/2410-9304-2022-3-88-93
10. Malygina E.A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadraticnykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem biometricheskikh dannykh: preprint = Biometric neuron authentication: prospects for the implementation of a set of quadratic neurons with multi-level quantization of biometric data: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:114. (In Russ.)
11. Ivanov A.I., Sulavko A.E. *Ispol'zovanie setey korrelyatsionnykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem: zashchita ot izvlecheniya znaniy iz parametrov reshayushchego pravila: preprint = Using correlation neuron networks with multi-level quantization: defense against knowledge extraction from decision rule parameters: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:48. (In Russ.)
12. Lozhnikov P.S. *Biometricheskaya zashchita gibridnogo dokumentooborota: monografiya; M-vo obr. i nauki RF, FGBOU VO «OmGTU» = Biometric protection of hybrid document flow: monograph; Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017:130. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pnici.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, professor,
scientific adviser, Penza Scientific
Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitelpgu@mail.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of engineering sciences,
professor, professor of the sub-department
of automation and telemechanics, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Елена Александровна Малыгина

доктор технических наук, доцент
кафедры информационных технологий
в государственном управлении,
МИРЭА – Российский технологический
университет (Россия, г. Москва,
пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: malygina@mirea.ru

Elena A. Malygina

Doctor of engineering sciences, associate
professor of the sub-department
of information technologies in public
administration, MIREA - Russian
Technological University (78 Vernadskogo
avenue, Moscow, Russia)

Никита Александрович Папуша

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vus@pnzgu.ru

Nikita A. Papusha

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Анна Игоревна Ермакова

преподаватель кафедры радио-
и спутниковой связи Военного
учебного центра, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aermakova27061992@mail.ru

Anna I. Ermakova

Lecturer of the sub-department
radio and satellite communications,
Military Training Center, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.04.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 27.05.2024

Принята к публикации / Accepted 18.06.2024

УДК 519.24; 53; 57.017

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-5

Дифференциальный критерий Джини для нейросетевого анализа малых выборок биометрических данных

С. А. Гужова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

1996svetlanaserikova@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обучение искусственных нейронных сетей в соответствии с алгоритмами по распознаванию биометрических образов, описанными в ГОСТ Р 52633.5–2011, должно выполняться на малых выборках. Рассматриваются выборки, состоящие из 16 и 64 опытов. *Материалы и методы.* Показано, что для выборок в 16 опытов хи-квадрат критерий 1900 г. дает недопустимые вероятности ошибок. Классический критерий Джини 1941 г. дает вероятности ошибок на 29 % выше хи-квадрат критерия. *Результаты и выводы.* Использование предложенного нового дифференциального варианта критерия Джини позволяет на выборках в 16 опытов получить результаты примерно в 9 раз лучше, чем у хи-квадрат критерия на выборках того же объема. Рассмотрен вариант нейросетевого использования классических и вновь созданных на их базе критериев. При этом нейросетевое использование 9 новых статистических критериев позволяет снизить вероятности ошибок первого и второго рода до значения 0,031. Если в этой группе заменить наихудший критерий на дифференциальный критерий Джини, то вероятность появления ошибок удастся снизить до значения 0,027.

Ключевые слова: быстрые алгоритмы обучения нейросетей, малые выборки, статистические критерии проверки гипотезы нормальности и равномерности, бинарные нейрокритерии, искусственные нейроны, повышение точности оценок за счет устранения кодовой избыточности

Для цитирования: Гужова С. А. Дифференциальный критерий Джини для нейросетевого анализа малых выборок биометрических данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 47–54. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-5

The Gini differential test for neural network analysis of small biometric data samples

S.A. Guzhova

Penza State University, Penza, Russia

1996svetlanaserikova@gmail.com

Abstract. *Background.* Training of artificial neural networks in accordance with the algorithms for recognizing biometric patterns described in GOST R 52633.5-2011 should be performed on small samples. The research considers samples consisting of 16 and 64 experiments. *Materials and methods.* Shown for samples of 16 experiments, the chi-square test of 1900 gives unacceptable error probabilities. The classic 1941 Gini test gives error probabilities 29% higher than the chi-square test. *Results and conclusions.* The use of the proposed new differential version of the Gini test allows to obtain results in samples of 16 ex-

periments approximately 9 times better than those of the chi-square test in samples of the same size. A variant of neural network use of classical and newly created criteria on their basis is considered. At the same time, the neural network use of 9 new statistical criteria makes it possible to reduce the probability of errors of the first and second types to a value of 0.031. If the worst-case test is replaced with the Gini differential test in this group, the probability of errors can be reduced to a value of 0.027.

Keywords: fast neural network training algorithms, small samples, statistical criteria for testing the normality and uniformity hypothesis, binary neurocriteria, artificial neurons, improving the accuracy of estimates by eliminating code redundancy

For citation: Guzhova S.A. The Gini differential test for neural network analysis of small biometric data samples. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):47–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-5

Постановка задачи

К сожалению, большинство статистических вычислений построено на использовании выборок реальных данных большого объема. Например, для достоверной оценки данных по хи-квадрат критерию [1, 2] желательно иметь выборку в 64 и более опытов. Если выборка мала, например имеет только 16 опытов [3], то доверительная вероятность для хи-квадрат критерия оказывается недопустимо низкой. На рис. 1 представлены результаты имитационного моделирования хи-квадрат критерия для выборки в 16 опытов.

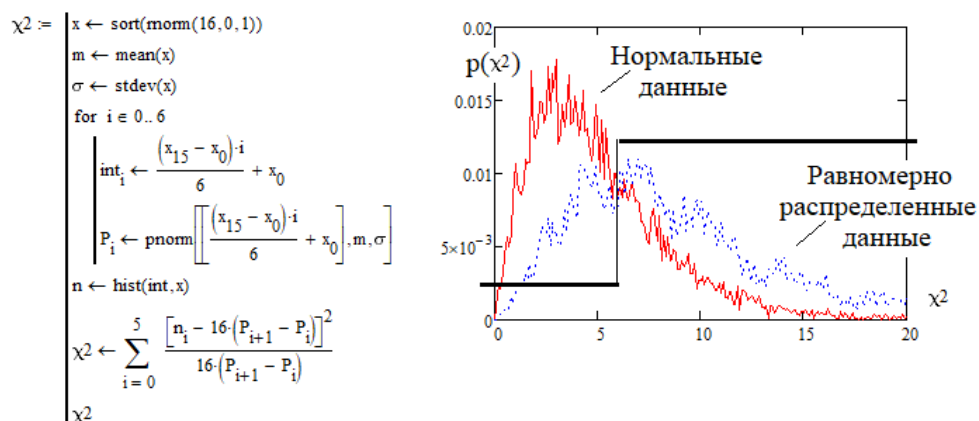


Рис. 1. Распределения плотности вероятности значений хи-квадрат критерия на малой выборке в 16 опытов

Из рис. 1 видно, что при пороге принятия решения $k = 5,3$ вероятности ошибок первого и второго рода близки и составляют величину $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,332$. То есть использование одного классического хи-квадрат критерия на малой выборке в 16 опытов обеспечивает недопустимо низкую доверительную вероятность 0,668.

Программная реализация в левой части рис. 1 ориентирована на моделирование нормально распределенных данных. Для того чтобы эту программу переделать под равномерные данные, необходимо заменить в ней первую строку на обращение к другой функции: $x \leftarrow \text{sort}(\text{runif}(16,0,16))$.

Положение кардинально меняется, если хи-квадрат критерий Пирсона использовать для больших выборок. На рис. 2 представлены отклики хи-квадрат критерия для большой выборки в 64 опыта.

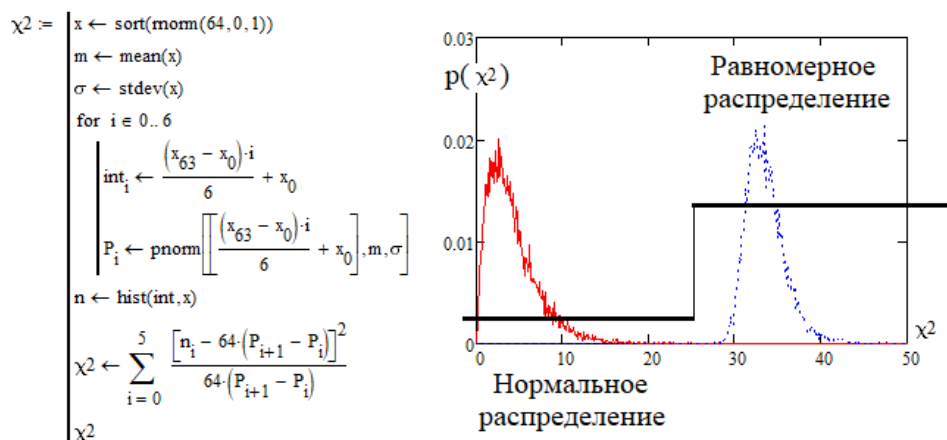


Рис. 2. Хорошее разделение данных с нормальным и равномерным распределением при выборке в 64 опыта и пороге сравнения $k \approx 27$

Из рис. 2 видно, что на большой выборке в 64 опыта нормальное распределение данных и равномерное распределение данных хорошо различимы.

Вероятности появления ошибок первого и второго рода малы и составляют менее 0,0001. При запуске программы моделирования 10 000 раз (левая часть рис. 2) ошибок не обнаружено.

К сожалению, пользователи негативно относятся к необходимости 64 раза писать рукописный пароль или произносить свой голосовой пароль.

Классический критерий Джини

В прошлом веке усилиями исследователей математической статистики было создано более 20 статистических критериев для проверки гипотезы нормального и равномерного распределения данных. В том числе в 1941 г. был создан критерий Джини [2].

Аналитическая запись этого критерия сводится к вычислению интеграла модуля разности наблюдаемой функции вероятности и ожидаемой функции вероятности:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} |P(x) - P^*(x)| dx, \quad (1)$$

где $P(\cdot)$ – ожидаемая функция вероятности; $P^*(\cdot)$ – наблюдаемая функция вероятности, анализируемой выборки.

К сожалению, на малых выборках критерий Джини работает хуже хи-квадрат критерия. На рис. 3 представлены результаты моделирования этого критерия на малых выборках в 16 опытов.

Из данных рис. 3 следует рост вероятности ошибок первого рода критерия Джини до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,428$. В сравнении с хи-квадрат

критерием рост вероятности ошибок составляет 29 %, что ограничивает применение классического критерия Джини при анализе малых выборок в группе с другими классическими статистическими критериями [4, 5].

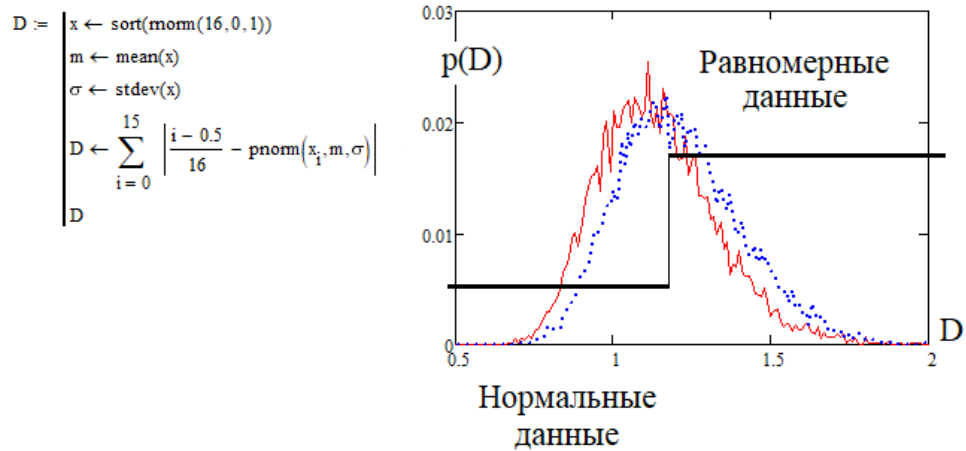


Рис. 3. Плохая разделимость малых выборок классическим критерием Джини при значении порога $k \approx 1,16$

Дифференциальный вариант критерия Джини

Наряду с классической формой критерия Джини (1) может быть использован ее дифференциальный вариант. Этот вариант получается заменой в выражении (1) функций вероятности на их производные (на функции плотности вероятности):

$$dD = \int_{-\infty}^{\infty} |p(x) - p^*(x)| dx, \quad (2)$$

где $p(\cdot)$ – ожидаемая функция плотности вероятности; $p^*(\cdot)$ – наблюдаемая функция плотности вероятности анализируемой выборки.

Проведенные исследования показали, что переход к статистическому анализу плотностей вероятности малых выборок значительно повышает достоверную вероятность принимаемых критерием статистических решений. На рис. 4 приведены результаты моделирования дифференциального варианта критерия Джини.

Из рис. 4 следует, что вероятности ошибок первого и второго рода для нового критерия снижаются до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,037$ при пороге $k \approx 3,28$. Этот показатель примерно в 9 раз лучше, чем у хи-квадрат критерия на выборках того же объема. Показатель снижения вероятностей ошибок для дифференциального критерия Джини является одним из самых высоких среди группы новых статистических критериев, созданных в этом веке [5].

Нейросетевое объединение классических и новых статистических критериев

Следует обратить особое внимание на то, что каждый из рассмотренных выше статистических критериев имеет собственную шкалу. Формально

можно попытаться решить задачу приведения шкал разных критериев к одной шкале (например, к шкале наиболее часто применяемого хи-квадрат критерия Пирсона).

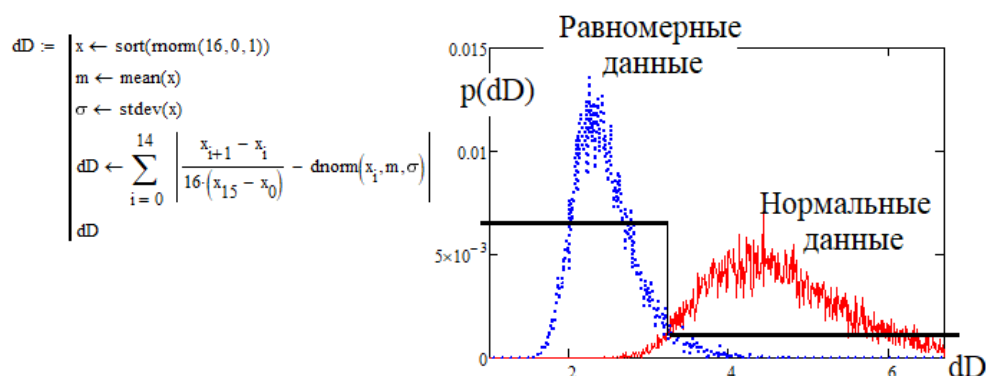


Рис. 4. Хорошая разделимость равномерно и нормально распределенных данных малой выборки дифференциальным вариантом критерия Джини

Перевод в единую обобщенную шкалу может быть выполнен таблично либо через использование полиномов. В частности, такая практика широко используется при измерении температуры термопарами.

Только в единственной обобщенной шкале возможно повысить точность оценок через усреднение откликов разных критериев.

Возможен иной, менее трудоемкий подход, построенный на нейросетевом объединении множества разных статистических критериев. В простейшем случае достаточно использования бинарных искусственных нейронов [6–8], каждый из которых построен на квантовании данных своего статистического критерия.

На рис. 5 представлена нейронная сеть, обобщающая отклики нескольких искусственных нейронов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что переход к статистическому анализу плотностей вероятности малых выборок значительно повышает достоверную вероятность принимаемых критерием статистических решений, что подтвердилось результатами моделирования дифференциального варианта критерия Джини.

Использование группы статистических критериев через их нейросетевой перевод в единую обобщенную шкалу, когда каждый бинарный нейрон построен на квантовании данных своего статистического критерия, позволил значительно повысить снижения вероятности ошибок первого и второго рода.

При этом в связи с ростом кодовой избыточности откликов нейронной сети появляется возможность свернуть данные путем обнаружения ошибок и их исправления.

Самым простым алгоритмом в данном случае является «голосование» разрядов. По этому алгоритму подсчитывается число состояний «0» и число состояний «1» избыточного кода.

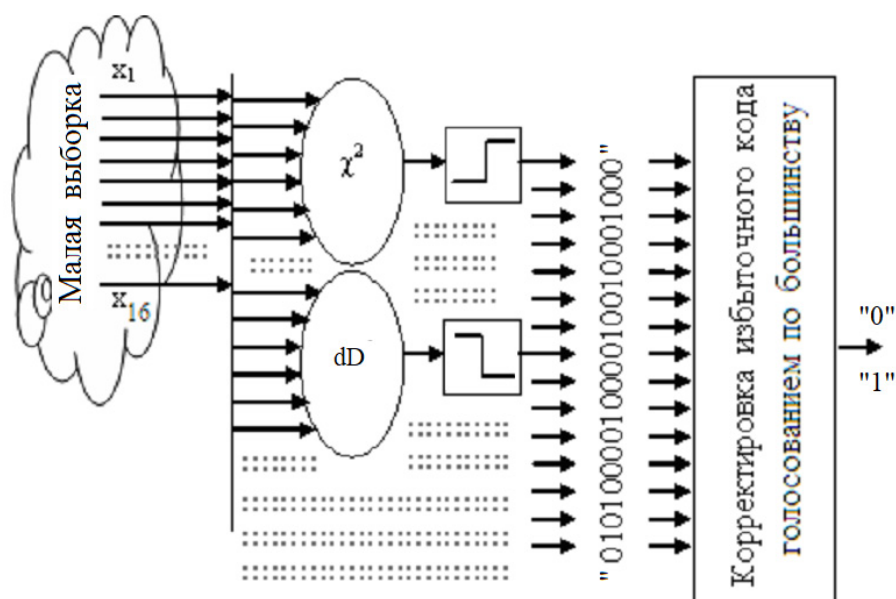


Рис. 5. Нейросетевое обобщение нескольких статистических критериев, позволяющее получать выходной бинарный код с высокой избыточностью

Если число состояний «0» превышает число разрядов с состоянием «1», то выходной блок свертывания кодовой избыточности откликается состоянием «0».

Обычно при организации нейросетевого обобщения с избыточным выходным кодом используют нечетное число искусственных нейронов. В этом случае не возникает неопределенности, когда число состояний «0» и число состояний «1» совпадает.

В случае использования 9 новых статистических критериев, созданных в этом веке, удастся добиться снижения вероятности ошибок первого и второго рода до значения 0,031 [4, 9, 10]. Если в этой группе заменить наихудший критерий на рассмотренный в данной статье критерий dD, то вероятность появления ошибок удастся снизить до значения 0,027.

Список литературы

1. Р 50.1.037-2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . Госстандарт России. М., 2001. 140 с.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
3. Иванов А. И. Бионика: обучение «на лету» с использованием генетически поразному предобученных искусственных нейронов // Системы безопасности. 2023. № 4. С. 122–125.
4. Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Безяев А. В. [и др.]. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 20–29. doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-3
5. Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В., Куприянов Е. Н. [и др.]. Обзор новых статистических критериев проверки гипотезы нормальности и равномерности

- распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 33–44.
6. Волчихин В. И., Иванов А. И., Серикова Ю. И. Снижение требований к объему выборки при нейросетевом объединении классического критерия Эджуорта – Эдлтона – Пирсона и двух его фрактальных аналогов при проверке гипотезы независимости данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 1. С. 5–13. doi: 10.21685/2072-3059-2023-1-1
 7. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П., Еременко Р. В., Савинов К. Н. Номограммы для сравнения корректирующих способностей бинарных и троичных нейронов, используемых при многокритериальной проверке гипотезы независимости данных малых выборок // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 5–16. doi: 10.21685/2072-3059-2022-4-1
 8. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
 9. Иванов А. И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 160 с.
 10. Волчихин В. И., Иванов А. И., Безяев А. В., Филипов И. А. Распознавание малых выборок с заданным распределением данных при использовании искусственных нейронов, предсказывающих доверительные вероятности собственных решений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 31–39. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-3

References

1. R 50.1.037-2002. Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for proving agreement between experimental and theoretical distribution. Part 1. Criteria of type χ^2 . State Standard of Russia. Moscow, 2001:140. (In Russ.)
2. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
3. Ivanov A.I. Bionics: Learning on the fly using genetically differently engineered artificial neurons. Sistemy bezopasnosti = Security systems. 2023;(4):122–125. (In Russ.)
4. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Bezyaev A.V. et al. An album of nine classical statistical tests for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems. 2022;(1):20–29. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-3
5. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N. et al. Review of new statistical criteria for testing the hypothesis of normality and uniformity of distribution of small sample data. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems. 2022;(2):33–44. (In Russ.)
6. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Serikova Yu.I. Reducing sample size requirements for neural network combining the classical Edgerworth – edleton – Pearson test and its two-fractal counterparts when testing the data indenpendance hypothesis. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences. 2023;(1):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-1-1
7. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P., Eremenko R.V., Savinov K.N. Nomograms for comparing the corrective abilities of binary and ternary neurons used in multicriteria testing of the hypothesis of small sample data independence. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences. 2022;(4):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-4-1

8. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in the MathCAD language): Preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
9. Ivanov A.I. *Neyrosetevoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok: spravochnik = Neural network multicriteria statistical analysis of small samples: handbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:160. (In Russ.)
10. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Filipov I.A. Recognition of small choices with a given distribution of data using sophisticated neurons that predict the reliability of decisions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):31–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-3

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Андреевна Гужова

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: 1996svetlanaserikova@gmail.com

Svetlana A. Guzhova

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.04.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 27.05.2024

Принята к публикации / Accepted 30.07.2024

УДК 629.7.054.07

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-6

Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микромеханических датчиков в составе танковых управляемых ракет

Н. Н. Борисов¹, М. Ю. Солодухин², А. И. Годунов³

¹Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

²3-й Центральный научно-исследовательский институт
Минобороны России, Москва, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹nikolaew14@mail.ru, ²mixa2184@list.ru, ³avitelpgu@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Реализация автоматического захвата цели на траектории и последующего перехода на самонаведение в танковых управляемых ракетах является одной из актуальнейших задач, направленных на повышение дальности и точности стрельбы управляемого вооружения танка, которые достигаются не за счет увеличения энергетики пушки, а за счет технических решений, вложенных в конструкцию ракеты и бортовую аппаратуру танка. Применение бесплатформенных инерциальных навигационных систем в танковых управляемых ракетах для решения задач наведения позволит обеспечить захват цели до старта ракеты на требуемых дальностях. Цель – оценка влияния ошибок замера координат управляемой ракеты по бесплатформенной инерциальной навигационной системе во время процесса наведения на конечный результат с помощью статистической модели динамики управляемой ракеты с бесплатформенной инерциальной навигационной системой в составе системы управления. *Материалы и методы.* Раскрыта структура статистической модели управляемой ракеты с бесплатформенной инерциальной навигационной системой. Показаны исходные данные. Проведена оценка влияния статистических характеристик датчиков первичной информации на точность бесплатформенной инерциальной навигационной системы. *Результаты.* Приведены результаты моделирования. Показана эффективность внедрения в управляемую ракету бесплатформенной инерциальной навигационной системы, реализующей возможность обеспечить захват цели до старта ракеты. *Выводы.* Применение статистической модели динамики управляемой ракеты с бесплатформенной инерциальной навигационной системой в составе системы управления показало, что максимальная пространственная ошибка бесплатформенной инерциальной навигационной системы по дальности реализуется при «не нуле» датчика линейного ускорения и составляет 110 м (1,7 % от дальности полета), а «не нуль» датчика угловой скорости дает ошибку 57 м (0,9 %).

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, танковая управляемая ракета, головка самонаведения

Для цитирования: Борисов Н. Н., Солодухин М. Ю., Годунов А. И. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микромеханических датчиков в составе танковых управляемых ракет // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 55–63. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-6

Strapdown inertial navigation system based on micromechanical sensors as a part of tank guided missiles

N.N. Borisov¹, M.Yu. Solodukhin², A.I. Godunov³

¹Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

²3rd Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia, Moscow, Russia

³Penza State University, Penza, Russia

¹nikolaew14@mail.ru, ²mixa2184@list.ru, ³avitelpgu@mail.ru

Abstract. *Background.* The implementation of automatic target capture on the trajectory and the subsequent transition to homing in tank guided missiles is one of the most urgent tasks aimed at increasing the range and accuracy of firing of guided weapons of the tank, which, in this case, is achieved not due to increasing the energy of the gun, but due to technical solutions invested in the design of the missile and onboard equipment of the tank. The use of free-form inertial navigation systems in tank guided missiles to solve guidance tasks will ensure the capture of the target before the launch of the rocket at the required ranges. The purpose is to estimate the effect of errors in measuring the coordinates of a guided missile using a free-form inertial navigation system during the guidance process on the final result using a statistical model of the dynamics of the guided missile with a free-form inertial navigation system as part of the control system. *Materials and methods.* The article discloses the structure of a statistical model of a guided rocket with a free-form inertial navigation system. The initial data is shown. The impact of statistical characteristics of primary information sensors on the accuracy of the free-form inertial navigation system was assessed. *Results.* The results of the simulation are given. The effectiveness of introducing a free-form inertial navigation system into the guided missile is shown, which realize the ability to ensure the capture of the target before the launch of the rocket. *Conclusions.* The use of a statistical model of the dynamics of a guided missile with a free-form inertial navigation system as part of the control system showed that the maximum spatial error of the free-form inertial navigation system in range is realized at “not zero” of the linear acceleration sensor and is 110 m (1.7% of the flight range), and “not zero” of the angular velocity sensor gives an error of 57m (0.9%).

Keywords: stencil inertial navigation system, tank guided missile, homing head

For citation: Borisov N.N., Solodukhin M.Yu., Godunov A.I. Strapdown inertial navigation system based on micromechanical sensors as a part of tank guided missiles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):55–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-6

Введение

В процессе эволюции высокоточного оружия наибольшее развитие и перспективу получили управляемые снаряды с головками самонаведения (ГСН). Использование ГСН позволяет реализовать принцип «выстрелил – забыл» и обеспечить минимальные промахи, включая прямые попадания, независимо от дальности, а также позволяет снизить требования по расходу переносимой перегрузке.

Ограниченность дальности захвата современных фотоприемников оптических ГСН не позволяет обеспечить захват целей до старта ракеты на требуемых дальностях. В связи с этим возникает необходимость захвата цели на траектории. Для реализации автоматического захвата цели на траектории и последующего перехода на самонаведение (реализации принципа «выстре-

лил – забыл») используются инерциальные навигационные системы (ИНС), теория которых развита в работах [1, 2]. В управляемых снарядах и ракетах малого калибра применение платформенных ИНС, традиционно используемых в системах наведения баллистических ракет, невозможно в связи с их большими массой и габаритами.

Современные технологии позволяют производить электромеханические датчики малого размера [3, 4], на основании которых возможно создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). В отличие от платформенных ИНС, данные системы обладают достаточно малыми размерами, что обеспечивает возможность использования БИНС для решения задач наведения в данных классах боеприпасов.

Материалы и методы

Эффективность использования БИНС на борту управляемых ракет (УР) малого калибра в основном определяется погрешностью определения текущих декартовых и угловых координат УР в процессе наведения [5]. Они, в свою очередь, кроме ошибок выставки, во многом определяются погрешностями замеров ускорений и угловых скоростей датчиками, используемыми в БИНС. Характеристики датчиков, влияющих на ошибки замеров, имеют случайную составляющую, поэтому влияние ошибок замеров на конечный результат будет определяться их случайным сочетанием, а объективная оценка должна даваться в виде статистических характеристик ошибок замера координат УР по БИНС во время процесса наведения [6].

Для проведения таких оценок разработана статистическая модель динамики УР с БИНС в составе системы управления (рис. 1).

Данная модель УР реализуется следующими блоками: блок алгоритма управления, блок динамики и кинематики [7], блок БИНС и блок расчета статистических характеристик ошибок БИНС. Управляющее воздействие $\bar{\delta}_{рп}$ формируется алгоритмом управления, реализующим тестовую программу полета. Управляющее воздействие подается на вход блока расчета динамики полета ракеты. Выходными данными блока являются следующие параметры: скорость ракеты V , угловые скорости Θ и Ψ вектора скорости ракеты, угловые скорости корпуса ракеты $\omega_{X1}, \omega_{Y1}, \omega_{Z1}$ для трех координатных осей связанной системы координат и перегрузки n_{X1}, n_{Y1}, n_{Z1} УР. Параметры вектора скорости УР передаются в блок кинематики вместе с текущими углами ориентации корпуса УР (ψ, θ, γ). В блоке кинематики происходит расчет реальных координат ракеты X, Y, Z в декартовой системе координат, имеющей точку отсчета, совмещенную с точкой старта УР, а также расчет углов ориентации: ψ, θ, γ .

Математическая модель БИНС включает модель датчиков (триада акселерометров и триада датчиков угловой скорости (ДУС)) и модель решения навигационной задачи. Входными сигналами модели датчиков являются перегрузки, замеряемые по трем осям системы координат и угловые скорости по трем осям УР, рассчитываемые в блоке динамики. Также на вход блока датчиков подаются случайные погрешности и ошибки измерения. Набор погрешностей и их статистические характеристики определяются типом используемых датчиков.

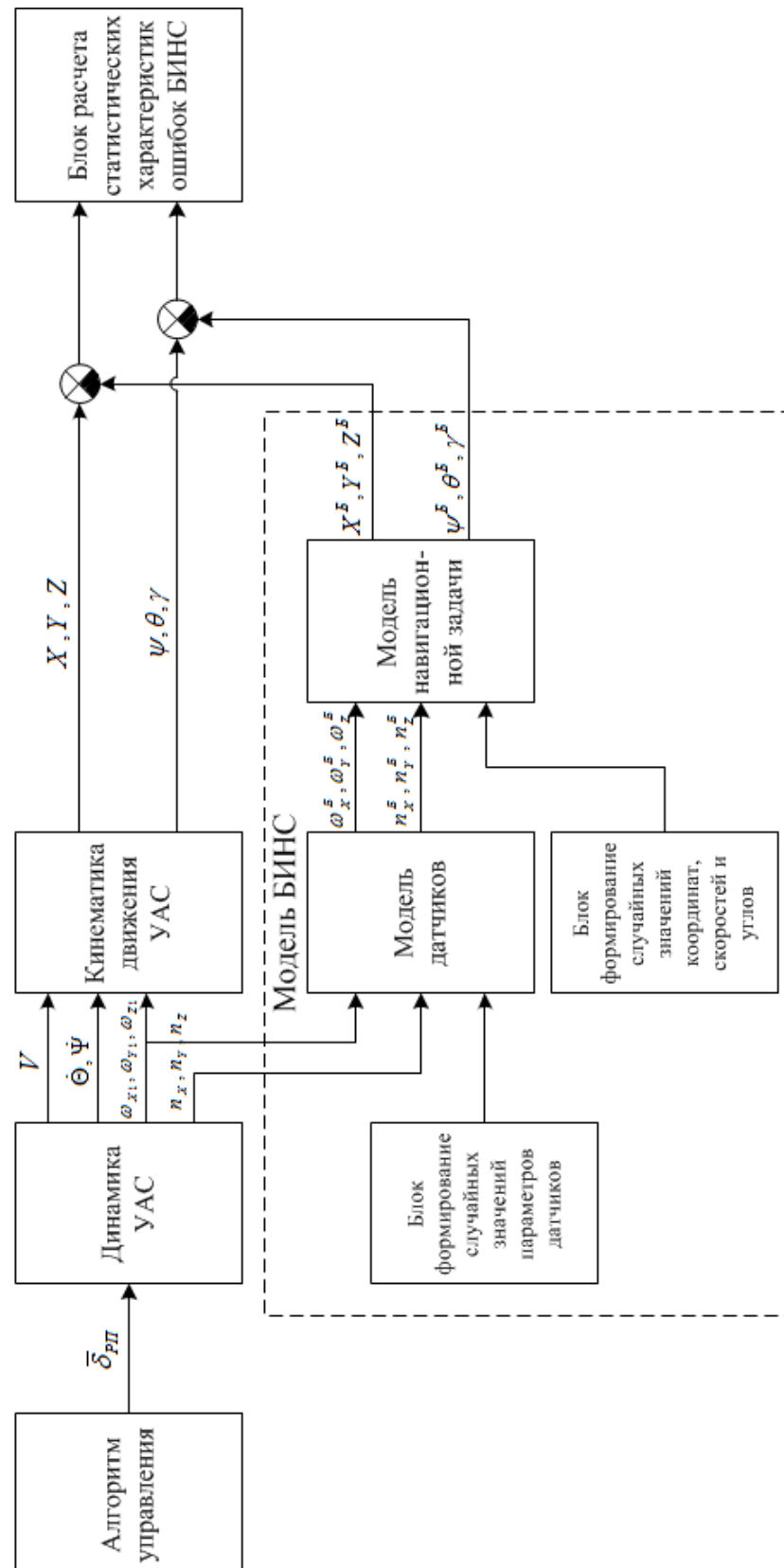


Рис. 1. Структура статистической модели УР с БИН

В модели учитываются следующие погрешности: смещение триад датчиков по осям, неортогональность осей датчиков, коэффициент влияния ортогональной перегрузки на ДУС, отклонения масштабных коэффициентов датчиков линейных ускорений (ДЛУ) и ДУС, не нули и скорости дрейфа нулей датчиков [8]. Выходом модели датчиков являются показания датчиков угловых скоростей $\omega_X^B, \omega_Y^B, \omega_Z^B$ и перегрузок n_X^B, n_Y^B, n_Z^B . Данные значения вместе с погрешностями начальной выставки поступают на вход блока решения навигационной задачи. Данный блок рассчитывает декартовы координаты УР относительно инерциальной системы координат – X^B, Y^B, Z^B , привязанной к точке старта, и углы, определяющие положение корпуса УР относительно переносной системы координат – $\psi^B, \theta^B, \gamma^B$.

Далее происходит сравнение идеальных расчетных координат и углов УР с координатами, полученными с БИНС, и рассчитываются статистические характеристики ошибок используемой БИНС в соответствующем блоке статистической модели.

Статистическое моделирование процесса полета УР с использованием БИНС проводится по следующей методике [9, 10]:

- задаются случайные значения параметров датчиков и реализации шумов, влияющих на результаты измерений;
- реализуется процесс наведения УР с фиксацией ошибок БИНС в данной реализации;
- процесс наведения повторяется с новой комбинацией случайных факторов и шумов;
- после завершения требуемого числа реализаций по фиксированным ошибкам БИНС в каждой реализации рассчитываются статистические характеристики ошибок БИНС по трем декартовым координатам и трем угловым координатам.

Результаты

В качестве примера приведено влияние основных погрешностей датчиков на точность определения координат УР, имеющей траекторию, приведенную на рис. 2. Общее время полета УР составляет 22 с, дальность полета – 6,3 км.

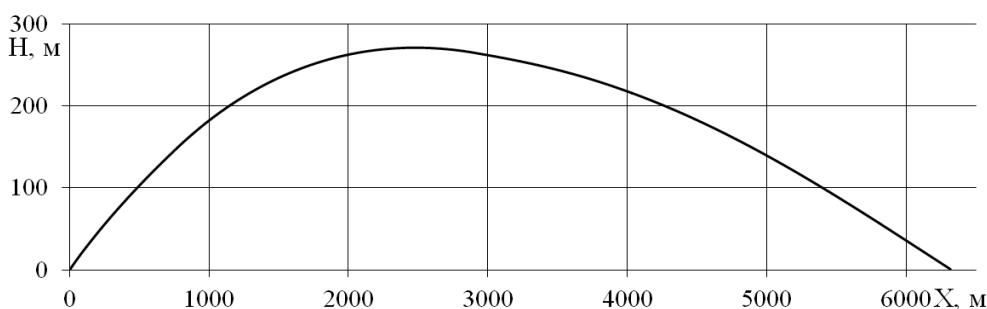


Рис. 2. Траектория УР в вертикальной плоскости

На рис. 3 приведены ошибки БИНС по трем декартовым координатам в зависимости от времени полета УР, вызванные одной из пяти рассматриваемых ошибок датчиков.

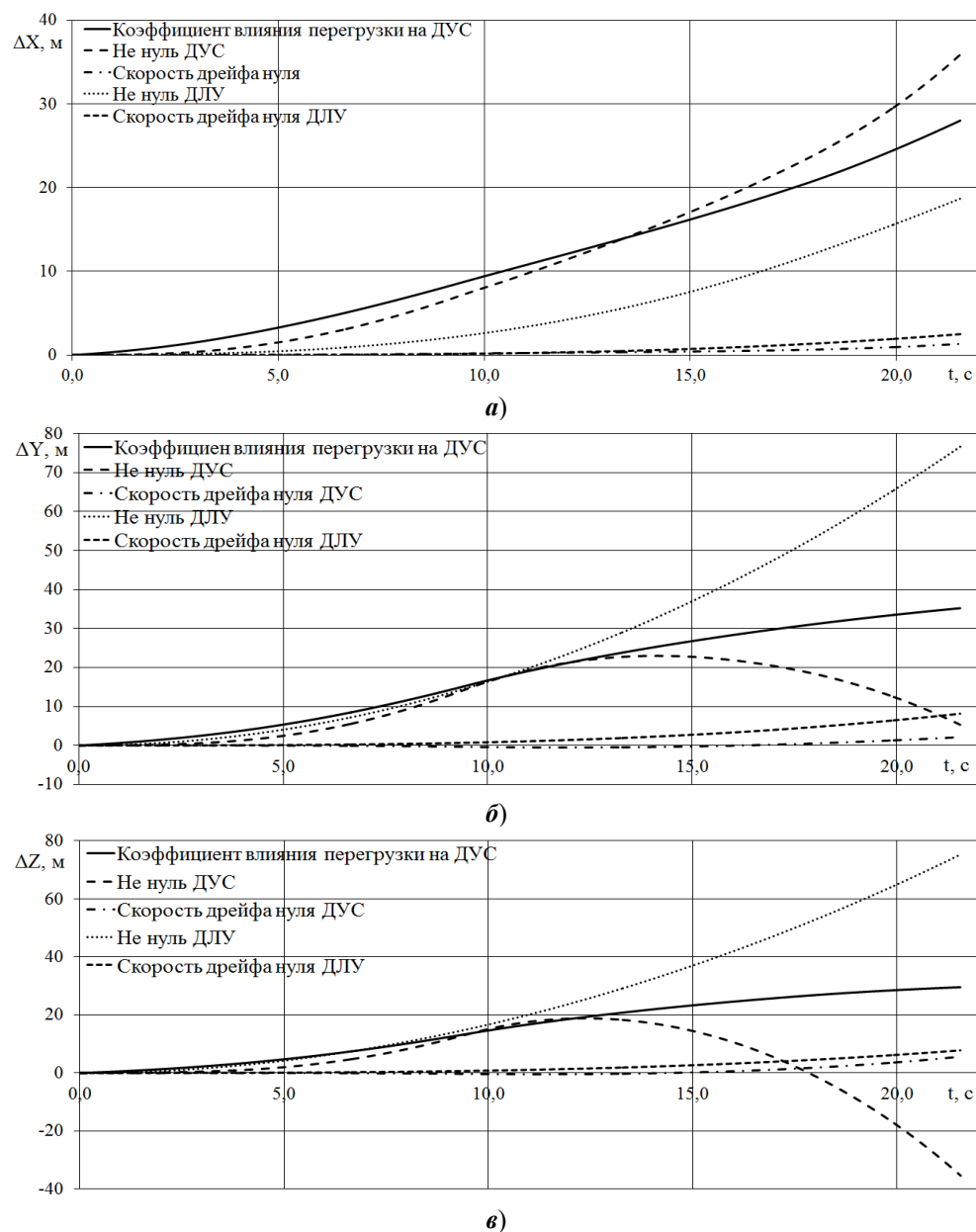


Рис. 3. Ошибки определения координат УР БИНС:

а – по оси *X*, *б* – по оси *Y*, *в* – по оси *Z*

В табл. 1 приведены величины погрешностей, характерных для датчиков отечественного производства, совместно с ошибками определения линейных и угловых координат УР в пространстве при помощи БИНС на конец полета.

Таблица 1

Величины погрешностей, характерных для датчиков отечественного производства, совместно с ошибками определения линейных и угловых координат УР в пространстве при помощи БИНС на конец полета

Рассматриваемый параметр	Значение (2 σ)	Ошибки БИНС на конец наведения					
		ΔX (м)	ΔY (м)	ΔZ (м)	$\Delta \gamma$ (град)	$\Delta \theta$ (град)	$\Delta \psi$ (град)
Коэффициент влияния ортогональной перегрузки на ДУС	0,02°/c/g	21,55	28,01	35,21	0,002	-0,014	0,014
Не нуль ДУС	0,26°/c	35,94	23,92	37,28	0,097	0,1	0,106
Не нуль ДЛУ	0,034g	18,7	76,87	75,95	0	0	0
Скорость дрейфа нуля ДУС	0,003°/c ²	1,33	2,19	5,63	0,012	0,012	0,012
Скорость дрейфа нуля ДЛУ	0,5mg/c	2,5	8,15	7,79	0	0	0

Из полученных материалов можно сделать вывод, что наибольшее влияние на точность определения положения в пространстве по данным БИНС оказывают уходы нулей ДЛУ и ДУС, а наименьшее – дрейфы нулей ДЛУ и ДУС. В данном примере приведен небольшой объем исследованных характеристик датчиков, однако хорошо видно влияние максимальных ошибок приведенных параметров на точность определения координат БИНС.

Максимальная пространственная ошибка БИНС по дальности реализуется при «не нуле» ДЛУ и составляет 110 м (1,7 % от дальности полета). «Не нуль» ДУС дает ошибку 57 м (0,9 %). По графикам видно, что влияние ошибок триад датчиков на определение координат УР по БИНС имеют квадратичную зависимость от времени полета УР, ошибки определения углов положения корпуса УР имеют линейные зависимости и поэтому на графиках не приводятся.

Заключение

Разработанная статистическая модель позволяет оценить влияние как отдельных параметров БИНС, так и их совокупности на конечный результат решения навигационной задачи с учетом условий управляемого полета. Моделирование позволит прогнозировать результат применения первичных преобразователей угловой скорости и ускорения в составе БИНС до изготовления опытного образца, сократив расходы на экспериментальную отработку изделия.

Список литературы

1. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации : учебник. М. : Наука, 1979. 296 с.
2. Лысенко Л. Н. Наведения и навигация баллистических ракет : учебник. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 672 с.
3. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под общ. ред. В. Я. Распопова. СПб. : ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
4. Требухов А. В., Бахонин К. А., Соловьев В. М., Редькин С. П., Алехин А. В., Масленников А. В., Соловьев Ю. В., Темляков Н. А. Разработка инерциальных чув-

- ствительных элементов для систем ориентации и навигации летательных аппаратов // Оборонная техника. 2014. № 5-6. С. 134–144.
5. Лебедев Р. К. Стабилизация летательного аппарата бесплатформенной инерциальной навигационной системой. М. : Машиностроение, 1977. 144 с.
 6. Дмитриев С. П., Колесов Н. В., Осипов А. В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. 2-е изд., перераб. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 208 с.
 7. Коротков О. В., Воропаев С. Н., Гуцал В. Г., Скоробогатский С. В. Математическая модель малогабаритной высокоточной ЗУР с лазерной системой наведения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 3 (73). С. 42–50.
 8. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 3 т. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / под ред. Н. Д. Егупова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 748 с.
 9. Челпанов И. Б., Несенюк Л. П., Брагинский М. В. Расчет характеристик навигационных гироскопов. Л. : Судостроение, 1978. 264 с.
 10. Степанов О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 500 с.

References

1. Bromberg P.V. *Teoriya inertial'nykh sistem navigatsii: uchebnik = Theory of inertial navigation systems: textbook*. Moscow: Nauka, 1979:296. (In Russ.)
2. Lysenko L.N. *Navedeniya i navigatsiya ballisticheskikh raket: uchebnik = Ballistic missile guidance and navigation: handbook*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007:672. (In Russ.)
3. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem = Fundamentals of constructing strapdown inertial navigation systems*. Saint Petersburg: GNTs RF «TsNII «Elektropryor», 2009:280. (In Russ.)
4. Trebukhov A.V., Bakhonin K.A., Solov'ev V.M., Red'kin S.P., Alekhin A.V., Maslennikov A.V., Solov'ev Yu.V., Temlyakov N.A. Development of inertial sensors for aircraft orientation and navigation systems. *Oboronnaya tekhnika = Defense equipment*. 2014;(5-6):134–144. (In Russ.)
5. Lebedev R.K. *Stabilizatsiya letatel'nogo apparata besplatformennoy inertial'noy navigatsionnoy sistemoy = Stabilization of an aircraft using a strapdown inertial navigation system*. Moscow: Mashinostroenie, 1977:144. (In Russ.)
6. Dmitriev S.P., Kolesov N.V., Osipov A.V. *Informatsionnaya nadezhnost', kontrol' i diagnostika navigatsionnykh sistem. 2-e izd., pererab. = Information reliability, control and diagnostics of navigation systems. The 2nd edition, revised*. Saint Petersburg: GNTs RF TsNII «Elektropryor», 2004:208. (In Russ.)
7. Korotkov O.V., Voropaev S.N., Gutsal V.G., Skorobogatskiy S.V. Mathematical model of a small-sized high-precision SAM with a laser guidance system. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk = Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2012;(3):42–50. (In Russ.)
8. Egupov N.D. (ed.). *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik: v 3 t. T. 1. Analiz i statisticheskaya dinamika sistem avtomaticheskogo upravleniya = Methods of classical and modern theory of automatic control: textbook: in 3 volumes. Volume 1. Analysis and statistical dynamics of automatic control systems*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2000:748. (In Russ.)
9. Chelpanov I.B., Nesenyuk L.P., Braginskiy M.V. *Raschet kharakteristik navigatsionnykh giropryorov = Calculation of characteristics of navigation gyro devices*. Leningrad: Sudostroenie, 1978:264. (In Russ.)

10. Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoy informatsii. Ch. 1. Vvedenie v teoriyu otsenivaniya = Fundamentals of estimation theory with applications to problems of processing navigation information. Part 1. Introduction to valuation theory.* Saint Petersburg: GNTs RF TsNII «Elektropribor», 2008:500. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Борисов

кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры порохов
и взрывчатых веществ, Филиал Военной
академии материально-технического
обеспечения имени генерала армии
А. В. Хрулева в г. Пензе (Россия,
г. Пенза, Военный городок)

E-mail: nikolaew14@mail.ru

Nikolay N. Borisov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of gunpowder and explosives, branch
of the Military Academy of Logistics named
after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza, Russia)

Михаил Юрьевич Солодухин

начальник 482 лаборатории,
3-й Центральный научно-
исследовательский институт
Минобороны России (Россия,
г. Москва, Погонный проезд, 10)

E-mail: mixa2184@list.ru

Mikhail Yu. Solodukhin

Head of laboratory 482, 3rd Central
Research Institute of the Ministry
of Defense of Russia (10 Pogonniy drive,
Moscow, Russia)

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitelpgu@mail.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of engineering sciences,
professor, professor of the sub-department
of automation and telemechanics, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.04.2024

Принята к публикации / Accepted 30.05.2024

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.382.2/.3-046.47

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора

Н. К. Юрков¹, И. М. Рыбаков², Е. А. Вершинин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹yurkov_NK@mail.ru, ²rybakov_im@mail.ru, ³egor.verschinin2011@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современной радиоэлектронике одной из главных нерешенных проблем является проблема теплоотвода. Технические решения для оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры становятся все более важными аспектами в контексте повышенных требований внешних воздействующих факторов к эффективности и надежности работы устройств. Предлагается оригинальный подход к оптимизации теплового режима радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода на основе высокотеплопроводного арсенида бора. Цель исследования: разработка и оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из арсенида бора для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности, стойкости. *Материалы и методы.* Проведен анализ современных материалов теплоотвода. Создана модель теплоотвода с учетом физических свойств материала арсенида бора. Проведено численное моделирование системы теплоотвода. Получена оценка эффективности использования теплоотвода из арсенида бора в тепловой системе. *Результаты.* Результаты работы позволили повысить эффективность управления тепловыми потоками и обеспечить оптимальные условия работы радиоэлектронной аппаратуры. Имитационное моделирование подтвердило эффективность управления тепловым режимом и снижение вероятности риска перегрева устройства. *Выводы.* Разработанные научно-технические решения по оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с применением теплоотвода из арсенида бора обеспечивают повышение надежности, стойкости и эффективности работы устройств, приборов, изделий, блоков в условиях агрессивных внешне воздействующих факторов.

Ключевые слова: теплоотвод, тепловой режим, микросхема, материалы, арсенид бора, вычислительная система, радиоаппаратура

Для цитирования: Юрков Н. К., Рыбаков И. М., Вершинин Е. А. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 64–77. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

© Юрков Н. К., Рыбаков И. М., Вершинин Е. А., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Optimizing the thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink

N.K. Yurkov¹, I.M. Rybakov², E.A. Vershinin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹yurkov_NK@mail.ru, ²rybakov_im@mail.ru, ³egor.vershinin2011@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern radio-electronic equipment one of the most important tasks is optimization of thermal solution to ensure effective heat dissipation and maintenance of optimal operating temperature of devices, devices, products. This is especially relevant in the conditions of constant increase in the density of components and increase in heat dissipation. Technical solutions to optimize the thermal system of radio electronic equipment are becoming increasingly important aspects in the context of increased requirements of external influencing factors to the efficiency and reliability of devices. One of the approaches attracting the attention of researchers is the use of boron arsenide heat sink. The purpose of the study is to develop and optimize the thermal system of radio-electronic equipment with the use of boron arsenide heat sink to ensure stable temperature operation of devices and increase their reliability, durability. *Materials and methods.* The results obtained on the basis of the analysis of the thermal characteristics of radio electronic components, modeling of heat transfer processes and evaluation of the efficiency of using boron arsenide heat sink in the thermal system are presented. *Results.* The developed thermal system with the use of boron arsenide heat sink allows to effectively control heat flows and provide optimal operating conditions for radio-electronic equipment. The conducted experiments and calculations confirm the improvement of heat dissipation and reduction of the risk of device overheating. *Conclusion.* The developed scientific and technical solutions for optimization of the thermal system of radio-electronic equipment with the use of boron arsenide heat sink provide an increase in reliability, durability and efficiency of devices, devices, products, units in conditions of increased external factors.

Keywords: heat sink, thermal regime, microcircuit, materials, boron arsenide, computer system, radio equipment

For citation: Yurkov N.K., Rybakov I.M., Vershinin E.A. Optimizing the thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):64–77. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

Введение

Эффективная работа, надежность и стойкость к климатическим и механическим воздействиям электронных устройств напрямую зависят от многих факторов, включая обеспечение оптимального теплового режима, что достигается за счет применения в конструкции современных технических решений снижения тепловой нагрузки [1–7]. Анализ выбранных нами материалов позволит выделить ключевые особенности каждого материала и их влияние на общий тепловой режим. Экспериментальные исследования и инженерные разработки в этой области имеют потенциал существенно улучшить характеристики теплоотвода, что, в свою очередь, способствует повышению производительности и долговечности электронных устройств [8–15].

Исследование теплоотвода из различных материалов становится особенно актуальным в контексте постоянного увеличения мощности и функциональности электронных компонентов. Выбор различных материалов выходит на передний план как потенциальный вариант улучшения теплового режима радиоэлектронного средства [1].

Данная статья посвящена разработке и оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из арсенида бора для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности, стойкости. Рассмотрим основные факторы, влияющие на тепловой режим радиоэлектронной аппаратуры при использовании различных материалов теплоотводящей системы.

Проведем анализ влияния различных материала теплоотвода с помощью численного моделирования.

Анализ материалов

Основными материалами, служащими для создания систем теплоотвода являются арсенид бора, алюминий, железо, золото, медь, серебро и алмаз, на их основе будет проведена предварительная оценка свойств теплоотвода.

Краткая характеристика используемых материалов:

- Арсенид бора благодаря своей высокой теплопроводности применяется в электронике, включая высокоэффективные теплорассеивающие элементы. Также он определяется как «дешевый алмаз» из-за дешевизны и свойств, практически аналогичных свойствам настоящего алмаза.
- Алюминий – широко используемый материал в различных отраслях техники. Он также играет значительную роль в радиоэлектронике. Применяется в радиаторах, тепловых трубах и других элементах систем охлаждения благодаря своей легкости и большой теплопроводности.
- Железо, будучи широко распространенным материалом, также применяется в электронике, но в меньшей степени. Применение осуществляется в виде тепловых трубок, радиаторов и других элементов охлаждения в электронных системах.
- Золото – материал, характеризующийся высокой теплопроводностью, редко используется в электронике в качестве теплоотводов из-за своей высокой стоимости. Но широко используется в микроэлектронике для создания теплопроводящих элементов и покрытий.
- Медь является одним из наиболее распространенных материалов в электронике. Это самый широко используемый в производстве теплорассеивающих элементов и тепловых трубок материал.
- Серебро, как и золото, имеет высокую электропроводность и теплопроводность. Как отличный проводник тепла может использоваться в производстве теплопроводящих материалов и элементов охлаждения, но имеет высокую стоимость.
- Алмаз из-за высокой теплопроводности может использоваться в переходных системах охлаждения, например в виде термопластин или в составе теплопроводящих материалов. Но является дорогостоящим материалом для обеспечения теплового режима.

На основе краткого анализа характеристик наиболее употребляемых материалов для отвода тепла в электронике можно сделать вывод, что наиболее распространенными материалами для отвода тепла являются медь и алюминий. Высокая степень теплопроводности и небольшая стоимость делают данные материалы универсальными для большинства видов электронной аппаратуры. Но существует проблема использования данных материалов в теп-

ловой системе в качестве термопластин и термопрокладок для высокотехнологичных электронных систем. В связи с этим в работе были рассмотрены более перспективные материалы, такие как арсенид бора. Для этого была составлена сравнительная таблица характеристик теплопроводности и плотности материалов [14] (табл. 1).

Таблица 1
Характеристики различных материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, г/см ³
Арсенид бора	1300	5,22
Алюминий	237	2,70
Железо	94	7,87
Золото	323	19,30
Медь	413	8,92
Серебро	430	10,49
Алмаз	2000	3,55

Из анализа табл. 1 следует, что алмаз по своим теплопроводящим свойствам является идеальным материалом для отвода тепла, а в совокупности с небольшой массой из-за низкой плотности может использоваться в сложных тепловых системах для высокотехнологичных образцов электронной аппаратуры. Но стоимость алмаза как элемента теплоотвода ставит рациональность его использования под вопрос, поэтому в работе предлагается рассмотреть возможность использования арсенида бора для данных видов электроники. Физические свойства и тепловые характеристики арсенида бора наиболее близки к показателям алмаза, но стоимость его производства значительно ниже, чем стоимость технических алмазов.

Для качественной и наглядной оценки физических свойств материалов построим диаграммы параметров характеристик теплопроводности и плотности исследуемых материалов (рис. 1, 2).

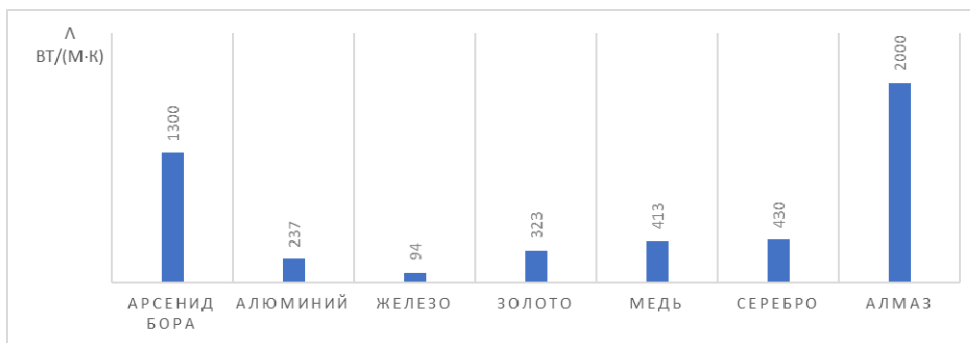


Рис. 1. Параметры теплопроводности исследуемых материалов

Анализ диаграмм позволяет экспертным путем оценить высокие показатели теплопроводности у материала арсенида бора и алмаза. Из рис. 1 следует, что наиболее эффективными, а следовательно, и перспективными материалами для микроэлектроники являются арсенид бора и алмаз. Из рис. 2 отметим низкую плотность арсенида бора по сравнению с другими

материалами, которая может уступать только алмазу. Исходя из общего анализа исследуемых материалов делаем вывод, что основные параметры материалов – коэффициент теплопроводности и плотность арсенида бора и алмаза – наилучшим образом подходят для производства термопрокладок в микроэлектронике, которые могут стабильно поддерживать тепловой режим сложных электронных устройств [3].

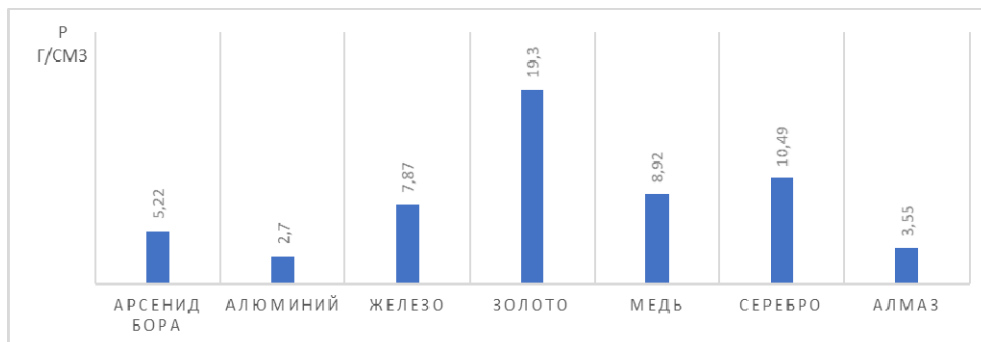


Рис. 2. Параметры плотности исследуемых материалов

На следующем этапе было проведено численное моделирование теплового режима на примере модуля процессорной платы, который используется в широком спектре устройств для военной и космической отраслей.

На рис. 3 можно увидеть поперечное сечение и расположение элементов RK3568J и RK809-5 в программном пакете ANSYS 20.0 модуль *Icepak*. На алюминиевой крышке корпуса устанавливаются теплоотводы, которые плотно прилегают к крышке. Между элементом и теплоотводом устанавливается теплопроводная прокладка КПТД 2М/3 толщиной 1 мм.

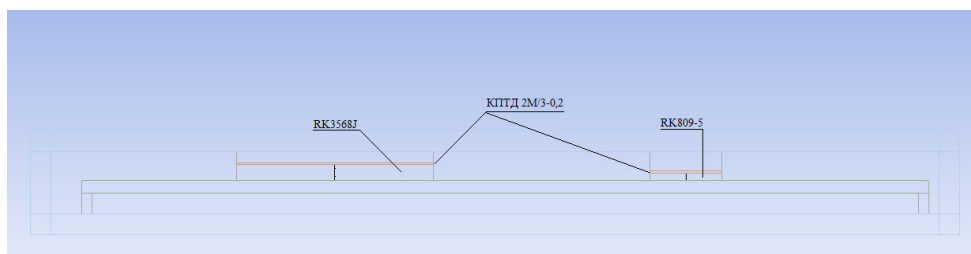


Рис. 3. Поперечное сечение устройства с модулем процессорным

Моделирование проводится на устройстве, выполненном в алюминиевом корпусе. В устройстве горизонтально установлен модуль процессорный АТБ-RK3568J с габаритными размерами $82 \times 50 \times 6,4$ мм. Габаритные размеры модуля процессорного АТБ-RK3568J вместе с корпусом устройства: $90 \times 60 \times 10$ мм. Корпус устройства герметичный и невакуумируемый, следовательно охлаждение прибора – естественная конвекция. Рабочая температура окружающей среды для модуля: плюс 40°C . Давление окружающей среды – нормальное (атмосферное). Допустимая средняя температура воздуха в приборе определяется минимальным значением повышенной рабочей температуры для используемых в приборе электронных компонентов: плюс 80°C .

Численное моделирование

Расчет теплового режима устройства проводился по ОСТ4 ГО.012.032, ОСТ4 ГО.012.014. При расчете использовалось программное обеспечение *ANSYS 20.0* модуль *Icserak*. В основе тепловых расчетов лежат математические законы, описывающие тепловые процессы. Основными уравнениями для описания тепловых процессов являются уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u = f(r, t), \quad (1)$$

и уравнение Навье – Стокса (2) для описания конвекции:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{v} \cdot (\nabla \vec{v}) + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}. \quad (2)$$

Для того чтобы найти частные решения указанных уравнений, необходимо иметь дополнительные данные. Этими данными являются граничные и начальные условия, которые в совокупности с геометрией исследуемого тела и физическими свойствами материалов называются краевыми условиями. В случае стационарного температурного поля начальные условия не задаются.

Граничные условия для стационарной задачи будут задаваться распределением температур на границе, в нашем случае температура будет постоянной по всей границе области расчета.

Расчет теплового режима проведен при продолжительной эксплуатации устройства в составе объекта [4]. Результаты расчета среднеобъемной температуры воздуха в устройстве, а также температуры воздуха (корпуса/кристалла) у электрорадиоэлемента (ЭРЭ) в сравнении с допустимыми для них по техническим условиям температурами приведены в табл. 2 [5].

Таблица 2

Результаты расчета тепловых режимов с различными материалами

Материал	Наименование	Потребляемая (рассеиваемая) мощность, Вт	Результаты расчета температуры воздуха (корпуса) кристалла*, °C	Допустимая по ТУ температура воздуха (корпуса) кристалла*, °C
1	2	3	4	5
Без материала	Модуль:	5	68,6	80
	RK3568J	2,5	78,2 (97,8) 118,3*	80 125*
	RK809-5	1	74,3 (93,5) 113,2*	125*
Арсенид бора	Модуль:	5	60,1	80
	RK3568J	2,5	60,2 (64,9) 75,0*	80 125*
	RK809-5	1	59,2 (67,2) 71,6*	125*
Алюминий	Модуль:	5	61,0	80
	RK3568J	2,5	60,7 (65,8) 76,0*	80 125*
	RK809-5	1	60,3 (68,2) 72,7*	125*
Железо	Модуль:	5	61,9	80
	RK3568J	2,5	63,8 (67,7) 78,0*	80 125*
	RK809-5	1	62,1 (70,4) 74,7*	125*

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Золото	Модуль:	5	60,9	80
	RK3568J	2,5	60,7 (65,7) 75,9*	80 125*
	RK809-5	1	59,9 (68,0) 72,5*	125*
Медь	Модуль:	5	60,8	80
	RK3568J	2,5	60,6 (65,6) 75,8*	80 125*
	RK809-5	1	59,8 (67,9) 72,4*	125*
Серебро	Модуль:	5	60,7	80
	RK3568J	2,5	60,5 (65,5) 75,7*	80 125*
	RK809-5	1	59,7 (67,9) 72,4*	125*
Алмаз	Модуль:	5	60,0	80
	RK3568J	2,5	61,0 (66,1) 74,2*	80 125*
	RK809-5	1	60,4 (68,4) 71,0*	125*

Результаты расчета теплового режима модуля процессорной платы показали, что значение среднеобъемной температуры перегрева материалов имеют следующие значения. Арсенид бора – 20,1 °С; алюминий – 21,0 °С; железо – 21,3 °С; золото – 20,9 °С; медь – 20,8 °С; серебро – 20,7 °С; алмаз – 20 °С; без термопрокладки температура перегрева составляет 28,6 °С. Из анализа данных о температурах перегрева следует, что теплоотвод (радиатор) из арсенида бора имеет высокие показатели эффективности отвода тепла от критических частей модуля процессорной платы. Следует отметить, что другие исследуемые материалы также проявляют высокие теплоотводящие свойства в данной конструкции, но имеют в среднем на 3 % большую температуру перегрева на самом кристалле конструкции. Характер распределения тепловых полей без теплоотвода представлен на рис. 4, где наглядно показана эпюра критических мест температурных перегревов.

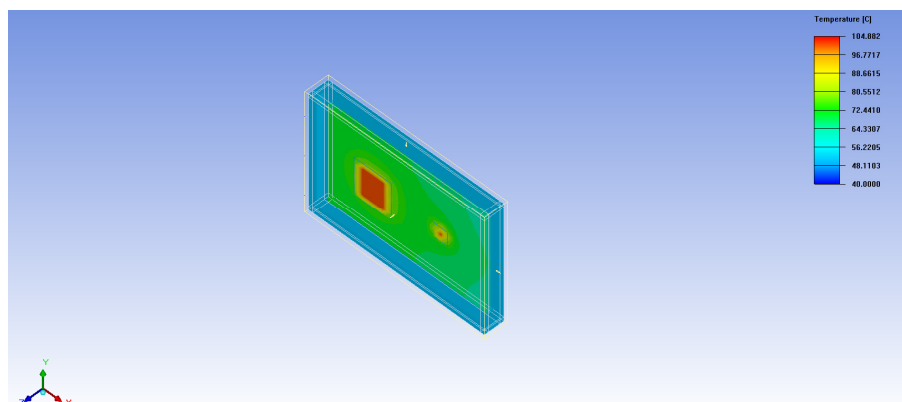


Рис. 4. Результаты расчета тепловых режимов без теплоотвода

Из рис. 4 следует, что в исследуемом устройстве значения температур микросхем RK3568J и RK809-5 близки к температурам перегрева воздуха, а температура кристалла по техническим условиям выходит за пределы допустимых значений. Для нормализации теплового режима устройства следует обеспечить нормальный отвод тепла от микросхем для предотвращения отказа и выхода их из строя. Для этого проведем моделирование устройства с термопрокладками из различных материалов.

Из рис. 5 следует, что тепловой режим устройства модуля процессорной платы при использовании теплоотвода во всех случаях имеет тенденцию к нормализации, однако наиболее эффективным является материал арсенида бора. Благодаря своим высоким характеристикам теплопроводности материал арсенид бора позволяет с высокой степенью отводить тепло от микросхем RK3568J и RK809-5 и обеспечивать нормальный тепловой режим всего устройства в целом.

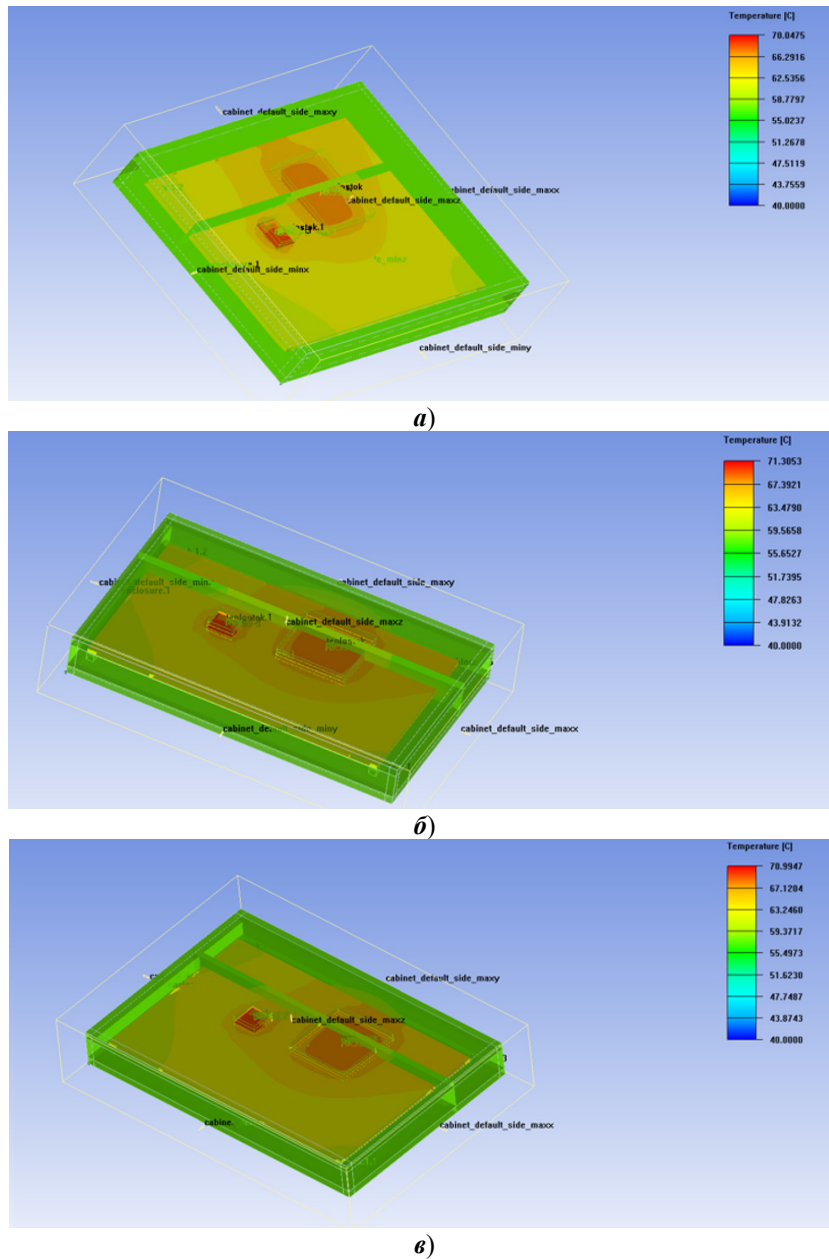
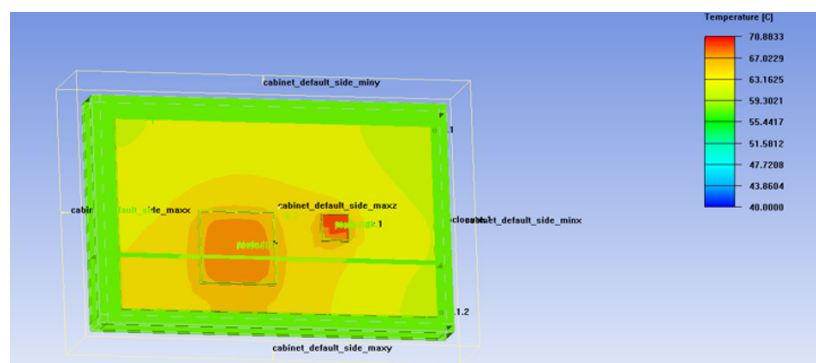


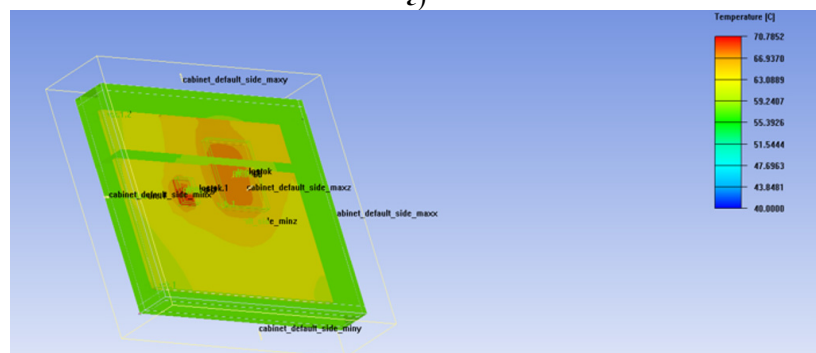
Рис. 5. Результаты расчета тепловых режимов с различными материалами:

а – арсенид бора; *б* – алюминий; *в* – железо; *г* – золото;

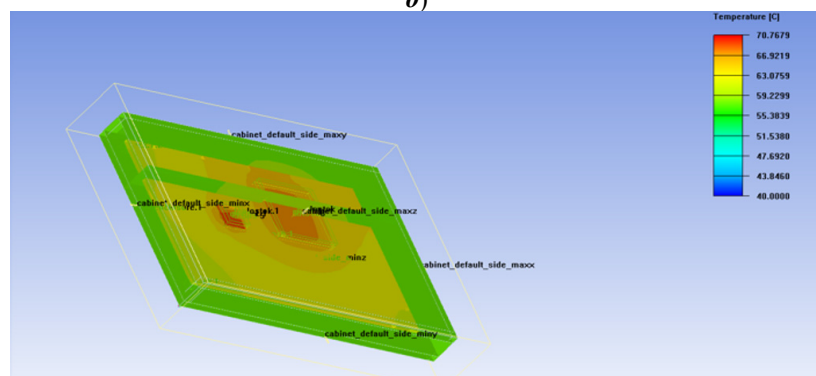
д – медь, *е* – серебро, *ж* – алмаз



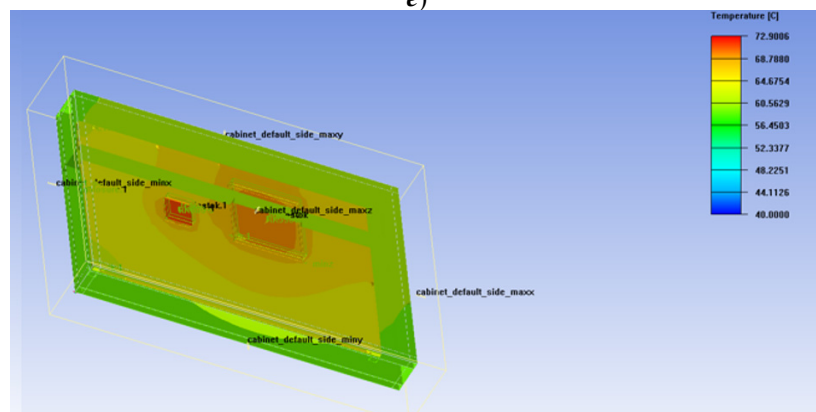
с)



д)



е)



ж)

Рис. 5. Окончание

Анализ диаграммы на рис. 6 показывает, что применение теплоотвода на процессорах RK3568J и RK809-5 в виде теплоотвода из любого из исследуемых материалов позволяет нормализовать тепловой режим всего устройства при повышенных рабочих температурах в условиях агрессивных внешних воздействующих факторов. Но особым преимуществом обладает теплоотвод из арсенида бора.

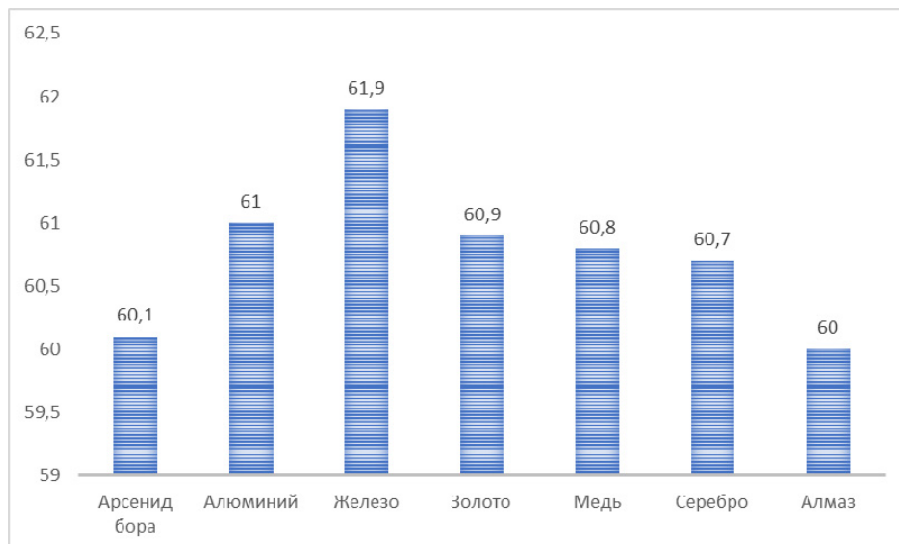


Рис. 6. Сравнительная диаграмма расчета температур перегрева различных материалов

Заключение

В результате проведенных исследований по разработке и оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из различных видов материалов для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности были выделены преимущества арсенида бора для использования в качестве теплопроводящего материала.

Также были подтверждены и обобщены теплопроводные характеристики арсенида бора, которые позволяют сделать вывод о предпочтительности использования данного вида материала для теплоотвода в радиоэлектронных устройствах. Высокая теплопроводность арсенида бора играет ключевую роль в обеспечении эффективного охлаждения и поддержании стабильной работы электронных компонентов.

Испытания арсенида бора показали наиболее результативную динамику снижения высоких температур в условиях повышенной нагрузки, что может сделать его востребованным для сложных тепловых систем и высокотехнологичных образцов электронной аппаратуры. Проведенный анализ подчеркивает преимущества арсенида бора перед другими материалами и увеличивает его потенциал в повышении производительности и надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Рекомендуются дальнейшие исследование и внедрение арсенида бора в различные электронные устройства с учетом его положительного влияния на

тепловой режим и общего повышения тепловой эффективности радиоэлектронной аппаратуры.

Таким образом, в работе подтверждены выдвинутые научно-технические предложения по использованию арсенида бора, позволяющие оптимизировать тепловые системы радиоэлектронной аппаратуры с теплоотводом из исследуемого материала.

Список литературы

1. Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Степченков О. В. [и др.]. Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 63–75. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75 EDN: ESKVQE
2. Алдонин Г. М., Алешечкин А. М., Валиханов М. М., Желудько С. П., Тронин О. А. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. 360 с.
3. Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Ланин В. Л., Левин В. Г. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов // Доклады БГУИР. 2014. № 4 (82). С. 16–22.
4. Басов К. А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование. М. : ДМК Пресс, 2006. С. 240.
5. ANSYS Costumer Portal // ANSYS. URL: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (дата обращения 03.03.2024).
6. Алхадж Хасан А., Газизов Т. Р. Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 37–51. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-37-51 EDN: ORYUIH
7. Rybakov I. M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models // 2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky, TSCZh 2022. 2022. P. 50–53.
8. Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Броستيлов С. А., Герасимова Ю. Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 36–45. doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
9. Иофин А. А., Боков А. С. Конструктивные пути повышения надежности бортовых радиоэлектронных систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 44–49. EDN: FZVUDA
10. Аброськин Н. С., Данилова Е. А., Жумашев Н. Г. Анализ современных средств тепловизионного исследования // Современные информационные технологии. 2017. № 2. С. 639–645.
11. Вершинин Е. А., Кузнецов С. Д., Данилова Е. А. Анализ эффективности термоинтерфейса и контактной площадки в отводе тепла: сравнительное исследование // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 2. С. 72–74. EDN: PTRXQK
12. Горячев Н. В., Лысенко А. В., Петрянин Д. Л., Граб И. Д., Андреев П. Г. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных средств // Ульяновский центр трансфера технологий : сб. аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа. Ульяновск : УлГТУ, 2009. С. 96–98.

13. Горячев Н. В., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. Методика однокритериального выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018) : сб. докладов. СПб., 2018. Т. 1. С. 397–400.
14. Критериальные уравнения теплообмена: расчет теплоотдачи в трубах и каналах. URL: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006> (дата обращения 03.03.2024).
15. Яновский А. А., Каныгин Я. В. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-4. С. 496–498. URL: <https://eduherald.ru/article/view?id=14148> (дата обращения 03.03.2024).

References

1. Piskun G.A., Alekseev V.F., Stepchenkov O.V. et al. The influence of the configuration and shape of the outer ribs of sealed housings of technical means on the efficiency of heat removal from the processor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;26(5):63–75. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75 EDN: ES-KVQE
2. Aldonin G.M., Aleshechkin A.M., Valikhanov M.M., Zhelud'ko S.P., Tronin O.A. *Osnovy konstruirovaniya i tekhnologii radioelektronnykh sredstv = Fundamentals of design and technology of radio-electronic means.* Krasnoyarsk: IPTs SFU, 2011:360. (In Russ.)
3. Piskun G.A., Alekseev V.F., Lanin V.L., Levin V.G. Modeling of temperature distribution in current-carrying elements of integrated circuits as a result of exposure to electrostatic discharges. *Doklady BGUIR = Proceedings of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.* 2014;(4):16–22. (In Russ.)
4. Basov K.A. *ANSYS i LMSVirtualLab. Geometricheskoe modelirovanie = ANSYS and LMSVirtualLab. Geometric modeling.* Moscow: DMK Press, 2006:240. (In Russ.)
5. ANSYS Costumer Portal. *ANSYS.* Available at: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (accessed 03.03.2024).
6. Alkhadzh Khasan A., Gazizov T.R. Comparison of measured frequency responses of printed circuit boards with modal redundancy before and after failure at different temperatures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = University proceedings of Russia. Radioelectronics.* 2023;26(2):37–51. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-37-51 EDN: ORYUIH
7. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models. *2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2022.* 2022:50–53.
8. Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. Information-measuring and control system for thermophysical modeling of electronic equipment parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
9. Iofin A.A., Bokov A.S. Design methods for increasing the reliability of onboard electronic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2022;1:44–49. (In Russ.). EDN: FZVUDA
10. Abros'kin N.C., Danilova E.A., Zhumashev N.G. Analysis of modern means of thermal imaging research. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies.* 2017;(2):639–645. (In Russ.)

11. Vershinin E.A., Kuznetsov S.D. et al. Analysis of thermal interface and contact pad efficiency in heat dissipation: comparative study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;2:72–74. (In Russ.). EDN: PTRXQK
12. Goryachev N.V., Lysenko A.V., Petryanin D.L., Grab I.D., Andreev P.G. Studying thermal conditions of radio electronic equipment. *Ulyanovskiy tsentr transfera tekhnologii: sb. annotatsiy projektov Molodezhnogo innovatsionnogo foruma Privolzhskogo federal'nogo okruga = Ulyanovsk Center for Technology Transfer: collection of abstracts of projects of the Volga Federal District Youth Innovation Forum*. Ulyanovsk: UIGTU, 2009:96–98. (In Russ.)
13. Goryachev N.V., Rybakov I.M., Yurkov N.K. Methodology of single-criteria selection of heat sink for discrete heat-loaded electronic radio products. *XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2018): sb. dokladov = The 21st International conference on soft computing and measurements (SCM-2018): collected reports*. Saint Petersburg, 2018;1:397–400. (In Russ.)
14. *Kriterial'nye uravneniya teploobmena: raschet teplootdachi v trubakh i kanalakh = Heat transfer criteria equations: calculation of heat transfer in pipes and channels*. (In Russ.). Available at: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006> (accessed 03.03.2024).
15. Yanovskiy A.A., Kanygin Ya.V. Mathematical modeling and development of cooling systems for personal computer processors. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2015;(3-4):496–498. (In Russ.). Available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14148> (accessed 03.03.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Илья Михайлович Рыбаков

кандидат технических наук, доцент
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rybakov_im@mail.ru

Ilya M. Rybakov

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of design and production of radio
equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Егор Андреевич Вершинин

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: egor.vershinin2011@yandex.ru

Egor A. Vershinin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.05.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.07.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024

УДК 621.317.73

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-8

Измерительная установка для определения параметров многоэлементных электрических цепей

А. В. Светлов¹, А. С. Колдов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы – разработка многофункциональной измерительной установки для определения параметров нерезонансных и резонансных электрических цепей. *Материалы и методы.* В основе работы измерительной установки лежит совокупный метод измерений, при этом электрические параметры (индуктивность, емкость, сопротивление) нерезонансных электрических цепей определяются по результатам анализа выходного напряжения измерительной цепи во временной области, а резонансных электрических цепей – в частотной области. *Результаты.* Приведены структурная схема измерительной установки и расчетные соотношения для определения электрических параметров ряда трех- и четырехэлементных электрических цепей. *Выводы.* Показана возможность нахождения параметров как нерезонансных, так и резонансных электрических цепей с использованием одной измерительной установки.

Ключевые слова: измерительная установка, нерезонансные и резонансные электрические цепи

Для цитирования: Светлов А. В., Колдов А. С. Измерительная установка для определения параметров многоэлементных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 78–88. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-8

A measurement installation for determining multi-element electrical circuit parameters

A.V. Svetlov¹, A.S. Koldov²

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

¹rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop a multifunction measurement installation to determine parameters of non-resonant and resonant electrical circuits. *Materials and methods.* The installation procedure is based on a combined measurement method, wherein the electrical parameters (inductance, capacitance, and resistance) of non-resonant electrical circuits are determined by analyzing the output voltage of the measuring circuit in the time domain, and those of resonant electrical circuits – in the frequency domain. *Results.* A block diagram for the measurement installation and calculated relationships to determine the electrical parameters of three- and four-element electrical circuits are presented. *Conclusions.* The likelihood of finding both non-resonant and resonant electrical circuit parameters using a single measurement installation is shown.

Keywords: measurement installation, non-resonant and resonant electrical circuits

For citation: Svetlov A.V., Koldov A.S. A measurement installation for determining multi-element electrical circuit parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pov-*

Введение

Для представления электрических свойств множества физических объектов используются эквивалентные двухполюсные электрические схемы, в простейшем случае – двухэлементные, отображающие эквивалентные активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления объекта. При необходимости более полного анализа электрических свойств объекта в частотной или временной областях используются эквивалентные электрические схемы с большим числом элементов (три или четыре) [1, 2].

В зависимости от характера (апериодический или колебательный) переходных процессов при коммутации электрических цепей (ЭЦ) различают нерезонансные и резонансные ЭЦ. Резонансные ЭЦ характеризуются наличием резонансов токов или напряжений в рабочей области частот. Апериодический переходный процесс в нерезонансных ЭЦ представляется совокупностью постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих напряжений без затухающих гармонических колебаний.

Для определения параметров многоэлементных резонансных и нерезонансных ЭЦ традиционно используются разные измерительные установки, отличающиеся как по составу аппаратной части (измерительного оборудования), так и по средствам математической обработки результатов измерительного эксперимента.

Важной и актуальной задачей является разработка на основе современных достижений измерительной техники универсальной, многофункциональной измерительной установки для определения параметров любых многоэлементных ЭЦ. При этом переход от аналоговых преобразований выходных напряжений измерительных цепей к программной обработке сигналов позволяет существенно упростить аппаратную часть установки и избежать накопления погрешностей вследствие последовательного выполнения ряда аналоговых преобразований.

1. Структурная схема измерительной установки для определения параметров многоэлементных электрических цепей

При разработке многофункциональной измерительной установки для определения параметров многоэлементных ЭЦ предложено использовать совокупные измерения [3–5] как единую методологическую основу нахождения параметров нерезонансных и резонансных ЭЦ. При этом:

- для преобразования сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение ее включают в состав измерительной цепи (ИЦ), построенной на основе операционного усилителя (ОУ);

- при измерении параметров нерезонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые импульсные сигналы и выполняют измерения ряда отсчетов выходного напряжения ИЦ в характерные моменты времени от начала переходного процесса в ИЦ;

- при измерении параметров резонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые синусоидальные сигналы и выполняют измерения ряда частот, соответствующих характерным точкам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ЭЦ, а также выходного напряжения ИЦ на этих частотах;

– составляют и решают систему уравнений, связывающих искомые электрические параметры элементов нерезонансных ЭЦ с результатами анализа выходного напряжения ИЦ во временной области, а резонансных ЭЦ – в частотной области.

Для практической реализации перечисленных действий в состав измерительной установки должны входить следующие блоки (рис. 1):

1. ИЦ на быстродействующем ОУ с входным каскадом на полевых транзисторах, обеспечивающим высокое входное сопротивление. Исследуемая ЭЦ (резонансная или нерезонансная) и опорный элемент (резистор или конденсатор) подключаются к клеммам во входной цепи ОУ или в цепи его отрицательной обратной связи (ООС). Информация о месте включения исследуемой ЭЦ и характере сопротивления опорного элемента приведена ниже. При отсутствии гальванической связи между входом и выходом ОУ устойчивость режима работы ОУ обеспечивается включением в его обратной связи фильтра нижних частот (ФНЧ) или периодически замыкаемого аналогового ключа.

2. Формирование тестовых импульсных сигналов прямоугольной или треугольной формы с заданными амплитудой и периодом повторения, а также синусоидальных сигналов с заданными амплитудой и частотой осуществляется генератором прямого цифрового синтеза DDS, управляемого программно или вручную оператором.

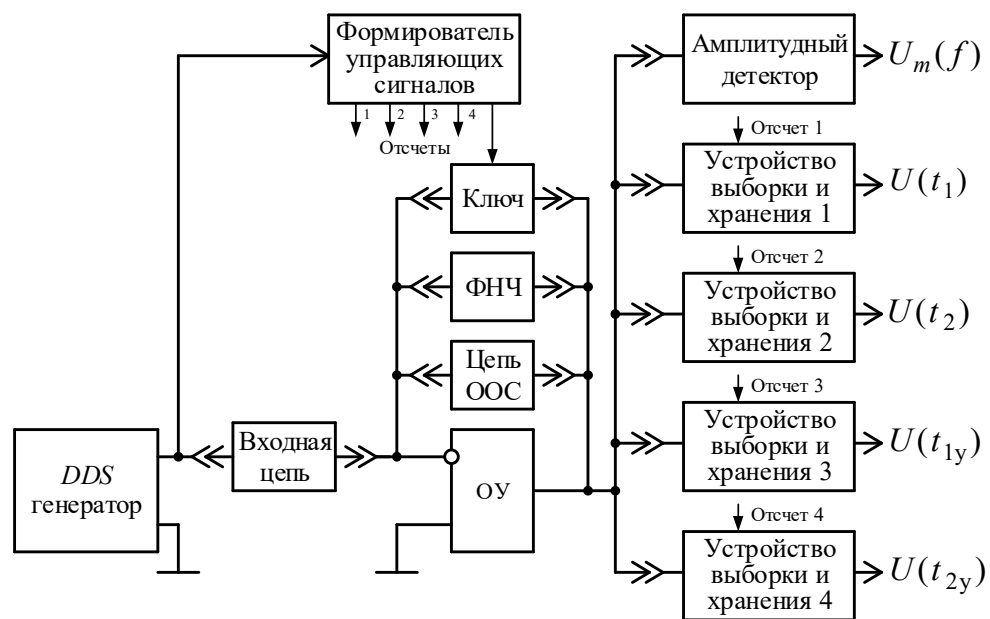


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки для определения параметров многоэлементных электрических цепей

3. Измерение амплитуд $U_m(f)$ синусоидального выходного напряжения ИЦ на частотах, соответствующих характерным точкам АЧХ резонансных ЭЦ, осуществляется с помощью амплитудного детектора.

4. При измерении параметров нерезонансных ЭЦ отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_1)$, $U(t_2)$ на экспоненциальном участке переходного

процесса в ИЦ осуществляются с помощью устройств выборки и хранения 1 и 2; отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$ на установившемся участке переходного процесса в ИЦ (после практического завершения экспоненциального переходного процесса) осуществляются с помощью устройств выборки и хранения 3 и 4.

5. Формирователь управляющих сигналов задает значения времени задержки отсчетов 1–4 от начала переходного процесса.

Выходные напряжения амплитудного детектора и устройств выборки и хранения 1–4 измеряются цифровым вольтметром.

2. Определение параметров четырехэлементных нерезонансных ЭЦ

Для определения параметров элементов нерезонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые импульсные сигналы и выполняют анализ выходного напряжения ИЦ во временной области. Полученные с помощью устройств выборки и хранения значения отсчетов выходного напряжения ИЦ в некоторые характерные моменты времени от начала переходного процесса в ИЦ подставляются в систему уравнений, связывающих эти значения отсчетов напряжения с параметрами постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих выходного напряжения ИЦ функционально связанных с параметрами элементов ЭЦ [3]. Кроме получения упомянутых отсчетов, больше никаких аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ не производится. Важными достоинствами такого построения измерительной установки являются простота аппаратной реализации и отсутствие накопления погрешностей при последовательном выполнении ряда аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ [6, 7].

При определении параметров многоэлементных нерезонансных RC -, RL - и RLC -цепей целесообразно использовать единый формат представления выходного напряжения ИЦ с помощью обобщенных A -параметров [3]. В частности, в случае четырехэлементных нерезонансных ЭЦ [8] выходные напряжения ИЦ могут быть представлены в одном из видов:

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \quad (1)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (2)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3)$$

где A_0 [В] – постоянная составляющая напряжения; A_1 [В/с] – крутизна линейно изменяющейся составляющей напряжения; A_2 [В] – начальное значение спадающей экспоненциальной составляющей; A_3 [В] – конечное (установившееся) значение возрастающей экспоненциальной составляющей; τ [с] – постоянная времени экспоненциальных составляющих напряжения.

Для определения параметров четырехэлементных нерезонансных ЭЦ в соответствии с методом совокупных измерений необходимо составить и

решить системы из четырех уравнений упомянутого вида для четырех моментов времени, отсчитываемых от начала апериодического переходного процесса в ИЦ:

– моменты времени t_1 , t_2 выбираются на экспоненциальном участке переходного процесса;

– моменты времени t_{1y} и t_{2y} – в установившемся режиме, после практического завершения экспоненциального переходного процесса.

Рекомендации по выбору моментов отсчетов выходного напряжения ИЦ с учетом получаемой методической погрешности определения A -параметров приведены в [9].

Параметры A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , τ составляющих выходного напряжения ИЦ находятся в результате решения систем уравнений (1)–(3) с подставленными измеренными значениями отсчетов напряжения $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$. Решения систем уравнений могут быть найдены численными методами в среде MathCAD или вычислены по полученным методом подстановки формулам, приведенным в [8]. Искомые значения параметров элементов ЭЦ могут быть найдены с учетом функциональных зависимостей между ними и A -параметрами выходного напряжения ИЦ. Такие зависимости для ряда четырехэлементных нерезонансных ЭЦ приведены в табл. 1 и 2, где также даны схемы ИЦ, показан вид тестового импульсного сигнала, характер сопротивления опорного элемента и вид уравнения (1)–(3), описывающего выходное напряжение ИЦ.

3. Определение параметров резонансных ЭЦ

Резонансные ЭЦ характеризуются частотными параметрами (резонансные частоты, добротность) и электрическими параметрами (индуктивность, емкость, сопротивление), измеренными в резонансной области частот. Структура предлагаемой измерительной установки позволяет измерить как частотные, так и электрические параметры резонансных ЭЦ.

Для определения частотных параметров трехэлементных резонансных ЭЦ на вход ИЦ подают тестовые синусоидальные сигналы, измеряют частоты, соответствующие характерным точкам АЧХ ЭЦ, а также выходные напряжения ИЦ на этих частотах. В качестве таких частот выступают резонансная частота f_0 и частоты f' и f'' ниже и выше резонансной частоты f_0 , при которых амплитуда выходного напряжения ИЦ составляет 0,707 от максимального напряжения U_{m0} на резонансной частоте. По измеренным частотам определяют добротность: $Q = f_0 / (f'' - f')$.

Искомые электрические параметры элементов резонансных ЭЦ: индуктивность L , емкость C и сопротивление R , определяются в результате решения системы трех уравнений, полученных в результате приравнивания математических выражений, описывающих резонансную частоту f_0 , максимальное напряжение на выходе ИЦ U_{m0} и добротность Q , их измеренным значениям [10].

Таблица 1

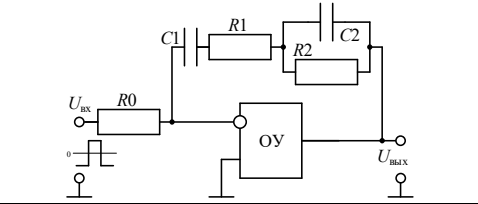
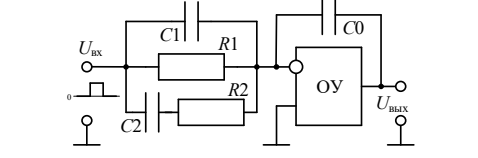
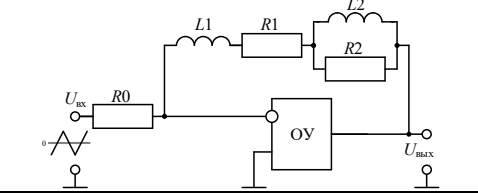
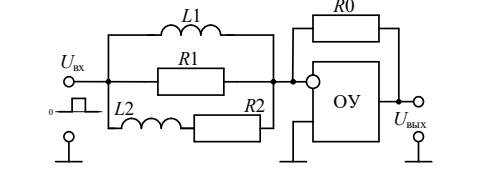
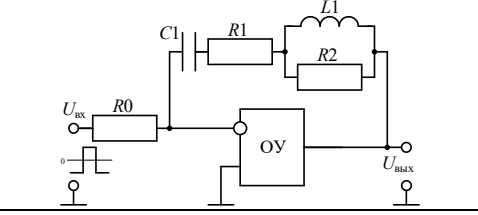
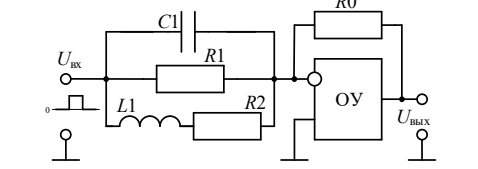
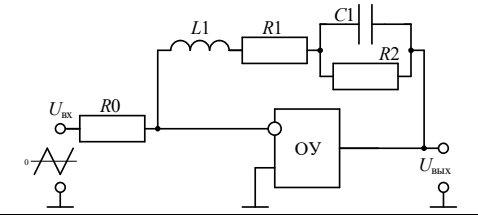
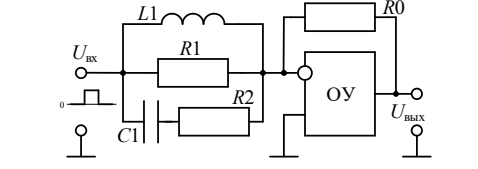
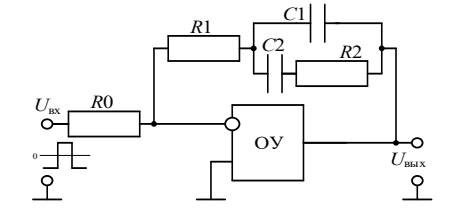
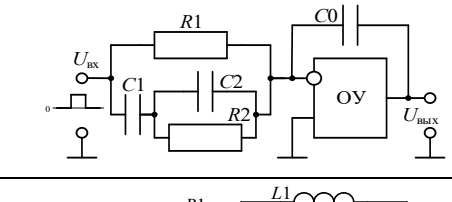
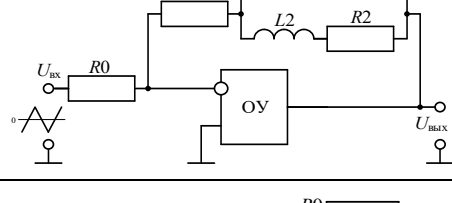
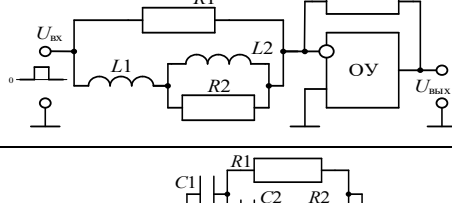
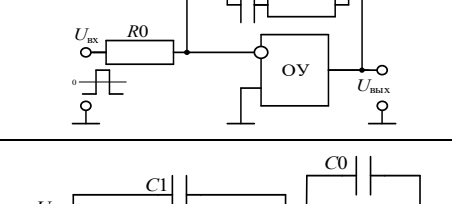
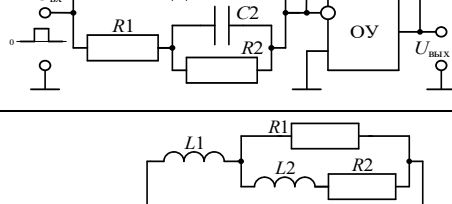
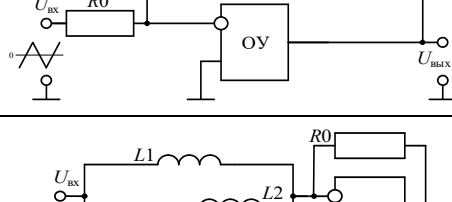
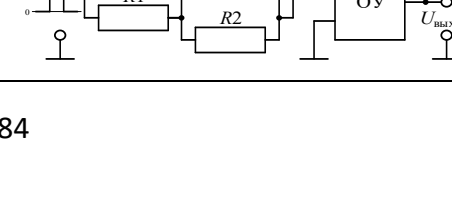
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$
		$C_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 R_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$
		$C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{\tau U_0}{A_3 C_0}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$
		$L_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
		$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$
	ур-е вид2	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$
		$L_1 = \frac{A_2 R_0 \tau}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 R_0}{U_0}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_1 \tau - A_3)}$
		$L_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 C_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 C_0}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{(A_1 \tau - A_3) R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
		$C_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 R_0 \tau_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$
	ур-е вид2	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$
		$C_1 = \frac{A_2 \tau}{U_0 R_0}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_2}$

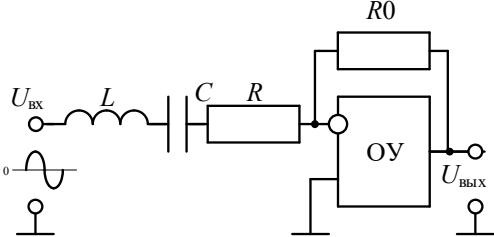
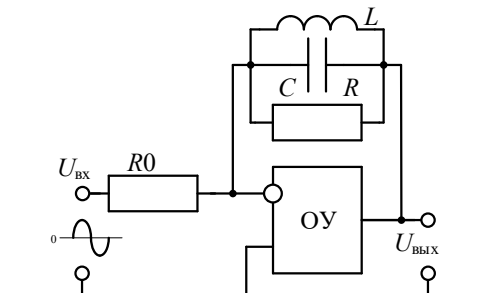
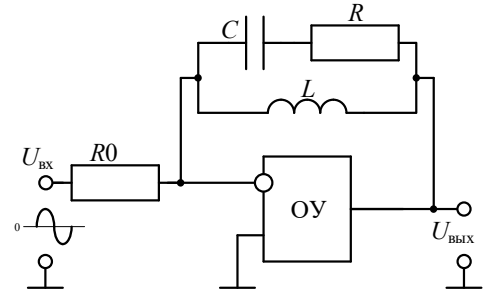
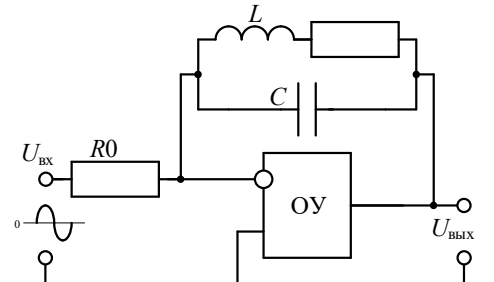
Таблица 2

	ур-е вид1	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$
		$C_1 = \frac{U_0 \tau}{R_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$
	ур-е вид3	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$	$C_2 = \frac{A_2 A_3 C_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
		$C_1 = \frac{A_3 C_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 C_0}$
	ур-е вид3	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{A_2 A_3 R_0 \tau_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
		$L_1 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3^2 R_0 \tau_0}{U_0 \tau (A_3 - A_2)}$
	ур-е вид1	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$	$L_2 = \frac{U_0 A_3 R_0}{A_1 (A_3 + A_1 \tau)}$
		$L_1 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3 + A_1 \tau}$	$R_2 = \frac{A_3 U_0 R_0}{(A_3 + A_1 \tau)^2}$
	ур-е вид3	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$C_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 R_0}$
		$R_1 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 A_3 R_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
	ур-е вид1	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{C_0 (A_3 + A_1 \tau)^2}{A_3 U_0}$
		$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$
	ур-е вид1	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau)^2 \tau_0}{U_0 A_3}$
		$R_1 = \frac{R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{U_0 \tau}$	$R_2 = \frac{A_1 R_0 (A_3 + A_1 \tau) \tau_0}{A_3 U_0}$
	ур-е вид3	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2}$
		$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0 (A_3 - A_2)}{A_2 A_3}$

Эта система уравнений, как и в случае нерезонансных ЭЦ, может быть решена численными методами или методом подстановки с получением аналитических соотношений для непосредственного вычисления электрических параметров ЭЦ L , C , R по измеренным значениям частотных параметров.

В табл. 3 приведены схемы ИЦ для определения параметров ряда трехэлементных резонансных ЭЦ, а также формулы для вычисления искомых параметров ЭЦ.

Таблица 3

	$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}}$
	$C = \frac{U_{m0}}{2\pi U_0 f_0 R_0 Q}$
	$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0}$
	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
	$L = \frac{U_{m0} R_0}{2\pi U_0 f_0 Q}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0 \cdot (Q^2 + 1)}{U_0 \cdot (Q^2 - 1)^2}$
	$C = \frac{U_0 \cdot (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q \cdot (Q^2 + 1)}$
	$L = \frac{U_{m0} R_0 \cdot (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q \cdot (Q^2 - 1)}$
	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0 (Q^2 + 1)}$
	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
	$L = \frac{U_{m0} R_0 Q}{2\pi U_0 f_0 (Q^2 + 1)}$

Рассматриваемая измерительная установка может использоваться для определения параметров не только трехэлементных, но и четырехэлементных резонансных ЭЦ с применением методики, изложенной в [11, 12] на примере

ЭЦ, показанной на рис. 2 (эквивалентная электрическая схема изделий из пьезоматериалов). При этом измеряются следующие частотные параметры ЭЦ: резонансная частота f_0 (частота последовательного резонанса), максимальное напряжение на выходе ИЦ U_{m0} , добротность Q , частота антирезонанса f_1 (частота параллельного резонанса). Для определения четырех электрических параметров ЭЦ составляется и решается система четырех уравнений, связывающих формулы для расчета частотных параметров ЭЦ с их измеренными значениями.

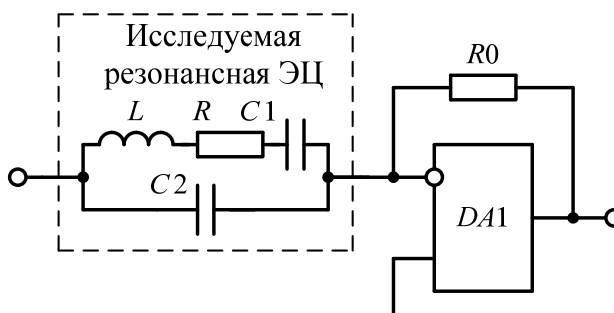


Рис. 2. ИЦ для измерения параметров четырехэлементных резонансных ЭЦ

Экспериментальные исследования блоков разработанной многофункциональной измерительной установки [5, 7, 11, 12] показали возможность определения параметров различных нерезонансных и резонансных ЭЦ, изображенных в табл. 1–3 и на рис. 2, при вариации параметров элементов ЭЦ в установленных диапазонах с относительной погрешностью не более $\pm 2\%$, что сопоставимо с погрешностями специализированных средств измерений параметров ЭЦ конкретных видов.

Заключение

Разработана многофункциональная измерительная установка для определения параметров многоэлементных нерезонансных и резонансных ЭЦ. Приведены расчетные соотношения для определения электрических параметров ряда трех- и четырехэлементных ЭЦ по результатам совокупных измерений, выполняемых с помощью разработанной установки. Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями и схемотехническим моделированием измерительных цепей с помощью программы PSpice.

Список литературы

1. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шлядин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
2. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
3. Светлов А. В., Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78.

4. Светлов А. В., Колдов А. С. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. Т. 1. С. 145–149.
5. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Совокупные измерения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 3. С. 68–77.
6. Светлов А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В. Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4. С. 76–84.
7. Светлов А. В., Колдов А. С. Оценивание погрешностей определения параметров нерезонансных электрических цепей по результатам совокупных измерений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 2. С. 59–68.
8. Светлов А. В., Колдов А. С. Определение параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 3. С. 39–47.
9. Светлов А. В., Андреев А. Н., Казаков В. А., Светлов Д. А. Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы // Измерительная техника. 1999. № 8. С. 19–22.
10. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 39–47.
11. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
12. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 69–75.

References

1. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Electrical parameter converters for control and measurement systems*. Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)
2. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov = Determination of parameters of multi-element two-terminal networks*. Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
3. Svetlov A.V., Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V. Aggregate measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.)
4. Svetlov A.V., Koldov A.S. Methodology of aggregate measurements of parameters of resonant electric circuits. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t = Problems of automation and control in technical systems: proceedings of the 33rd International scientific and engineering conference (Penza, May 22–23, 2019): in 2 volumes*. Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:145–149. (In Russ.)
5. Svetlov A.V., Nguen N.M. Aggregate measurements of parameters of three-element resonant electric circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Po-volzhskiy region. Tekhnicheskies nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2020;(3):68–77. (In Russ.)
6. Svetlov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V. Evaluation of random errors of measuring transducers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(4):76–84. (In Russ.)

7. Svetlov A.V., Koldov A.S. Estimation of errors in determining the parameters of non-resonant electrical circuits based on the results of combined measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2019;(2):59–68. (In Russ.)
8. Svetlov A.V., Koldov A.S. Determination of parameters of non-resonant four-element electrical circuits based on the results of combined measurements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(3):39–47. (In Russ.)
9. Svetlov A.V., Andreev A.N., Kazakov V.A., Svetlov D.A. Determination of the parameters of two-terminal networks based on the values of discrete readings of the output voltage of the measuring circuit. *Izmeritel'naya tekhnika = .* 1999;(8):19–22. (In Russ.)
10. Svetlov A.V., Nguen N.M. Determination of parameters of resonant electric circuits based on the results of measurements of resonant frequency and quality factor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(3):39–47. (In Russ.)
11. Svetlov A.V., Nguen N.M. Measuring the parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;(3):83–92. (In Russ.)
12. Svetlov A.V., Nguen N.M. Determination of parameters of products made of piezoelectric materials represented by resonant four-element equivalent circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):69–75. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Вильевич Светлов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Anatoliy V. Svetlov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Сергеевич Колдов

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Aleksandr S. Koldov

Engineer of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.12.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 13.05.2024

Принята к публикации / Accepted 29.06.2024

УДК 621.311.4-52

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-9

Автоматизированная система регулирования выходных напряжений электрических подстанций радиальной системы электроснабжения

В. Н. Ашанин¹, А. А. Доспехов², М. А. Кожевников³

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Проектное бюро «Гражданпроект», Пенза, Россия

³Филиал ПАО «Россети Волга» – «Пензаэнерго», Пенза, Россия

¹ashanin58@yandex.ru, ²adospehov@mail.ru, ³eltech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В соответствии с требованиями нормативных документов одним из важнейших требований к качеству электрической энергии является постоянный уровень напряжения на выходе трансформаторных подстанций при изменении нагрузок в течение суток. Регулирование коэффициента трансформации одной из подстанций может привести к изменению напряжений на высокой стороне других подстанций, входящих в единую систему электроснабжения. Поэтому процедуру регулирования коэффициентов трансформации подстанций необходимо рассматривать в совокупности. Целью работы является разработка автоматизированной системы регулирования выходных напряжений подстанций системы электроснабжения в различных режимах работы с учетом взаимодействия между подстанциями из условия получения на стороне потребителей значений напряжений, соответствующих требованиям правил устройства электроустановок (ПУЭ) и ГОСТ 32144–2013. *Материалы и методы.* Представлен анализ распределения напряжения вдоль радиальной системы электроснабжения при различных номинальных напряжениях линий передач и регулирование параметров системы с использованием методики расчета коэффициентов трансформации силовых трансформаторов из условия обеспечения на шинах подстанций напряжений в соответствии с требованиями ПУЭ и ГОСТ 32144–2013. Проведен анализ разработанной модели в системе MathCad. *Результаты.* Данные компьютерного эксперимента показали полное соответствие уровней выходных напряжений трансформаторов подстанции требованиям ПУЭ и ГОСТ 32144–2013. *Выводы.* Разработанные алгоритм и программа расчета коэффициентов трансформации силовых трансформаторов может быть использована как для радиальных, так и для более сложных конфигураций систем электроснабжения.

Ключевые слова: автоматизированная система регулирования, электроснабжение, линия электропередачи, подстанция, трансформатор, качество электроэнергии, регулирование под нагрузкой

Для цитирования: Ашанин В. Н., Доспехов А. А., Кожевников М. А. Автоматизированная система регулирования выходных напряжений электрических подстанций радиальной системы электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 89–97. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-9

Automated system for regulating output voltages of electrical substations of the radial power supply system

V.N. Ashanin¹, A.A. Dospekhov², M.A. Kozhevnikov³

© Ашанин В. Н., Доспехов А. А., Кожевников М. А., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

¹Penza State University, Penza, Russia

²Design bureau "Grazhdanproekt", Penza, Russia

³Branch of PJSC "Rosset-Volga" – "Penzaenergo", Penza, Russia

¹ashanin58@yandex.ru, ²adospehov@mail.ru, ³eltech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* In accordance with the requirements of regulatory documents, one of the most important requirements for the quality of electrical energy is a constant voltage level at the output of transformer substations when loads change throughout the day. Regulating the transformation ratio of one of the substations can lead to a change in voltages on the high side of other substations that are part of a single power supply system. Therefore, the procedure for regulating transformation ratios of substations must be considered in its entirety. The purpose of the work is to develop an automated system for regulating the output voltages of substations of the power supply system in various operating modes, taking into account the interaction between substations from the condition of obtaining voltage values on the consumer side that meet the requirements of the electrical installation rules and GOST 32144-2013. *Materials and methods.* An analysis of the voltage distribution along the radial power supply system at various rated voltages of transmission lines and the regulation of system parameters using the methodology for calculating the transformation ratios of power transformers from the condition of ensuring voltages on the substation buses in accordance with the requirements of the electrical installation rules and GOST 32144-2013 are presented. The developed model was analyzed in the MatCad system. *Results.* The computer experiment data showed full compliance of the output voltage levels of the substation transformers with the requirements of the electrical installation rules and GOST 32144-2013. *Conclusions.* The developed algorithm and program for calculating transformation ratios of power transformers can be used for both radial and more complex configurations of power supply systems.

Keywords: automated control system; electricity supply; power line; substation; transformer; power quality; regulation under load

For citation: Ashanin V.N., Dospekhov A.A., Kozhevnikov M.A. Automated system for regulating output voltages of electrical substations of the radial power supply system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):89–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-9

Введение

В энергосистемах относительно небольшой мощности значение выходного напряжения силовых трансформаторов электрических подстанций в основном зависит от изменения мощности потребителей. Для поддержания необходимого уровня напряжения используются регуляторы напряжения под нагрузкой (РПН). Однако регулирование напряжения отдельной подстанции (ПС), входящей в состав единой системы энергоснабжения, может привести к изменению уровней напряжения на выходе соседних ПС, поэтому проблему обеспечения выходного напряжения ПС в составе единой системы энергоснабжения необходимо решать комплексно.

Для крупных энергосистем, содержащих мощные электрические станции и подстанции, предъявляются более жесткие системные требования, которые определяются устойчивостью параллельной работы электрических станций, повышением надежности функционирования релейной защиты, повышением пределов мощности, передаваемой по нагруженным линиям.

Таким образом, поставленная задача сводится к созданию системы централизованного управления терминалами регулирования выходных напряже-

ний на трансформаторах подстанций системы электроснабжения в различных режимах работы из условия получения на стороне потребителей значений напряжений, соответствующих требованиям правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1] и ГОСТ 32144–2013¹ с учетом взаимодействия между подстанциями и дискретности РПН. Широкое применение распределенной альтернативной энергетики в мировой практике наряду с традиционной привело к разработке интеллектуальных энергосистем, получивших название Smart Grid и представляющих собой модернизированные электрические сети с использованием информационных и коммуникационных технологий для сбора информации о состоянии всех активных элементов сети – электрических станций и распределительной сети с учетом потребления электроэнергии.

В Российской Федерации проводятся аналогичные исследования и разработки в этой области [2–4], в частности, известны теоретические сведения о разработке интеллектуальных распределительных сетей с дистанционным регулированием уровня напряжения на выходе ПС через дистанционно управляемые устройства компенсации реактивной мощности [5, 6], которые широкого практического применения не получили из-за сложности их реализации на имеющемся оборудовании ПС. Однако сегодня отечественной промышленностью освоен выпуск автоматических терминалов управления РПН, что позволяет технически реализовать централизованное автоматическое регулирование выходных напряжений ПС в составе единой системы энергоснабжения.

Разработка системы регулирования

Развитие отечественной системы регулирования напряжения распределительных сетей происходило в условиях низкой наблюдаемости. Классическая постановка задачи расчета установившегося режима была мало приемлема для моделирования текущих и ретроспективных режимов ПС из-за отсутствия точной информации о нагрузках узлов.

Однако при оснащении электрических подстанций современными приборами контроля, обеспечивающими дистанционное измерение электрических параметров энергосистемы, определяющих качество поставляемой потребителям электрической энергии, возможно обеспечить эффективное централизованное управление параметрами силовых трансформаторов ПС, входящих в единую систему энергоснабжения.

Математические основы расчета коэффициентов силовых трансформаторов радиальной системы электроснабжения, оборудованных системой РПН, из условия обеспечения требуемых уровней напряжения на шинах низкого напряжения предложена в работе [7]. Для реализации предложенной методики расчета разработана обобщенная структурная схема автоматизированной системы регулирования (АСР) выходных напряжений силовых трансформаторов системы электроснабжения, представленная на рис. 1, в которой осуществляется централизованное управление регулированием напряжения на трансформаторах системы с помощью терминалов управления [8].

¹ ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы регулирования выходных напряжений трансформаторов подстанций

Работа АСР осуществляется в три этапа:

1. Сбор и передача данных в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУ ТП).
2. Обработка входных данных и получение выходных данных.
3. Передача выходных данных на терминалы управления.

Первый этап работы алгоритма – сбор и передача информации о значениях напряжений и нагрузок потребителей в сети, а также о текущих положениях ступеней РПН трансформаторов системы, для чего используются терминалы управления регулятором напряжения, закрепленные за каждым трансформатором.

Сбор и передача входных данных в АСУ ТП осуществляется в соответствии с блок-схемой алгоритма, представленной на рис. 2.

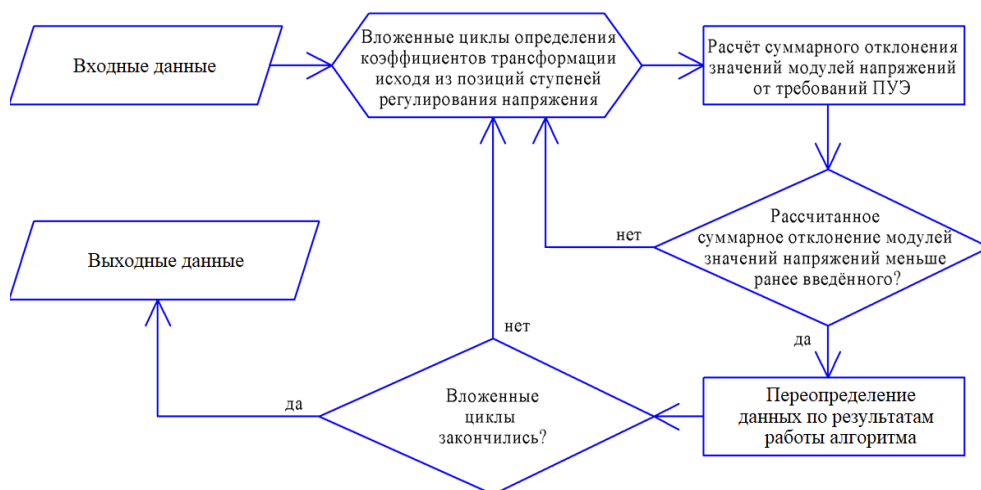


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки входных данных

Для перехода к этапу обработки входных данных также необходимы исходные данные, которые не изменяются в течение работы системы:

1) схема расположения питающих ПС, трансформаторов и линий электропередачи (ЛЭП) системы электроснабжения;

2) продольные и поперечные составляющие проводимостей ЛЭП системы электроснабжения;

3) проводимости обмоток и цепей намагничивания трансформаторов ПС системы электроснабжения. В соответствии с конфигурацией системы электроснабжения разрабатывается система уравнений, отображающих связь между исходными, входными и выходными данными. Число уравнений в системе равно числу трансформаторов.

С целью подстройки и оптимизации алгоритма для рассматриваемой системы электроснабжения дополнительно к перечисленным пунктам исходными данными могут выступать графики нагрузок, отражающие тенденции их изменения в течение времени. В зависимости от характера и диапазона изменений значений нагрузок и конфигурации системы электроснабжения возможно исключение вложенных циклов обработки информации, в которых нет необходимости, что приведет к увеличению быстродействия и упрощению алгоритма работы системы.

При практической реализации программного обеспечения получены основные теоретические соотношения, применяемые при расчете режимов работы системы энергоснабжения в среде MathCad. Сами соотношения, как и вся система уравнений, разработаны на основе метода контурных токов для расчета сложных электрических цепей. В качестве примера ниже приведено уравнение для определения тока пятого независимого контура электроснабжения, сложность полученного выражения обусловлена количеством переменных. В данном уравнении учтены параметры шести трансформаторов трех ПС, обозначенных индексами «Ю», «М» и «Г», через положение ступени РПН для каждого из них. Соответственно таких уравнений для определения токов в системе энергоснабжения еще пять (рис. 3).

После приема входных данных исходя из положения ступеней РПН выполняются вложенные циклы определения коэффициентов трансформации и расчет суммарного отклонения значений модулей напряжений для каждой позиции. Если рассчитанное суммарное отклонение меньше предыдущего, то система записывает результаты расчетов и данные для сравнения с результатами работы следующих вложенных циклов. По окончании вложенных циклов полученные данные, а именно положение ступеней РПН, обеспечивающих минимальное отклонение уровней напряжений от заданных, передаются на терминалы управления регулятором напряжения каждого трансформатора в системе энергоснабжения. Ввиду дискретности регулирования по результатам расчетов отклонение напряжения от требуемого значения не превысит половины значения ступени РПН.

Алгоритм определения расчетных значений коэффициентов трансформации трансформаторов системы электроснабжения в среде MathCad, которые обеспечивают минимальное отклонение выходных напряжений от расчетных значений, полученных ранее, представлен на рис. 4.

В представленном примере алгоритма исходно заложено, что система РПН трансформаторов обеспечивает регулирование напряжений с дискретностью в 1,78 %, а РПН имеет 19 положений регулятора i [9, 10].

$$\begin{aligned}
 I_5(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}, n_{\text{Ю}3}, n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) = \\
 U_2 - \frac{U_1 \cdot Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3}) \cdot Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})}{(Z_{Ls1} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})) \cdot (Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) + Z_{Ls2} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})) - Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2} - U_2 \\
 \frac{Z_{Ls3} + Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) + Z_{Ls2} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{Ls1} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})}}}{Z_{Ls3}} \\
 U_1 - Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}) - \frac{Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}) + Z_{Ls6} + Z_{Ls3}}{Z_{Ls3}} - \frac{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})^2}{Z_{Ls3} + Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) + Z_{Ls2} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{Ls1} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})}}}, \\
 = \\
 \frac{Z_{Ls5} + Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}) - \frac{Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})^2}{Z_{Ls6} + Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) + Z_{Ls2} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{Ls1} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})}}}}}{Z_{Ls5} + Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}) - \frac{Z_{\text{Ю}12}(n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}})^2}{Z_{Ls6} + Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{\text{МГ}}(n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}) + Z_{Ls2} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3}) - \frac{Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})^2}{Z_{Ls1} + Z_{\text{Ю}3}(n_{\text{Ю}3})}}}}},
 \end{aligned}$$

где I_5 – действующее значение тока пятого независимого контура системы уравнений, описывающих состояние электрического равновесия сети; U_1, U_2 – действующие значения напряжений питающих ПС; $Z_{Ls1}, Z_{Ls2}, Z_{Ls3}$ – продольные составляющие комплексных сопротивлений ЛЭП системы электроснабжения; $n_{\text{Ю}1}, n_{\text{Ю}2}, n_{\text{Ю}3}, n_{\text{М}1}, n_{\text{М}2}, n_{\text{T}}$ – коэффициенты трансформации трансформаторов ПС «Ю», «М», «Г»; $Z_{\text{МГ}}, Z_{\text{Ю}12}$ – эквивалентные комплексные сопротивления узлов, включающих сопротивление короткого замыкания и цепей намагничивания трансформаторов ПС «Ю», «М» и «Г»; $Z_{\text{Ю}3}, Z_{\text{М}1}, Z_{\text{М}2}$ – эквивалентные комплексные сопротивления нагрузок и трансформаторов ПС «Ю» и «М».

Рис. 3. Уравнение для определения токов в системе энергоснабжения

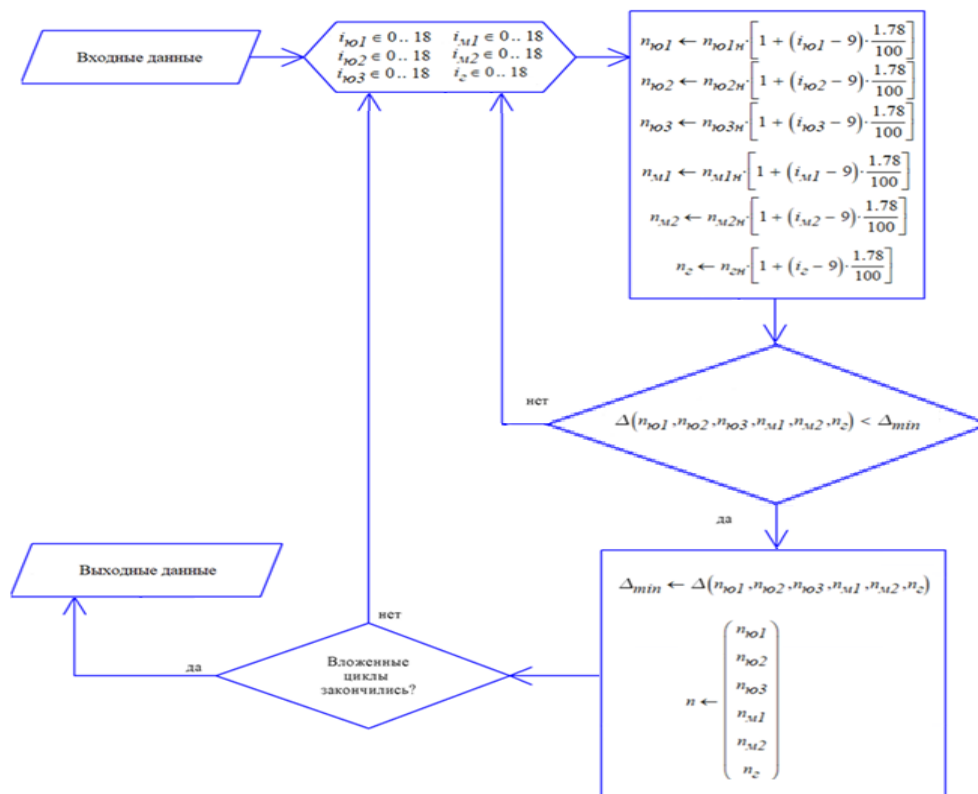


Рис. 4. Блок-схемы алгоритма определения коэффициентов трансформации:

$\Delta_{\min}$ – значение модуля суммарного отклонения напряжения;

$n_{ю1н}, n_{ю2н}, n_{ю3н}, n_{м1н}, n_{м2н}, n_{гн}$ – номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов ПС «Ю», «М» и «Г»; $\Delta(n_{ю1}, n_{ю2}, n_{ю3}, n_{м1}, n_{м2}, n_{г})$ – зависимость суммарного значения отклонения модулей значений напряжений от значений, соответствующих требованиям ПУЭ, от коэффициентов трансформации трансформаторов системы; $i_{ю1}, i_{ю2}, i_{ю3}, i_{м1}, i_{м2}, i_{г}$ – число ступеней РПН трансформаторов ПС «Ю», «М» и «Г»

Результаты анализа

Оптимальные положения ступеней РПН определяются после расчета всех возможных их комбинаций и сравнения суммарного отклонения напряжения от заданного. Для шести трансформаторов с 19 положениями ступеней РПН это более 47 млн решений системы уравнений, из которых определяется наиболее удовлетворяющее заданным требованиям. Быстродействие алгоритма зависит от сложности системы, числа переменных и характеристик компьютера, выполняющего роль центрального узла управления. Для радиальных систем электроснабжения с небольшим количеством трансформаторов расчет на современном компьютерном оборудовании может занять не более 1 мин.

Заключение

По окончании вложенных циклов полученные данные передаются на терминалы управления регулятором напряжения каждого трансформатора в системе электроснабжения. Ввиду дискретности регулирования по резуль-

татам расчетов отклонение напряжения от требуемого значения не превысит половины значения уставки нечувствительности, если оно является единственным для всех трансформаторов в системе. Ввиду свободно конфигурируемой логики терминалов управления [9] и предложенного алгоритма регулирования напряжения возможна разработка программы, минимизирующей износ системы РПН и ориентированной на тенденции изменений в графиках нагрузок ПС системы. Отметим, что разработанная АСР пригодна к использованию как для радиальных, так и для более сложных конфигураций систем электроснабжения.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2016. 160 с.
2. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС. URL: <http://eepr.ru/>
3. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. URL: <http://fsk-ees.ru>
4. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Редакция 5.0. М., 2012. 238 с. URL: <https://publications.hse.ru>
5. Kulmala A. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources // Tampere University of Technology. 2014. Vol. 1203. URL: <http://urn.fi/>
6. Кубарьков Ю. П., Кулаев И. С., Алехин Р. А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 3 (59). С. 154–164.
7. Горячев В. Я., Голобоков С. В., Доспехов А. А., Дошутин К. А. Расчет и регулирование выходных напряжений подстанций радиальной системы электроснабжения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Энергоэффективные и энергосберегающие технологии и системы. Саранск : Изд-во Мордовского университета, 2019. С. 203–211.
8. Терминал автоматического регулирования коэффициента трансформации под нагрузкой трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения и возможностью контроля величины напряжения у удаленного потребителя ЭКРА 217 1301. Руководство по эксплуатации ЭКРА.656122.036/217 1301 РЭ. 32 с.
9. Горячев В. Я., Бростилова Т. Ю., Шатова Ю. А., Голобоков С. В. Электроэнергетические системы и сети : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. 137 с.
10. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник : справочник / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. М. : Изд-во МЭИ, 2002. 964 с.

References

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). 7-e izd. = Electrical Installation Rules. The 7th edition.* Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2016:160. (In Russ.)
2. *Napravleniya razvitiya sistemy regulirovaniya napryazheniya i reaktivnoy moshchnosti v ENES = Directions for the development of the voltage and reactive power regulation system in the UNEG.* (In Russ.). Available at: <http://eepr.ru/>
3. *Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noy energosistemy s aktivno-adaptivnoy set'yu = Basic provisions of the concept of an intelligent energy system with an active-adaptive network.* (In Russ.). Available at: <http://fsk-ees.ru>
4. *Kontseptsiya intellektual'noy elektroenergeticheskoy sistemy s aktivno-adaptivnoy set'yu. Redaktsiya 5.0 = Concept of an intelligent electric power system with an active-adaptive network. Edition 5.0.* Moscow, 2012:238. (In Russ.). Available at: <https://publications.hse.ru>

5. Kulmala A. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources. *Tampere University of Technology*. 2014;1203. Available at: <http://urn.fi/>
6. Kubar'kov Yu.P., Kulaev I.S., Alekhin R.A. Optimization of voltage levels in active-adaptive networks with distributed generation. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Samara State Technical University. Series: Engineering sciences*. 2018;(3):154–164. (In Russ.)
7. Goryachev V.Ya., Golobokov S.V., Dospekhov A.A., Doshutin K.A. *Raschet i regulirovanie vykhodnykh napryazheniy podstantsiy radial'noy sistemy elektrosnabzheniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Energoeffektivnye i energosberegayushchie tekhnologii i sistemy = Calculation and regulation of output voltages of a substation of a radial power supply system: proceedings of the International scientific and practical conference "Energy efficient and energy saving technologies and systems"*. Saransk: Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2019:203–211. (In Russ.)
8. *Terminal for automatic regulation of the transformation ratio under load of a transformer with a split low-voltage winding and the ability to control the voltage value at a remote consumer EKRA 217 1301. User manual of EKRA.656122.036/217 1301 RE. 32 s.* (In Russ.)
9. Goryachev V.Ya., Brostilova T.Yu., Shatova Yu.A., Golobokov S.V. *Elektroenergeticheskie sistemy i seti: ucheb. posobie = Electric power systems and networks: textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2016:137. (In Russ.)
10. Gerasimov V.G. *Elektrotekhnicheskii spravochnik: spravochnik = Electrical engineering handbook: handbook*. Moscow: Izd-vo MEI, 2002:964. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Василий Николаевич Ашанин

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ashanin58@yandex.ru

Vasily N. Ashanin

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of electric power engineering and electrical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Александрович Доспехов

ведущий инженер, Проектное бюро
«Гражданпроект» (Россия,
г. Пенза, ул. Кирова, 55)

E-mail: adospehov@mail.ru

Aleksey A. Dospekhov

Leading engineer, Design bureau
“Grazhdanproekt” (55 Kirova street,
Penza, Russia)

Михаил Анатольевич Кожевников

кандидат технических наук, заместитель
начальника службы филиала
ПАО «Россети Волга» – «Пензаэнерго»
(Россия, г. Пенза, Пушкина, 1/2)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Mikhail A. Kozhevnikov

Candidate of engineering sciences,
deputy head of the service of the branch
of PJSC “Rosseti Volga” – “Penzaenergo”
(1/2 Pushkina street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 26.01.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 13.05.2024

Принята к публикации / Accepted 24.08.2024

УДК 681.586 (075)

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Источник питания беспроводных устройств информационно-измерительных и управляющих систем на основе усовершенствованного пьезоэлектрического виброгенератора

В. А. Бардин¹, В. С. Волков², С. Н. Базыкин³,
Н. А. Базыкина⁴, К. С. Самохина⁵, И. Н. Урваев⁶

^{1,2,3,4,5,6}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹vit-bardin@yandex.ru, ²vadimv_1978@mail.ru, ³cbazykin@yandex.ru,

⁴nelli.baz@mail.ru, ⁵kristina.bazykina@mail.ru, ⁶iurvaev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последние годы ведется поиск альтернативных источников электроэнергии, которые используют природные и техногенные источники энергии, такие как солнечное излучение, движение воды, ветер, вибрации и др. В настоящее время солнечные батареи и ветрогенераторы находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако существуют также объекты с малым энергопотреблением, такие как мелкая бытовая техника, мобильные телефоны, беспроводные системы для диагностики и мониторинга технического состояния объектов, другие автономные системы. Целью исследования является разработка пьезоэлектрического генератора изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала цирконат-титанат свинца с помощью микроэлектронной кремниевой технологии. *Материалы и методы.* Для исследования характеристик пьезоэлектрических генераторов изгибного типа были использованы методы расчета электрических цепей переменного тока, теории колебаний, а также схемотехническое моделирование эквивалентных электрических цепей при помощи программы MathCad, методы решения дифференциальных уравнений. *Результаты.* Была решена задача увеличения выходной мощности путем нахождения длины электрода, равной $x \approx 0,44 \cdot L$ (L – длина балки), т.е. покрывающего 44 % балки от зажатого конца; определены оптимальные геометрические параметры: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. В результате получена максимальная выходная мощность балочного пьезогенератора, достигающая 9,2 мВт. *Выводы.* Проведено математическое моделирование зависимостей мощности от геометрических параметров и получены соответствующие графики. Рассчитаны из условия прочности момент сопротивления, максимальный момент в сечении, сила, действующая на балку. Разработан пьезоэлектрический генератор изгибного типа с чувствительным элементом, изготовленным из материала цирконат-титанат свинца с помощью микроэлектронной кремниевой технологии.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь энергии, виброгенератор, беспроводной источник питания

Для цитирования: Бардин В. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Базыкина Н. А., Самохина К. С., Урваев И. Н. Источник питания беспроводных устройств информационно-измерительных и управляющих систем на основе усовершенствованного пьезоэлектрического виброгенератора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 98–114. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Power supply for wireless devices of information measuring and control systems based on an improved piezoelectric vibration generator

V.A. Bardin¹, V.S. Volkov², S.N. Bazykin³,
N.A. Bazykina⁴, K.S. Samohina⁵, I.N. Urvaev⁶

^{1,2,3,4,5,6}Penza State University, Penza, Russia

¹vit-bardin@yandex.ru, ²vadimv_1978@mail.ru, ³cbazykin@yandex.ru,

⁴nelli.baz@mail.ru, ⁵kristina.bazykina@mail.ru, ⁶iurvaev@mail.ru

Abstract. *Background.* In recent years, there has been a search for alternative sources of electricity that use natural and man-made energy sources, such as solar radiation, water movement, wind, vibration and others. On an industrial scale, solar panels and wind power plants are already widely used to harness environmental energy. However, there are also objects with low energy consumption, such as small household appliances, mobile phones, wireless systems for diagnosing and monitoring the technical condition of objects, and other autonomous systems. The purpose of the research is to develop a bending type piezoelectric generator with a sensing element made of lead zirconate titanate material using silicon microelectronic technology. *Materials and methods.* To study the characteristics of piezoelectric generators of the bending type, methods for calculating alternating current electrical circuits, the theory of oscillations, as well as circuit modeling of equivalent electrical circuits using the MathCad program, and methods for solving differential equations were used. *Results.* The problem of increasing the output power was solved by finding the length of the electrode reaching its peak $x \approx 0.44 \cdot L$ (L is the length of the beam), that is, covering 44 % of the beam from the clamped end, and the optimal geometric parameters were determined: length $L = 60 \cdot 10^{-3}$ m, width $W = 3 \cdot 10^{-3}$ m, thickness of the piezoelectric layer $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m, thickness of the substrate $h = 250 \cdot 10^{-6}$ m. As a result, the maximum output power of the beam piezoelectric generator is obtained, reaching 9.2 μ W. *Conclusions.* Mathematical modeling of the dependences of power on geometric parameters was carried out and graphs were obtained. The moment of resistance, the maximum moment in the section, and the force acting on the beam were calculated from the strength conditions. A bending type piezoelectric generator with a sensitive element made of PZT material using microelectronic silicon technology has been developed.

Keywords: piezoelectric energy converter, vibration generator, wireless power supply

For citation: Bardin V.A., Volkov V.S., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Samohina K.S., Urvaev I.N. Power supply for wireless devices of information measuring and control systems based on an improved piezoelectric vibration generator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):98–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Введение

Актуальной задачей является поиск альтернативных источников электроэнергии, которые используют природные и техногенные источники энергии, такие как солнечное излучение, движение воды, ветер, вибрации и др. В промышленных масштабах солнечные батареи и ветряные электростанции уже широко используются для использования энергии окружающей среды. Однако существуют также объекты с малым энергопотреблением, такие как мелкая бытовая техника, мобильные телефоны, беспроводные системы для диагностики и мониторинга технического состояния объектов, другие автономные системы. Все более популярными становятся «умные технологии», «интеллектуальные датчики», сервис-ориентированные архитектуры информационного взаимодействия датчиков для автоматической компенсации по-

грешностей [1]. Если на одном микромодуле объединить измеритель, усилитель, обработчик сигналов и радиомодуль, то появляется возможность создания автономных беспроводных информационно-измерительных и управляющих систем.

Для обеспечения автономности датчиков необходимо наличие собственного источника энергии, но традиционные химические источники энергии (батарея или аккумулятор) не обладают компактными размерами и требуют периодической замены.

Потребляемая мощность современных беспроводных устройств имеет значения от единиц микроватт, поэтому появляется возможность использования в качестве источника питания преобразователей энергии из окружающей среды (технология energy harvesting). Целью исследования является разработка пьезоэлектрического генератора изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала цирконат-титанат свинца (ЦТС) с помощью микроэлектронной кремниевой технологии.

Материалы и методы

Пьезоэлектрические преобразователи являются отличным альтернативным источником электроэнергии благодаря использованию распространенных в окружающей среде механических колебаний. Они обладают такими преимуществами, как высокая удельная мощность, компактные размеры, простота конструкции и технологии производства, легкость в использовании. Удельная мощность пьезогенератора зависит от его размеров и параметров входного сигнала. Пьезоэлектрические устройства имеют более широкий спектр применения по уровню удельной мощности, которая зависит от его размеров и параметров входного сигнала.

На рис. 1 показана схема преобразования энергии пьезоэлектрическим генератором. На рис. 2 показана электрическая схема системы получения и хранения энергии на основе пьезогенератора (ПГ). Вибрации, сопровождающие естественные и техногенные процессы и явления, амплитуда которых F изменяется с частотой f , вызывают колебания пьезопреобразователя, на выходе которого появляется электрический ток $I(t)$, пропорциональный амплитуде вибрации, выпрямитель, регулятор и накопитель преобразуют ток в однополярное напряжение $U(t)$, которое выделяет на сопротивлении нагрузки электрическую мощность $P(t)$.

На первом этапе переменное выходное напряжение преобразуется в постоянное с помощью выпрямительного моста. Далее это постоянное напряжение используется для зарядки батареи или накопительного конденсатора, которые подключены к нагрузке. Для оптимизации выходной мощности и согласования с нагрузкой можно использовать промежуточный преобразователь постоянного напряжения с возможностью повышения или понижения (рис. 3).

Результаты

Из существующих материалов, имеющих пьезоэлектрические свойства, широкое распространение получил цирконат-титанат свинца из-за его высокого пьезомодуля, значительной диэлектрической проницаемости, малой гигроскопичности, сравнительно большой электрической и механической проч-

ности. Для минимизации размеров пьезоэлементов при их изготовлении возможно использование кремниевых микроэлектронных технологий. Но так как кремний не обладает пьезоэлектрическими свойствами, то эти свойства ему придаются путем нанесения кристаллических слоев пьезоматериалов. Обычно в этом процессе применяются такие материалы, как оксид цинка (ZnO), нитрид алюминия (AlN) и цирконат-титанат свинца ($\text{Pb}[\text{Zr}_x, \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$). Тонкие пленки из нитрида алюминия обычно производятся методом химического осаждения из газовой фазы или реактивной эпитаксии. Более перспективным материалом для создания пьезогенераторов являются тонкие пленки из ЦТС, так как они обладают наибольшим пьезомодулем.

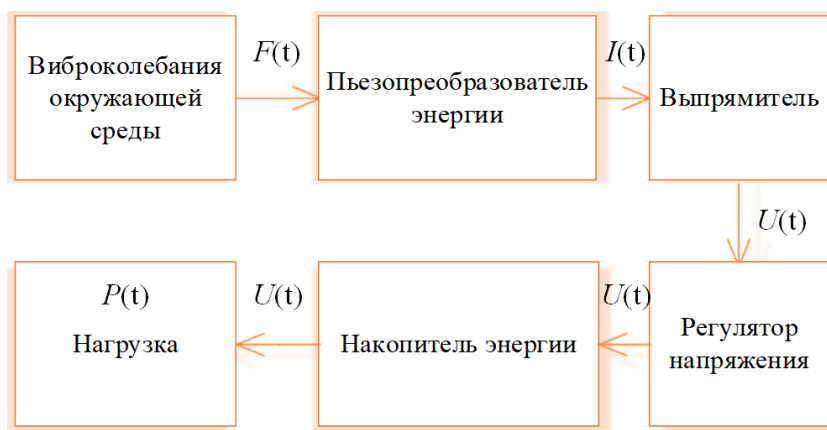


Рис. 1. Схема преобразования энергии пьезоэлектрическим генератором

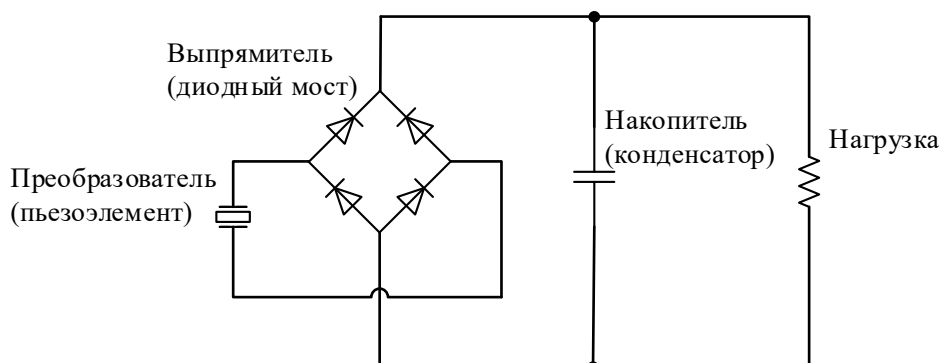


Рис. 2. Электрическая схема накопительной системы с использованием пьезогенератора

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента показана на рис. 3, схема состоит из конденсатора C_0 – статическая емкость между электродами пьезоэлемента, катушки индуктивности L – динамическая индуктивность, конденсатора C – динамическая емкость, и резистора R – динамическое сопротивление.

Основными конструктивными типами пьезоэлектрических преобразователей являются балочные и мембранные. Балочный преобразователь состо-

ит из упругого элемента, который представляет собой консольную балку в виде подложки с покрытием из пьезоэлектрического материала и двумя электродами (рис. 4). Один конец упругого элемента жестко прикреплен к массивному основанию, что позволяет ему осуществлять изгибные колебания.

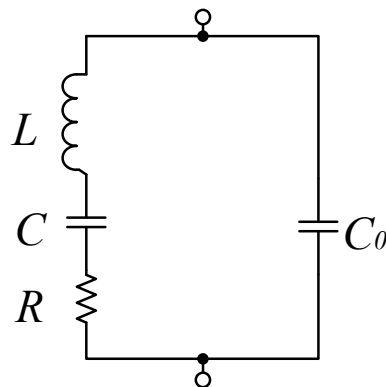


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента

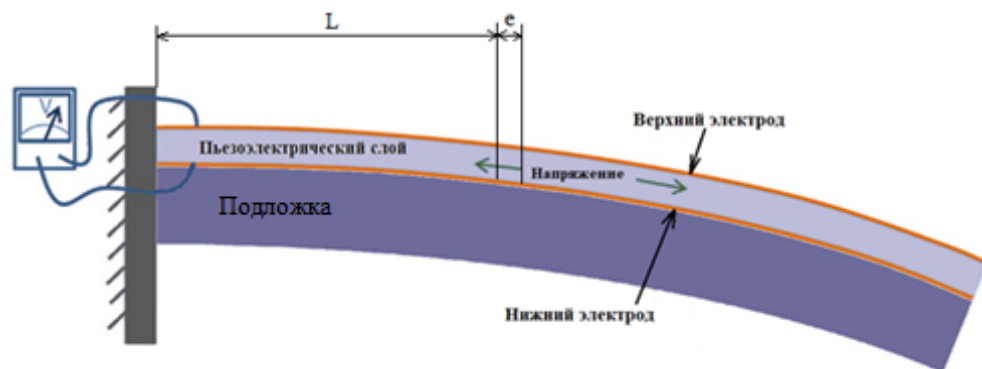


Рис. 4. Пьезокерамический преобразователь энергии

В большинстве известных конструкций пьезопреобразователей весь пьезоэлектрический слой с двух сторон покрывают два электродных слоя, чтобы извлечь как можно больше энергии. Однако компьютерное моделирование распределения деформации в пьезоэлектрическом слое зажатой балки показало, что при ее колебании максимальная деформация наблюдается в месте заземления и очень незначительна – на свободном конце (рис. 5).

При этом большая площадь электрода приводит к большой емкости и малому внутреннему сопротивлению. Соответственно электродами должна быть покрыта область пьезоэлектрика вблизи зажатого конца (из-за высокой плотности деформации в этой области), но свободный конец целесообразно электродами не закрывать. Таким образом, из-за неравномерного распределения деформации вдоль оси x должно существовать оптимальное значение площади электрода, позволяющее максимизировать генерируемую мощность. Для проверки этой гипотезы выполним математическое моделирование пьезоэлектрического преобразователя.

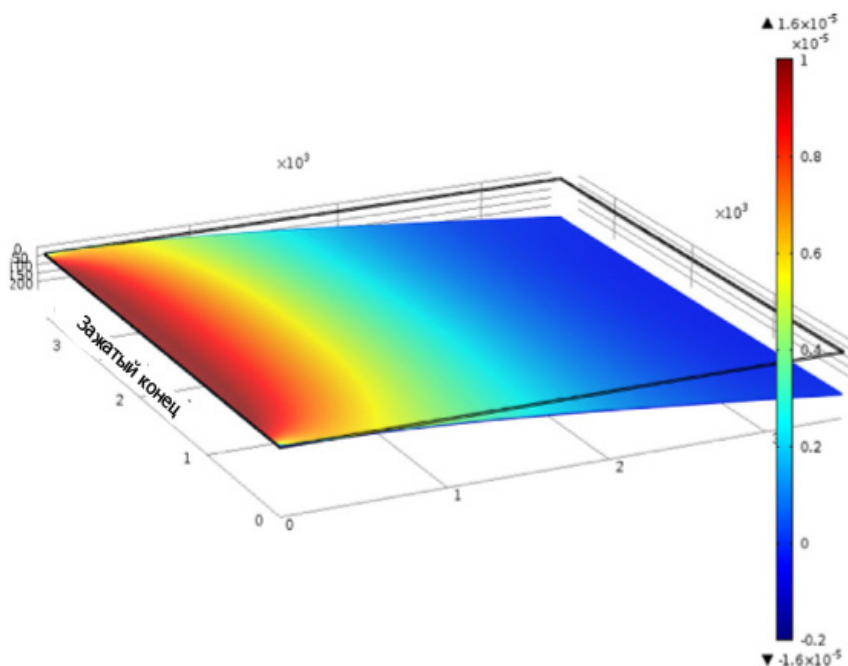


Рис. 5. Распределение деформации балки

Особенностью пьезоэлектрического преобразователя является то, что он проявляет свойства механической и электрической систем. Во время вибрации пьезоэлемента генерируется переменное напряжение, которое определяется по формуле

$$U = \frac{-dt}{\varepsilon} \sigma, \quad (1)$$

где t – толщина пьезоэлектрического материала; ε – диэлектрическая проницаемость среды; σ – механическое напряжение.

Электрический заряд, который вырабатывает пьезоэлектрический элемент под действием внешнего напряжения, формирует поток, который работает как источник тока и заряжает конденсатор, образуемый двумя электродными слоями (обкладками) на противоположных поверхностях пьезоэлемента. Запишем выражение для управляющего синусоидального сигнала источника тока:

$$I = I_0 \sin 2\pi f_0 t, \quad (2)$$

где f_0 – частота возбуждения.

Формула электрической мощности, генерируемой пьезоэлектрическим генератором, записывается в виде

$$P = \frac{1}{2} I_0^2 Z_{int}, \quad (3)$$

где I_0 – амплитуда источника тока; Z_{int} – эквивалентное внутреннее сопротивление.

Рассчитаем максимальную выходную мощность и найдем оптимальную длину электрода пьезоэлектрического преобразователя в виде зажатой балки.

На рис. 6 показана консольная балка с геометрическими параметрами, которые будут использоваться в расчетах.

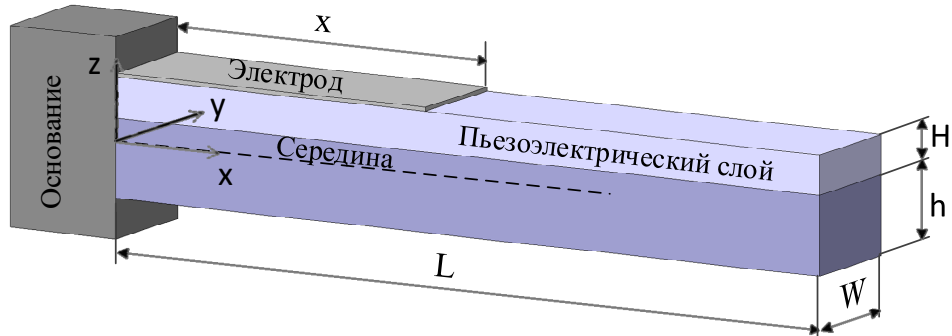


Рис. 6. Геометрические параметры балки (L – длина, W – ширина, h – толщина подложки, H – толщина пьезоэлектрического слоя)

На зажатой балке Эйлера – Бернулли происходит смещение по оси z в произвольной точке x , которая выражается в виде многочлена q :

$$EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = q(t), \quad (4)$$

где E – модуль Юнга; I – осевой момент инерции; $\omega(x)$ – поперечное смещение балки в произвольной точке x .

Осевой момент инерции рассчитывается по формуле

$$I = \int \int z^2 dy dz = \int_{-\frac{h+H}{2}}^{\frac{h+H}{2}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} z^2 dy dz = \frac{W(h+H)^3}{12}. \quad (5)$$

Предполагая, что сила возбуждения $F = F_0 \sin \omega_0 t$ равномерно распределена вдоль оси x , смещение q может быть выражено как

$$q(t) = \frac{F}{L} = \frac{F_0}{L} \sin \omega_0 t. \quad (6)$$

Из теории изгиба балки Эйлера – Бернулли выражение (6) не зависит от x , y или z и его можно упростить:

$$\frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = \frac{q}{EI} = A. \quad (7)$$

После интегрирования формулы (7) получаем следующие выражения:

$$\frac{d^3 \omega(x)}{dx^3} = Ax + C_1; \quad (8)$$

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{1}{2}Ax^2 + C_1x + C_2; \quad (9)$$

$$\frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{1}{6}Ax^3 + \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3; \quad (10)$$

$$\omega(x) = \frac{1}{24}Ax^4 + \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4. \quad (11)$$

Исходя из граничных условий, начальные значения могут быть установлены как $\omega' = \omega = 0$ при зажатом конце и $\omega''' = \omega'' = 0$ на свободном конце. Таким образом, получены следующие четыре уравнения:

$$\frac{d^3\omega(L)}{dx^3} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2\omega(L)}{dx^2} = 0;$$

$$\frac{d\omega(0)}{dx} = 0;$$

$$\omega(0) = 0.$$

С помощью этих уравнений найдем: $C_1 = -A, C_2 = \frac{1}{2}AL^2, C_3 = 0, C_4 = 0$.

Подставим эти параметры в формуле (11), получим:

$$\omega(x) = \frac{1}{24}Ax^4 - \frac{1}{6}ALx^3 + \frac{1}{4}AL^2x^2; \quad (13)$$

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{1}{2}Ax^2 - ALx + \frac{1}{2}AL^2. \quad (14)$$

Прочность при изгибе балки можно выразить как

$$\sigma_{(x,y,z)} = \frac{Mz}{I}, \quad (15)$$

где M – изгибающий момент,

$$M = -EI \frac{d^2\omega(x)}{dx^2}. \quad (16)$$

Отсюда напряжение σ можно записать как

$$\begin{aligned} \sigma_{(x,y,z)} &= -zE \frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \\ &= -zE \left(\frac{1}{2}Ax^2 - ALx + \frac{1}{2}AL^2 \right) - z \frac{q}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\sigma(x, y, z)$ – напряжение на единицу площади (Н/м^2), а переменная z распространяется от начала координат вдоль оси z , как показано на рис. 6.

Для того чтобы преобразовать кинетическую энергию в электрическую энергию, при расчете используем пьезоэлектрический модуль d_{31} и выразим количество заряда, генерируемого деформацией:

$$Q_{(x,y,z)} = d_{31}\sigma_{(x,y,z)} = -zd_{31} \frac{q}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right). \quad (18)$$

Этот заряд генерируется на единицу площади $dx dy$ в пьезоэлектрическом материале. Для расчета суммарного заряда по двум слоям электродов (верхнему и нижнему), проинтегрируем $Q_{(x,y,z)}$ вдоль x, y для соответствующих значений z относительно середины балки $z_B = \frac{h+H}{2}$ и $z_H = \frac{h-H}{2}$ (предполагаем, что основание толще пьезоэлектрического слоя $h > H$):

$$Q_{\text{общ}} = \int_0^x \int_0^W Q_{(x,y,z)} dy dx, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{общ}} &= \int_0^x \int_0^W -Hd_{31} \frac{q(t)}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right) dy dx = \\ &= -q(t)d_{31} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 \pm \frac{1}{2}L^2x \right). \end{aligned} \quad (20)$$

По формуле (8), сила возбуждения $q(t)$ является функцией времени, следовательно генерируемый заряд:

$$Q_{\text{общ}} = -d_{31} \frac{F_0}{L} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 + \frac{1}{2}L^2x \right) \sin \omega_0 t. \quad (21)$$

Пьезоэлектрический преобразователь моделируется как источник тока I_p , включенный параллельно с конденсатором C_p и резистором R_p . Конденсатор C_p вместе с резистором R_p можно рассматривать как внутреннее сопротивление Z_p пьезогенератора. Генерируемая им мощность вычисляется по формуле

$$P_0 = \frac{1}{2} I_p^2 Z_p. \quad (22)$$

Выразим I_p , Z_p , C_p и R_p . Так как суммарный заряд между двумя электродами находится в формуле (21), то генерируемый ток может быть получен путем вычисления производной от заряда по времени:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{dQ_{\text{общ}}}{dt} = -d_{31} \frac{F_0 \omega_0}{L} \frac{WH}{I} \times \\ &\times \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 + \frac{1}{2}L^2x \right) \cos(\omega_0 t) = I_0 \cos(\omega_0 t). \end{aligned} \quad (23)$$

Емкость и сопротивление могут быть выражены согласно геометрическим размерам слоя электрода:

$$C_p = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{xW}{H}; \quad (24)$$

$$R_p = \rho \frac{H}{xW}, \quad (25)$$

где ϵ_r – диэлектрическая постоянная пьезоэлектрического материала; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Выразим внутренний импеданс:

$$z_p = \frac{C_p}{R_p} = \frac{\frac{R_p}{2\pi C_p}}{R_p + \frac{1}{j\omega_0 C_p}} = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2 \rho^2}} \frac{H}{xW}. \quad (26)$$

Таким образом, мощность, генерируемая пьезоэлектрическим преобразователем, равна

$$P_0 = \frac{1}{2} \left(-d_{31} \frac{F_0 \omega_0}{L} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6} x^3 - \frac{1}{2} Lx^2 + \frac{1}{2} L^2 x \right) \right)^2 \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2 \rho^2}} \frac{H}{xW}. \quad (27)$$

Для определения оптимальной длины электрода x на первом этапе проведем математический расчет генерируемой мощности в пьезоэлектрическом преобразователе по формуле (27).

В качестве источников вибрации для пьезогенераторов предлагается использовать вибрации низкочастотного диапазона различных исполнительных устройств, содержащих узлы и детали, совершающие вращательные, возвратно-поступательные и колебательные движения [3, 4]. Например, СВЧ-печь генерирует вибрацию на частоте $f = 121$ Гц ($\omega = 2\pi f = 760$ рад/с). Зададим предварительные габаритные размеры балки: ширина $W = 10$ мм, длина $L = 100$ мм, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 0,001$ мм, толщина подложки $h = 0,4$ мм. Для материала цирконата-титаната-свинца ЦТС-19 выбраны следующие физические параметры: допускаемое напряжение при изгибе балки составляет $\sigma_x = 36 \cdot 10^6$ Н/м², диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1700$ Кл/Н, электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл² / (Н · м²), пьезоэлектрический модуль $d_{31} = 155 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, плотность $\rho = 7800$ Кг/м³ [5].

Для нахождения максимальной силы, действующей на балку из условия прочности, рассчитаем момент сопротивления сечения балки:

$$W_x = \frac{W \cdot (H + h)^2}{6} = \frac{0,01 \cdot (0,000001 + 0,0004)^2}{6} = 2,68 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Максимальный момент сопротивления в сечении:

$$M_{\max} = \sigma_x W_x = 36000000 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 0,000000000268 \text{ м}^3 = 9,648 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}.$$

Из уравнения $M_{\max} = F_0 \frac{L^2}{2}$ определим максимальную силу, действующую на преобразователь:

$$F_0 = \frac{2M_{\max}}{L^2} = \frac{2 \cdot 0,009648}{0,06^2} = 5,36 \text{ Н}.$$

Упростим формулу (27), выражение для мощности пьезогенератора:

$$P_0 = \frac{2F_0^2 H^3 \rho d_{31}^2 \omega_0^2 (3L^2 x - 3Lx^2 + x^3)^2}{L^2 W x \sqrt{\rho^2 \omega_0^2 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 + 1} (H + h)^6}. \quad (28)$$

Построим график зависимости величины мощности пьезогенератора $P(x)$ от длины электрода x (рис. 7) и определим ее оптимальное значение.

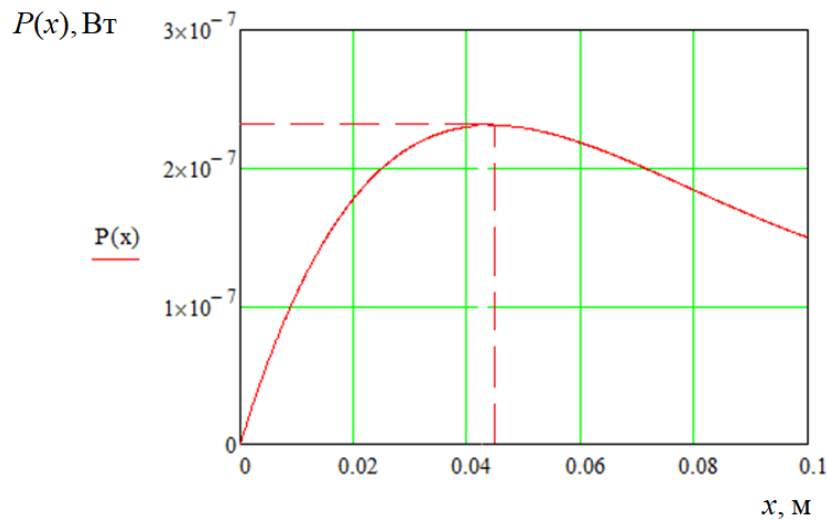


Рис. 7. График зависимости величины $P_0(x)$

По графику (рис. 7) можно увидеть, что выходная электрическая мощность балки достигает своего пика при длине электрода $x \approx 0,044 L$ (L – длина балки), т.е. при слое электрода, покрывающем 44 % балки от зажатого конца, мы получим максимальную выходную мощность, равную $P_0 = 2,3 \cdot 10^{-7}$ Вт. Для получения максимальных показателей мощности пьезогенератора проведем оптимизацию его размеров. Для этого определим выражения зависимостей мощности пьезогенератора от отдельных конструктивных параметров $P_0(L)$, $P_0(W)$, $P_0(h)$, $P_0(H)$ (длины, ширины, толщины подложки и пьезослоя), как производных формулы (28) (при оптимальной длине электрода $x = 0,44L$) и построим графики их зависимостей для выявления оптимальных значений.

По графику зависимости $P_0(L)$ определим влияние длины балки на выходную мощность (рис. 8,а). По графику зависимости $P_0(W)$ определим влияние ширины балки на выходную мощность (рис. 8,б). По графику зависимости $P_0(h)$ определим влияние толщины слоя подложки балки на выходную

мощность (рис. 8,б). По графику зависимости $P_0(H)$ определим влияние толщины пьезоэлектрического слоя балки на выходную мощность (рис. 8,з).

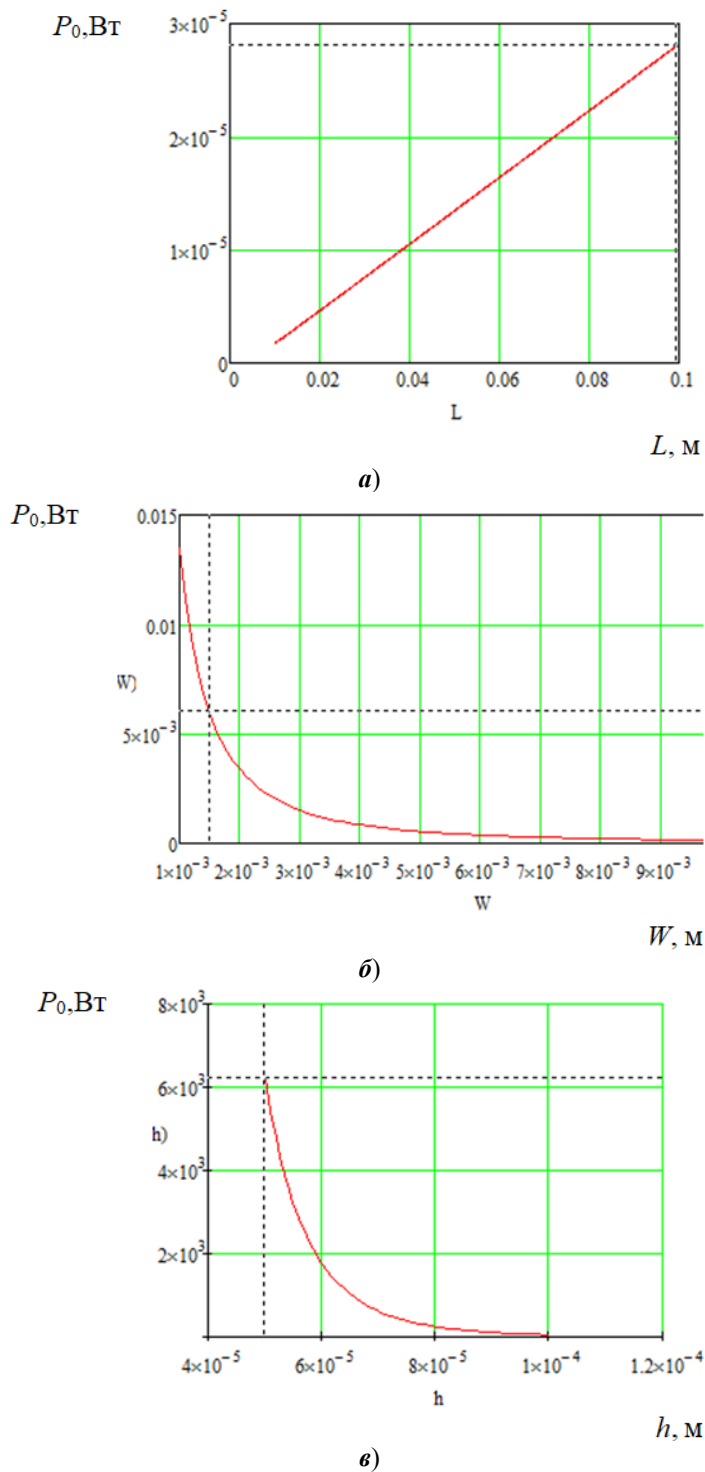
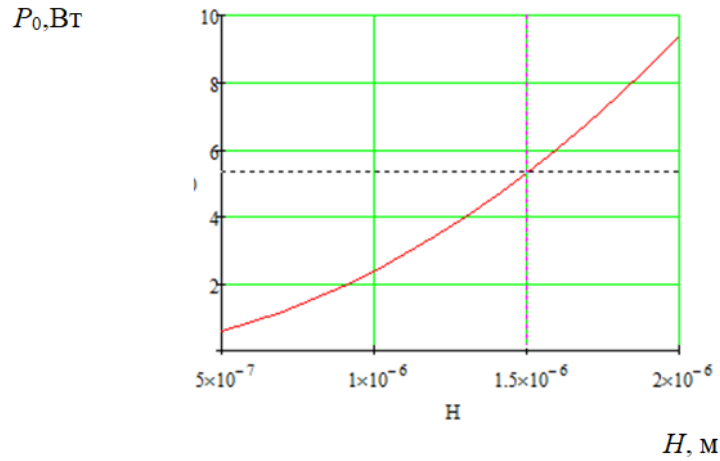


Рис. 8. Графики зависимости: **а** – величины $P_0(L)$; **б** – величины $P_0(W)$; **в** – величины $P_0(h)$; **з** – величины $P_0(H)$



з)

Рис. 8. Окончание

Из полученных графиков можно сделать вывод, что с увеличением длины балки возрастает значение мощности, но при этом балка испытывает большие нагрузки, что может привести к излому. Из условия прочности граничное значение длины $L = 100 \cdot 10^{-3}$ м. В зависимости от ширины балки значение мощности уменьшается. Граничным значением ширины будет $W = 1,5 \cdot 10^{-3}$, так как меньший размер сложнее изготовить технологически [6]. При увеличении толщины слоя подложки уменьшается выходная мощность, а с увеличением толщины пьезоэлектрического слоя увеличиваются; граничное значение $h = 5 \cdot 10^{-5}$, граничное значение $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$.

Исходя из технологических ограничений выбираем следующие параметры пьезогенератора: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. Построим график зависимости выходной мощности балочного пьезогенератора от длины электрода x для данной конструкции (рис. 9), откуда получаем, что максимальная выходная мощность составит $P_0 = 9,2 \cdot 10^{-6}$ Вт при длине электрода $x = 0,026$ мм.

Определим зависимость электрической мощности пьезогенератора путем добавления к электроду (L) небольшого (единичного) участка покрытия (e) от напряжения и деформации в области e на единицу длины.

Запишем формулу для выходной мощности в зоне L с учетом выражений для эквивалентного источника тока $I = \frac{dQ}{dt} = \omega d_{31} \sigma L \cos \omega t$ и внутренне-

го импеданса $Z = \frac{1}{\omega CL}$:

$$P_L = \frac{\omega^2 d_{31}^2 \sigma^2 L^2}{2} \cdot \frac{1}{\omega CL} = \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 L}{2C}. \quad (29)$$

Тогда выходная мощность пьезогенератора с учетом электрода дополнительной области e будет равна:

$$P_{L+e} = \frac{\omega^2 d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2} \cdot \frac{1}{\omega C (L + e)} = \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2C (L + e)}, \quad (30)$$

где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент, определяющий механическое напряжение в зоне e , $\sigma_e = \alpha \sigma_L$.

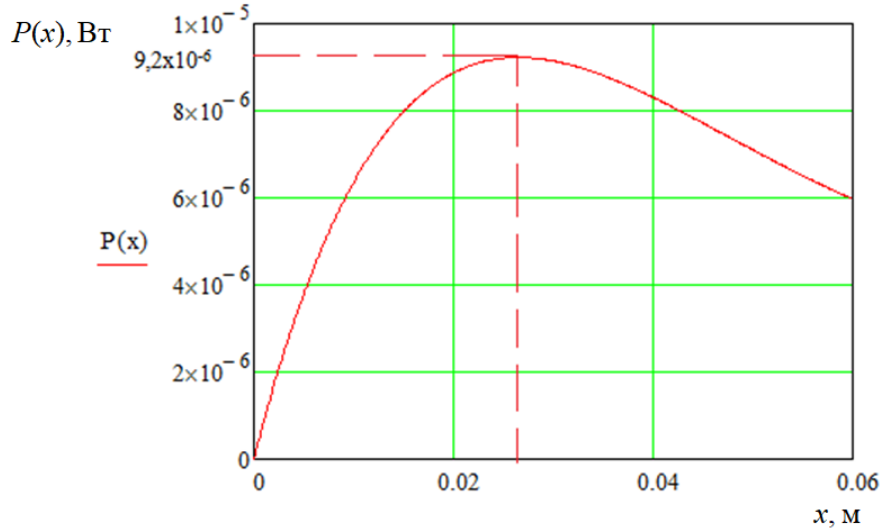


Рис. 9. График зависимости величины $P_0(x)$ для оптимизированного варианта конструкции пьезогенератора

Сравним выходные мощности с дополнительным электродом $L + e$ и с исходной длиной электрода L :

$$\frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2C (L + e)} > \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 L}{2C} \Rightarrow \alpha^2 \frac{e}{L} + 2\alpha > 1.$$

Так как множителем e/L можно пренебречь, то получим, что $\alpha > 0.5$. Таким образом, чтобы максимизировать выходную мощность пьезогенератора, электродный слой должен покрывать поверхность от места зажима (с максимальной деформацией) до границы, где деформация на единицу длины составляет половину средней деформации площади, покрытой электродным слоем.

Еще один вариант увеличения выходной мощности – это присоединение на свободный конец балки груза (инертной массы), с помощью которого можно регулировать собственную частоту кантилевера (рис. 10).

Если сформировать секции из 10 таких пьезоэлектрических кантилеверов (рис. 10,а), то можно будет получить порядка 0,1 мВт накапливаемой энергии, которой будет достаточно, для того чтобы обеспечить работу беспроводных устройств [7]. Кроме того, можно дополнительно увеличить выходную мощность такого пьезогенератора в 2 раза и более, если расположить пьезоэлементы в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 10,б). Такая конструкция позволит преобразовывать энергию не только поперечных, но и продольных колебаний.

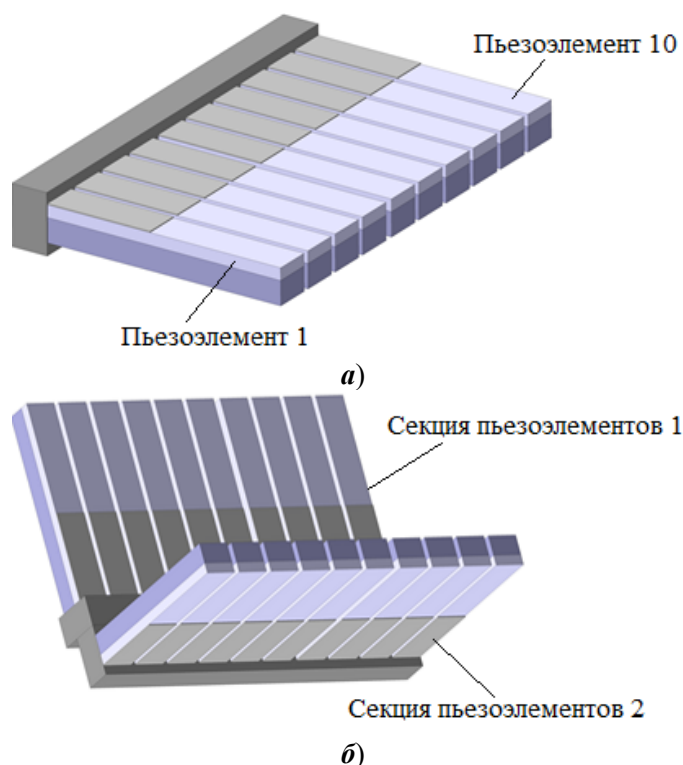


Рис. 10. Модель секции из 10 пьезоэлектрических кантилеверов (а); модель двух секций пьезоэлектрических кантилеверов, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (б)

Заключение

В ходе исследования был разработан пьезоэлектрический генератор изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала ЦТС с помощью микроэлектронной кремниевой технологии. Было проведено математическое моделирование зависимостей мощности от геометрических параметров и получены графики. Рассчитаны из условия прочности момент сопротивления, максимальный момент в сечении, сила, действующая на балку. Описаны материалы, методы получения, способы термообработки. Была определена зависимость выходной мощности пьезогенератора от длины электрода и найдена оптимальная длина электрода $x \approx 0,44 \cdot L$ (L – длина балки), при которой достигается максимальная мощность (т.е. электрод должен покрывать 44 % балки от зажатого конца). Исходя из условий прочности и технологических ограничений выбраны оптимальные геометрические параметры балочного пьезогенератора: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. Определено, что максимальная выходная мощность предложенного пьезогенератора достигает 9,2 мВт.

Список литературы

1. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М. : Техносфера. 2006. С. 119–125.

2. Базыкин С. Н., Бардин В. А., Чернов П. С. Концепция работы интеллектуальных датчиков в распределенных информационно-измерительных и управляющих системах // Приборы. 2023. № 12. С. 1–7.
3. Roundy S., Wright P. K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // Comput. Commun. 2003. Vol. 26, № 11. P. 1131–1144.
4. Khan F. U., Ahmad I. Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations // Shock and Vibration. 2016. Vol. 2016. P. 1–21.
5. Справочный каталог. URL: http://avrora-elma.ru/wp-content/themes/aurora/text/piezo_catalog.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
6. Аббакумов К. Е., Коновалов Р. С., Цаплев В. М. Пьезогенератор для автономных малогабаритных информационно-измерительных систем. СПб. : Санкт Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2014.
7. Du S., Jia Y., Chen S.-T., Zhao C., Sun B., Arroyo E., Seshia A. A. A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power // Sensors and Actuators A: Physical. 2017. Vol. 263. P. 693–701.

References

1. Uorden K. *Novye intellektual'nye materialy i konstruksii. Svoystva i primeneniye = New intelligent materials and structures. Properties and applications.* Moscow: Tekhnosfera. 2006:119–125. (In Russ.)
2. Bazykin S.N., Bardin V.A., Chernov P.S. The concept of operation of intelligent sensors in distributed information-measuring and control systems. *Pribory = Devices.* 2023;(12):1–7. (In Russ.)
3. Roundy S., Wright P.K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Comput. Commun.* 2003;26(11):1131–1144.
4. Khan F.U., Ahmad I. Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations. *Shock and Vibration.* 2016;2016:1–21.
5. *Spravochnyy katalog = Reference catalog.* (In Russ.). Available at: http://avrora-elma.ru/wp-content/themes/aurora/text/piezo_catalog.pdf (accessed 15.05.2024).
6. Abbakumov K.E., Konovalov R.S., Tsaplev V.M. *P'ezogenerator dlya avtonomnykh malogabaritnykh informatsionno-izmeritel'nykh system = Piezoelectric generator for autonomous small-sized information-measuring systems.* Saint Petersburg: Sankt Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet «LETI», 2014.
7. Du S., Jia Y., Chen S.-T., Zhao C., Sun B., Arroyo E., Seshia A.A. A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2017;263:693–701.

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Анатольевич Бардин

кандидат технических наук, доцент
кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vit-bardin@yandex.ru

Vitaly A. Bardin

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of instrument
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нелли Александровна Базыкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: nelli.baz@mail.ru

Nelli A. Bazykina

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Сергеевна Самохина

кандидат технических наук, доцент
кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kristina.bazykina@mail.ru

Kristina S. Samokhina

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья Николаевич Урваев

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: iurvaev@mail.ru

Ilya N. Urvaev

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 21.05.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 08.09.2024

Принята к публикации / Accepted 24.10.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.753.2/.24; 621.8
doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Оценка возможности сборки длинномерных цилиндрических деталей

Н. Е. Курносов¹, В. В. Салмин², А. Г. Елистратова³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹kurnosov-ne@mail.ru, ²salmin-penza@yandex.ru, ³elistratova.anny@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются условия сборки длинномерных деталей, соединяемых с натягом, широко применяемых в различных отраслях промышленности. Предметом исследования являются технология сборки и ограничения, накладываемые на процесс сборки при различных их видах. Цель работы – создание обоснованных рекомендаций по выбору параметров соединения и технологии его сборки, исключающих потерю устойчивости, с возможным использованием более совершенных технологических процессов и соединений. *Материалы и методы.* Предлагается оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом. Исследование процессов сборки проводится с учетом критической силы по известному соотношению Эйлера с учетом способа установки и закрепления деталей при запрессовке. Уравнения упругой линии участков определяются с использованием дифференциальных уравнений для отдельных участков вала и отверстия. Изогнутую ось условного стержня описывает система дифференциальных уравнений. *Результаты.* Предложены оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом, и рекомендации по устранению потери устойчивости деталей соединений. Приведен пример использования предлагаемой оценки. *Выводы.* Предложенная оценка позволяет выбрать параметры соединения и технологию сборки, исключающие потерю устойчивости. Предложены технические решения, позволяющие реализовать более совершенные технологические процессы сборки соединений.

Ключевые слова: соединение с натягом, длинномерные детали, сборка, прогнозирование устойчивости, схемы закрепления, пример, технологические решения

Для цитирования: Курносов Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г. Оценка возможности сборки длинномерных цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 115–127. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Assessing the possibility of assembling long cylindrical parts

N.E. Kurnosov¹, V.V. Salmin², A.G. Elistratova³

© Курносов Н. Е., Салмин В. В., Елистратова А. Г., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹kurnosov-ne@mail.ru, ²salmin-penza@yandex.ru, ³elistratova.anny@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is the conditions of assembly of long parts connected with tension, widely used in various industries. The subject of the research is assembly technology, restrictions imposed on the assembly process in its various types. The purpose of the work is to develop well-founded recommendations for the selection of connection parameters and assembly technology, eliminating the loss of stability, with the possible use of more advanced technological processes and connections. *Materials and methods.* An assessment is proposed that allows predicting the loss of stability during assembly of long parts of tension joints. The study of assembly processes is carried out taking into account the critical force according to the known Euler relation, taking into account the method of installation and fastening of parts during pressing. The equations of the elastic line of sections are determined using differential equations for individual sections of the shaft and hole. The curved axis of the conditional rod is described by a system of differential equations. *Results.* An assessment is proposed that allows predicting the loss of stability during assembly of long parts of connections with tension, and recommendations for eliminating the loss of stability of connection parts. An example of using the proposed assessment is given. *Conclusions.* The proposed assessment allows selecting the parameters of the connection and the technology of its assembly, eliminating the loss of stability. Technical solutions are proposed that allow implementing more advanced technological processes of assembly of connections.

Keywords: tension joint, long parts, assembly, stability prediction, fastening schemes, example, technological solutions

For citation: Kurnosov N.E., Salmin V.V., Elistratova A.G. Assessing the possibility of assembling long cylindrical parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):115–127. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-11

Длинномерные детали применяются в различных отраслях промышленности. В качестве примеров можно привести сборку труб с решетками теплообменников в химическом машиностроении, длинных валов редукторов с зубчатыми колесами, штоков с поршнями машин для литья под давлением, составных каландровых валов в бумагоделательных машинах, валков со специальным стальным сердечником в металлургическом машиностроении [1, 2].

К особенностям конструкции длинномерных соединений с натягом относятся:

1. Длинномерные соединения с натягом имеют большую длину по сравнению с диаметром, усложняющую процесс сборки.

2. Длинномерные детали часто имеют тонкие стенки, что делает их более восприимчивыми к деформации и повреждениям во время сборки.

К особенностям сборки относятся:

1. Потеря устойчивости деталей является причиной невозможности или существенного усложнения сборки соединений. В значительной степени проблема потери устойчивости относится к процессу проектирования схемы сборки и применяемой технологии.

2. Длинномерные детали могут неравномерно нагреваться или охлаждаться, что может привести к неравномерной силе натяга и ослаблению соединения; кроме того, существует риск термического повреждения, если температура или время нагрева не контролируются должным образом.

3. Для сборки длинномерных соединений с натягом часто требуется специальное оборудование, такое как длинные нагревательные печи и гидравлические прессы.

4. Сборка длинномерных соединений с натягом требует тщательного контроля качества, чтобы обеспечить прочность и надежность соединения.

В настоящее время отсутствуют методы, позволяющие на этапе проектирования прогнозировать потерю устойчивости при сборке соединений.

Отсутствие обоснованных рекомендаций по оценке устойчивости деталей соединений с натягом приводит к усложнению технологии сборки или к отказу от простого и надежного соединения с натягом и к применению ненапряженных соединений с дополнительным креплением, что приводит к увеличению стоимости изделия.

Рассмотрим условия потери устойчивости при сборке длинномерных деталей.

Сборка осуществляется несколькими методами:

- сборка под действием прессы;
- сборка без нагрева охватываемой детали или с нагревом;
- возможна технология сборки без использования прессы, только с нагревом охватываемой детали;
- сборка автофретированием (нагрузка детали давлением выше рабочего, что приводит к пластической деформации и появлению остаточных сжимающих напряжений) охватываемой или охватываемой детали.

Предлагается оценка, позволяющая прогнозировать потерю устойчивости при сборке длинномерных деталей соединений с натягом под действием прессы. Разработаны рекомендации по устранению потери устойчивости деталей соединений.

Потеря устойчивости деталей соединений с натягом происходит преимущественно в следующих случаях:

1. При сборке тонкостенных валов, что ориентировочно соответствует отношению

$$\frac{d - d_1}{d + d_1} < 0,2 ,$$

когда контактное давление в соединении превышает критическую величину, определяемую как [3]

$$P_{кр} = \frac{2E_1 (d - d_1)^3}{(1 - \mu_1)^2 (d + d_1)^3} ,$$

где d – диаметр соединения; d_1 – диаметр отверстия вала; E_1 , μ_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала вала.

Расчет соединений с натягом с учетом устойчивости цилиндрических оболочек подробно рассматривается в работах [4, 5].

2. При запрессовке длинномерных деталей, когда сила трения в соединении может превысить критическую силу.

Рассмотрим запрессовку гладкого вала (рис. 1) во втулку. Значение критической силы можно определить по известному соотношению Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{\xi^2 (L-l)^2}, \quad (1)$$

где J_1 – момент инерции сечения вала,

$$J_1 = \frac{\pi}{64} (d^4 - d_1^4); \quad (2)$$

ξ – коэффициент приведения длины; L – длина вала; l – длина участка за-прессовки.

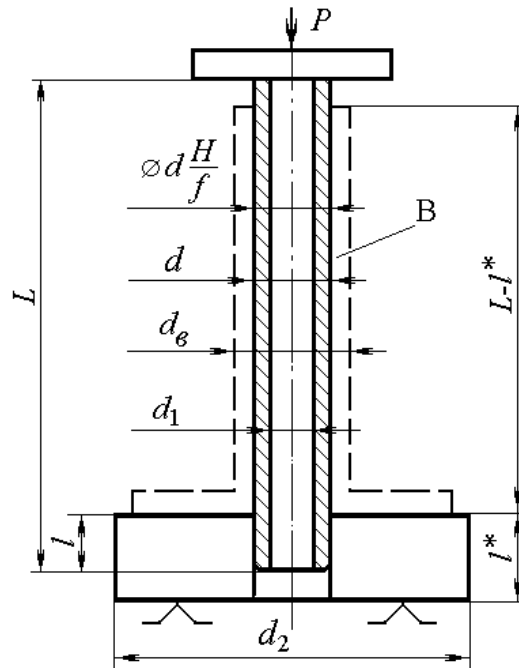


Рис. 1. Запрессовка гладкого вала во втулку

Сила трения в соединении с натягом

$$F_{тр} = \pi d l S_{\phi} \tau, \quad (3)$$

где S_{ϕ} – величина относительной фактической площади контакта в соединении; τ – удельная сила трения в соединении.

Зависимости для определения величины удельной силы трения τ приведены в работах [6, 7], относительной фактической площади S_{ϕ} – в настоящей работе.

Сила трения в соединении также может быть приближенно определена как

$$F_{тр} = \pi d l f. \quad (4)$$

Для исключения потери устойчивости необходимо выполнить условие

$$F_{\text{тр}} < P_{\text{кр}}. \quad (5)$$

После подстановки получим

$$l^3 - 2Ll^2 + L^2l - A = 0. \quad (6)$$

Здесь A определяется как

$$A = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{64 \xi^2} \frac{1}{S_{\phi} \tau} \frac{d^4 - d_1^4}{d}, \quad (7)$$

или

$$A = \frac{\pi^2 E_1 J_1}{64 \xi^2} \frac{1}{fP} \frac{d^4 - d_1^4}{d}. \quad (8)$$

Как следует из выражения (5), вал теряет устойчивость при выполнении условия

$$L \geq B = \sqrt[3]{\frac{27}{4} A}. \quad (9)$$

Если $L = B$, то потеря устойчивости происходит при запрессовке на длину $l = \frac{1}{3}L$.

При $\sqrt[3]{\frac{27}{4} A} < L \leq \sqrt[3]{\frac{27}{2} A}$ потеря устойчивости происходит, здесь

$$l_1 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(60^\circ - \frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right], \quad (10)$$

$$l_2 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(60^\circ + \frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right]. \quad (11)$$

При

$$L \geq \sqrt{\frac{27}{2} A} \quad (12)$$

потеря устойчивости будет происходить в области

$$l_3 \leq l \leq l_2, \quad (13)$$

где

$$l_3 = \frac{2}{3}L \left[1 - \cos \left(\frac{\arccos \left| 1 - \frac{27}{2} \frac{A}{L^3} \right|}{3} \right) \right]. \quad (14)$$

На рис. 2 приведены полученные по выражениям (10), (11), (5) зависимости длины запрессовки от отношения L/d , при которых происходит потеря устойчивости.

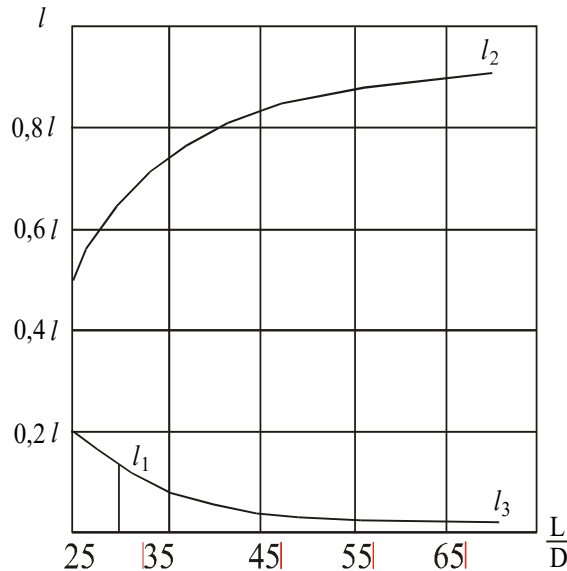


Рис. 2. Зависимость длины запрессовки, при которой происходит потеря устойчивости от отношения L/D . Материал вала и втулки – сталь 45 ($\sigma_T = 270$ МПа); охватываемая деталь с «бесконечно большой толщиной стенки», т.е. ($d_2/d > 4$); $P_{\max} = 0,58 \sigma_T$; $f = 0,2$ (соответствует запрессовке с машинным маслом); значение ξ принято равным 0,7

Длина вала, при которой не происходит устойчивости, должна удовлетворять условию

$$L < l + \sqrt{A/l}. \quad (15)$$

Одним из факторов, оказывающих влияние на устойчивость вала при запрессовке, является способ установки и закрепления деталей. Рассмотрим некоторые из них.

Горизонтальные перемещения вала и втулки исключены (рис. 3). Стол 1, на котором зафиксирована втулка 2, не имеет горизонтальных перемещений. Усилие сборки передается на вал 3 пуансоном прессы 4 через закрепительную втулку 5. В этом случае вал можно рассматривать как стержень с защемленными концами, для которого $\xi = 1/2$.

Горизонтальные перемещения вала и втулки не ограничиваются (рис. 4). В этом случае стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения, $\xi = 1$.

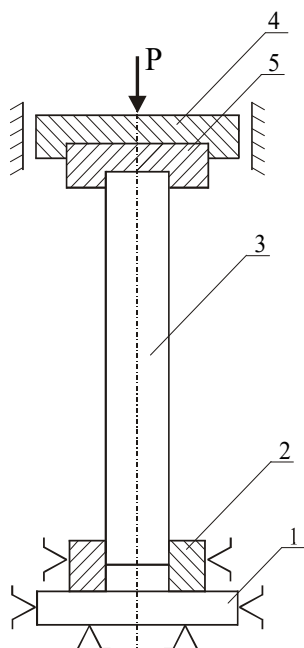


Рис. 3. Установки и закрепления деталей при запрессовке (вал и втулка со столом не имеют горизонтальных перемещений): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

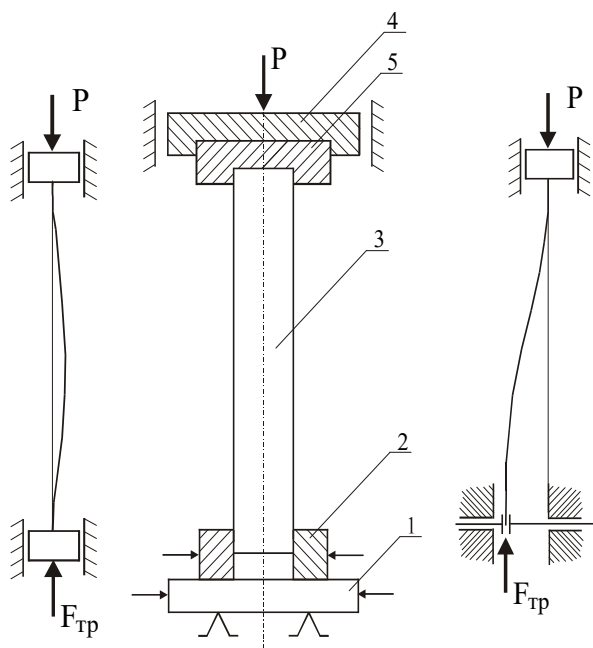


Рис. 4. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

Горизонтальные перемещения стола и втулки исключены. Усилие сборки P передается непосредственно на конец вала. В этом случае трудно рассчитывать на надежное и равномерное прилегание торца вала к плоскости пуансона прессы и поэтому принимается схема с шарнирно-опертым концом (рис. 5). В этом случае $\xi = 0,7$.

Стол и втулка могут иметь горизонтальные перемещения. Усилие сборки прикладывается аналогично, как это рассмотрено выше (рис. 6). В этом случае получим схему с шарнирными концами, для которой $\xi = 0,7$.

Последняя схема наихудшая из всех. Поэтому сборку следует производить на прессе, у которого исключены горизонтальные перемещения стола и втулки. Сборочное усилие следует передавать через закрепительную втулку для исключения возможности поворота торцевого сечения вала.

При запрессовке ступенчатых валов и при необходимости учета длины втулки необходимо определить приведенную длину стержня. Для этого записываются дифференциальные уравнения для отдельных участков вала и отверстия, из которых определяются уравнения упругой линии участков. Постоянные интегрирования подбираются так, чтобы удовлетворялись граничные условия. Из полученной системы уравнений определяется приведенная длина.

Рассмотрим условия сборки гладкого вала с нежесткой длинной втулкой при большой длине запрессовки (рис. 7). Закрепление деталей соединения в данном случае можно свести к схеме с шарнирными опорами.

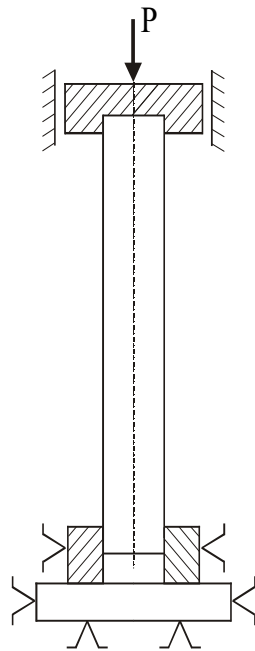


Рис. 5. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (свободный конец вала допускает угловые повороты): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

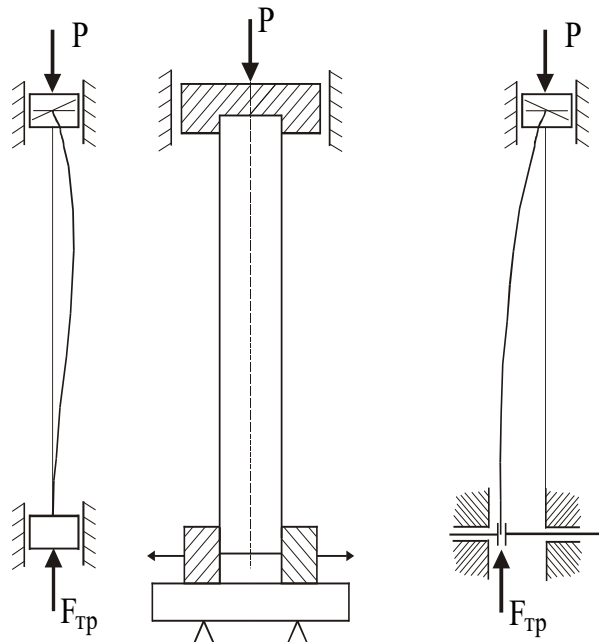


Рис. 6. Способ установки и закрепления деталей при запрессовке (свободный конец вала допускает угловые повороты, втулка может горизонтально перемещаться): 1 – стол; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – пуансон прессы; 5 – закрепительная втулка

Изогнутую ось условного стержня описывает система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} y_1'' + k_1^2 y_1 = 0, \\ y_2'' + k_2^2 y_2 = 0, \\ y_3'' + k_3^2 y_3 = 0, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$k_1^2 = \frac{P}{E_1 J_1}; \quad k_2 = a k_1; \quad k_3 = b k_1, \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}}; \quad b = \sqrt{1 + \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}}. \quad (18)$$

Решая уравнение (7), получим

$$\begin{cases} y_1 = C_1 \sin(k_1 z) + C_2 \cos(k_1 z), \\ y_2 = C_3 \sin(k_2 z) + C_4 \cos(k_2 z), \\ y_3 = C_5 \sin(k_3 z) + C_6 \cos(k_3 z). \end{cases} \quad (19)$$

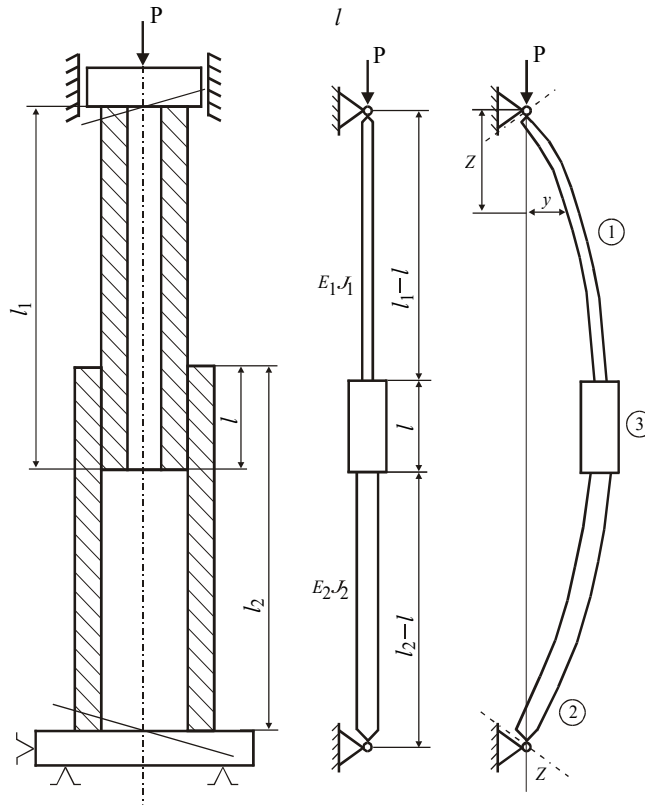


Рис. 7. Схема запрессовки длинномерного вала в нежесткую втулку

При $z=0$ прогиб $y_1=0$. Из этого условия получим $C_2=0$. Также должны выполняться условия: при $z=l_1-l$ перемещения $y_1=y_3$ и $y_1'=y_3'$; при $z=l_1$, $y_3=y_2$, $y_3'=y_2'$; при $z=l_1+l_2-l$ прогиб $y_2=0$. Зависимость k_1 от l определяется, если приравнять к нулю определитель полученной системы уравнений:

$$0 = \begin{vmatrix} \sin[k_1(l_1-l)] & 0 & 0 & -\sin[bk_1(l_1-l)] & -\cos[bk_1(l_1-l)] \\ \cos[k_1(l_1-l)] & 0 & 0 & -b\cos[bk_1(l_1-l)] & -b\sin[bk_1(l_1-l)] \\ 0 & -\sin(bk_1l_1) & \cos(bk_1l_1) & \sin(bk_1l_1) & \cos(bk_1l_1) \\ 0 & -a\cos(ak_1l_1) & a\sin(ak_1l_1) & b\cos(bk_1l_1) & -b\sin(bk_1l_1) \\ 0 & \sin[ak_1(l_1+l_2-l)] & \cos[ak_1(l_1+l_2-l)] & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Зная зависимость $k_1 = f(l)$ и используя выражение (8), можно определить критическую силу. Дальнейшее исследование проводится аналогично вышеизложенному.

Сборка соединений с большой длиной сопряжения связана со определенными сложностями. Сборка таких соединений путем запрессовки осложняется возможной потерей устойчивости. Осуществление сборки на полную длину другими способами (нагрев втулки, охлаждение вала, комбинированный способ) затруднено вследствие большой длины сопряжения и связанными с этим значительными потерями тепла в процессе сборки. В этом случае

рекомендуется производить сборку в два этапа. На первом этапе осуществляется сборка на длину l , большую l_2 , с нагревом втулки, охлаждением вала или комбинированным способом. На втором этапе производится допрессовка, когда гарантируется устойчивость деталей соединения.

Сформулируем рекомендации по сборке соединений и последовательность оценки на устойчивость при запрессовке.

Проверяется выполнение условия (6). Если оно не выполняется, исследуется возможность изменения длины запрессовки с учетом соотношений (10), (11), (14). Если длину запрессовки изменить нельзя, рассматривается возможность увеличения диаметра соединения [8]. Также для выполнения условия (15) могут быть уменьшены контактное давление и коэффициент трения при запрессовке. Для уменьшения контактного давления при сборке может быть применено торцевое сжатие втулок, приводящее к увеличению диаметра отверстия и уменьшению натяга [9]. Эффективным средством, уменьшающим коэффициент трения при запрессовке в 1,5–2 раза, является смазка с добавками поверхностно-активных веществ [10, 11]. Также уменьшению коэффициента трения способствуют использование расплавов легкоплавких металлов и сплавов (галлий, сплав Вуда), наложение при запрессовке ультразвуковых колебаний [12]. Если эти рекомендации не позволяют обеспечить выполнение требуемых условий, для устранения неустойчивости можно рекомендовать сборку с использованием промежуточной втулки, повышающей жесткость основной втулки (см. рис. 1). Втулка изготавливается длиной $(L-l)$ и сопрягается с валом по посадке, например, $\varnothing d \left(\frac{H8}{f8} \right)$.

Внешний диаметр втулки с учетом коэффициента запаса определяется из условия (15):

$$d_v = 2L \sqrt{\frac{\xi^2 f P}{E_1}}. \quad (20)$$

Таким образом, рассмотренная оценка позволяет выбрать параметры соединения и технологию сборки, исключающие потерю устойчивости [13, 14]. Предложены технические решения, позволяющие реализовать более совершенные технологические процессы сборки соединений [10, 12, 15–17].

Список литературы

1. Дулотин В. А. Технология сборки автофретированием и несущая способность соединений с натягом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Ижевск, 1993. 18 с.
2. Абрамов И. В., Фаттиев Ф. Ф., Дулотин В. А. [и др.]. Высокотензионные соединения с гарантированным натягом. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. 300 с.
3. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1967. 397 с.
4. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Л. Расчеты на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
5. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. М. : Гостехиздат, 1955. 491 с.
6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.

7. Крагельский И. А., Алисин В. В. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. М. : Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
8. Курносов Н. Е., Эрленекоев С. В., Еремиев В. А. Выбор оптимальной длины и диаметра соединений с натягом малых размеров, выполненных из ферромагнитных сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 1984. № 5. С. 26–30.
9. А.с. 1189636 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02, 19/02. Способ сборки с натягом соединения деталей типа вал-втулка и устройство для его осуществления / Э. В. Рыжов, Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, В. В. Тихонов, А. В. Сверчков (СССР). № 376119/25-27 ; заявл. 05.07.1984 ; опублик. 07.11.1985, Бюл. № 41.
10. А.с. 825229 СССР, МКИ В 21 Д 3/00. Способ калибровки / А. С. Скворцов, Г. Ф. Тютиков, Н. Е. Курносов, В. Б. Моисеев, Г. А. Семелидис, В. Н. Фадеев (СССР). Опублик. 04.05.1981, Бюл. № 16.
11. А.с. 1371836 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02. Способ неподвижного соединения деталей / В. М. Голощапов, Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, А. А. Кирпичников, В. Н. Белов, А. В. Кораблев (СССР). № 3989295/31-27 ; заявл. 16.12.1985 ; опублик. 07.02.1988, Бюл. № 5.
12. А.с. 634906 СССР, МКИ В 23 Р 11/02. Способ соединения деталей с натягом / Н. Е. Курносов, В. И. Сазоненко, В. Б. Моисеев, М. М. Свицкий, Г. Ф. Тютиков (СССР). № 25053304/25-27 ; заявл. 04.07.1977 ; опублик. 30.11.1978, Бюл. № 44.
13. Курносов Н. Е., Кирпичников А. А. Применение поверхностно-активных веществ при сборке нежестких деталей с натягом // Механизация и автоматизация сборочных и монтажных работ в приборостроении : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1983. С. 9–10.
14. Курносов Н. Е., Еремиев В. А., Зубков А. Б. Расчет соединения поршневой головки шатуна с запрессованной втулкой // Двигателестроение. 1987. № 3. С. 18–21.
15. А.с. 867592 СССР, МКИ В 23 Р 11/02; F 16 В 4/00. Способ соединения деталей с натягом термическим методом / А. Н. Мартынов, И. И. Воячек, В. С. Григорьев, Н. Е. Курносов (СССР). № 2829129/25-27 ; заявл. 12.10.1979 ; опублик. 30.09.1981, Бюл. № 36.
16. А.с. 1060388 СССР, МКИ 3 В 23 Р 11/02. Способ соединения с натягом деталей типа вал-втулка / А. Н. Мартынов, В. С. Григорьев, И. И. Воячек, Н. Е. Курносов, А. А. Кирпичников (СССР). № 3388426/25-27 ; заявл. 25.01.1982 ; опублик. 15.12.1983, Бюл. № 46.
17. А.с. 1159751 СССР, МКИ 4 В 23 Р 11/02. Способ тепловой сборки с натягом охватываемой и охватывающей деталей / Н. Е. Курносов, И. И. Воячек, С. В. Эрленекоев, Н. М. Москвитин (СССР). № 3547639/25-27 ; заявл. 24.11.1982 ; опублик. 07.06.1985, Бюл. № 21.

References

1. Dulotin V.A. *Autofrettage assembly technology and load-bearing capacity of tension joints*. PhD abstract: 05.02.08. Izhevsk, 1993:18. (In Russ.)
2. Abramov I.V., Fattiev F.F., Dulotin V.A. et al. *Vysokonapryazhennye soedineniya s garantirovannym natyagom = High-tension connections with guaranteed tension*. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2002:300. (In Russ.)
3. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov = Strength of materials*. Moscow: Nauka, 1967:397. (In Russ.)
4. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.L. *Raschety na prochnost' detaley mashin = Strength calculations of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie, 1979:702. (In Russ.)
5. Lur'e A.I. *Prostranstvennye zadachi teorii uprugosti = Spatial problems of elasticity theory*. Moscow: Gostekhizdat, 1955:491. (In Russ.)
6. Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos = Fundamentals of friction and wear calculations*. Moscow: Mashinostroenie, 1977:526. (In Russ.)

7. Kragel'skiy I.A., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik: v 2-kh kn. = Friction, wear and lubrication: handbook: in 2 books.* Moscow: Mashinostroenie, 1978;Bk.1:400. (In Russ.)
8. Kurnosov N.E., Erlenekov S.V., Eremin V.A. Selection of the optimal length and diameter of small-sized interference joints made of ferromagnetic alloys. *Izvestiya vuzov: Mashinostroenie = University proceedings. Mechanical engineering.* 1984;(5):26–30. (In Russ.)
9. A.s. 1189636 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02, 19/02. *Sposob sborki s natyagom soedineniya detaley tipa val-vtulka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya = Method of assembly with tension of connection of parts of the shaft-sleeve type and device for its implementation.* E.V. Ryzhov, N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, V.V. Tikhonov, A.V. Sverchkov (SSSR). № 376119/25-27; appl. 05.07.1984; publ. 07.11.1985, Bull. № 41. (In Russ.)
10. A.s. 825229 SSSR, MKI V 21 D 3/00. *Sposob kalibrovki = Calibration method.* A.S. Skvortsov, G.F. Tyutikov, N.E. Kurnosov, V.B. Moiseev, G.A. Semelidis, V.N. Fadeev (SSSR). Publ. 04.05.1981, Bull. № 16. (In Russ.)
11. A.s. 1371836 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02. *Sposob nepodvizhnogo soedineniya detaley = Method of fixed connection of parts.* V.M. Goloshchapov, N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, A.A. Kirpichnikov, V.N. Belov, A.V. Korablev (SSSR). № 3989295/31-27; appl. 16.12.1985; publ. 07.02.1988, Bull. № 5. (In Russ.)
12. A.s. 634906 SSSR, MKI V 23 R 11/02. *Sposob soedineniya detaley s natyagom = Method of joining parts with tension.* N.E. Kurnosov, V.I. Sazonenko, V.B. Moiseev, M.M. Svirskiy, G.F. Tyutikov (SSSR). № 25053304/25-27; appl. 04.07.1977; publ. 30.11.1978, Bull. № 44. (In Russ.)
13. Kurnosov N.E., Kirpichnikov A.A. Application of surfactants in assembly of flexible parts with interference fit. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya sborochnykh i montazhnykh rabot v priborostroenii: sb. nauch. tr. = Mechanization and automation of assembly and installation works in instrument making: collected papers.* Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta, 1983:9–10. (In Russ.)
14. Kurnosov N.E., Eremin V.A., Zubkov A.B. Calculation of the connection of the piston head of the connecting rod with a pressed bushing. *Dvigatelsestroenie = Engine building.* 1987;(3):18–21. (In Russ.)
15. A.s. 867592 SSSR, MKI V 23 R 11/02; F 16 V 4/00. *Sposob soedineniya detaley s natyagom termicheskim metodom = Method of joining parts with tension using thermal method.* A.N. Martynov, I.I. Voyachek, V.S. Grigor'ev, N.E. Kurnosov (SSSR). № 2829129/25-27; appl. 12.10.1979; publ. 30.09.1981, Bull. № 36. (In Russ.)
16. A.s. 1060388 SSSR, MKI 3 V 23 R 11/02. *Sposob soedineniya s natyagom detaley tipa valvtulka = Method of connecting with tension parts of the valve-sleeve type.* A.N. Martynov, V.S. Grigor'ev, I.I. Voyachek, N.E. Kurnosov, A.A. Kirpichnikov (CCCR). № 3388426/25-27; appl. 25.01.1982; publ. 15.12.1983, Bull. № 46. (In Russ.)
17. A.s. 1159751 SSSR, MKI 4 V 23 R 11/02. *Sposob teplovoy sborki s natyagom okhvatyvayemy i okhvatyvayushchey detaley = Method of thermal assembly with tension of male and female parts.* N.E. Kurnosov, I.I. Voyachek, S.V. Erlenekov, N.M. Moskvitin (SSSR). № 3547639/25-27; appl. 24.11.1982; publ. 07.06.1985, Bull. № 21. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Ефимович Курносов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры транспортных
машин, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Nikolay E. Kurnosov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of transport machines, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Владимир Васильевич Салмин

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой транспортных
машин, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: salmin-penza@yandex.ru

Vladimir V. Salmin

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of transport
machines, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анна Григорьевна Елистратова

старший преподаватель кафедры
транспортных машин, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: elistratova.anny@yandex.ru

Anna G. Elistratova

Senior lecturer of the sub-department
of transport machines, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 23.04.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.05.2024

Принята к публикации / Accepted 11.09.2024

УДК 62-233.3/9

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-12

Силы в зацеплении планетарно-цевочной передачи с сателлитом, имеющим эксцентриситет

Е. А. Чуфистов¹, О. Е. Чуфистов²

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ea_tchufistov@mail.ru, ²tchufistov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Силы, действующие в зацеплении передачи, влияют на ресурс самого зацепления и опор сателлитов. Количество факторов, от которых зависит распределение нагрузки в зацеплении, весьма велико, в том числе модификация профилей зубьев, погрешности изготовления передачи и изменение относительного положения сателлита, цевочного колеса и выходного вала при ее работе. Существующие методики статического расчета передачи не в полной мере учитывают это влияние. Целью работы является совершенствование статического анализа передачи и повышение точности расчета. *Материалы и методы.* В работе методом кинематического анализа определяются перемещения в контактных парах зацепления. Далее для определения характеристик упругости используется классическая контактная механика Герца. Силы в зацеплении рассчитываются с помощью итерационной процедуры анализа состояния контактов. Для получения количественных характеристик применено компьютерное моделирование в системе MathCad. *Результаты.* Созданы математическая модель, алгоритм и программа расчета сил, возникающих в планетарно-цевочной передаче с модификацией профиля зубьев сателлита и эксцентриситетом сателлита. Выполнены расчеты и показано, как в этом случае изменяются силы в контактных парах. *Выводы.* Предложенное решение позволяет учитывать совместное влияние равномерной модификации профилей зубьев и эксцентриситета сателлита на нагрузки в зацеплении. Исследования показали, что эксцентриситет может существенно изменять картину нагружения зацепления передачи, что необходимо учитывать в инженерном расчете.

Ключевые слова: планетарно-цевочные передачи, эксцентриситет сателлита, силы в контактах, коэффициент увеличения максимальной силы

Для цитирования: Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е. Силы в зацеплении планетарно-цевочной передачи с сателлитом, имеющим эксцентриситет // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 128–141. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-12

Forces in the engagement of planetary-pinion gear with satellite having eccentricity

E.A. Tchufistov¹, O.E. Tchufistov²

¹Penza State University, Penza, Russia

²Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ea_tchufistov@mail.ru, ²tchufistov@mail.ru

Abstract. *Background.* The forces acting in the engagement of the gear affect the resource of the engagement itself and the satellite supports. The number of factors on which the load

© Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

distribution in the engagement depends is very large, including modification of tooth profiles, manufacturing inaccuracy of the gear and a change in the relative position of the satellite, the pinwheel and the output shaft during its operation. The existing methods of static gear calculation do not fully take into account this influence. The purpose of the study is to improve the static analysis of gear and increase the accuracy of calculation. *Materials and methods.* In this work, the displacements in the contact pairs of engagement are determined using the method of kinematic analysis. Next, classical Hertzian contact mechanics is used to determine the elasticity characteristics. The forces in the engagement are calculated using an iterative procedure for analyzing the state of the contacts. To obtain quantitative characteristics, computer modeling in the Mathcad system was used. *Results.* A mathematical model, algorithm and program for calculating the forces arising in the planetary-pinion gear with modification of the satellite teeth profile and satellite eccentricity have been created. Calculations are performed and it is shown how, in this case, the forces in the contact pairs change in the gear. *Conclusions.* The proposed solution makes it possible to take into account the combined influence of a uniform modification of the tooth profiles and the eccentricity of the satellite on the loads in the engagement. Research has shown that eccentricity can significantly change the load pattern of the gear engagement, which must be taken into account in engineering calculation.

Keywords: planetary-pinion gears, satellite eccentricity, forces in contacts, coefficient of maximum force increase

For citation: Tchufistov E.A., Tchufistov O.E. Forces in the engagement of planetary-pinion gear with satellite having eccentricity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):128–141. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-12

Введение

Одно из первых и полных исследований сил в точно изготовленной планетарной цевочной передаче выполнено В. Н. Кудрявцевым [1]. Влияние зазоров в зацеплении и выходном механизме на нагруженность планетарно-цевочных передач, по-видимому, впервые изучалось в [2]. В результате теоретических и экспериментальных исследований авторы установили закон распределения нагрузки по элементам передачи и сделали вывод о необходимости учета погрешности изготовления при выполнении расчетов. Последующие исследования [3–16] показали, что зазоры влияют на комплекс взаимосвязанных величин: люфт и кинематическую погрешность вращения, силы, действующие в зацеплении, нагрузочную способность, потери в зацеплении и КПД, крутильную жесткость передачи и др. Влияние конструктивных параметров на силы и контактные напряжения представлены в работе С. К. Малхотра и М. А. Парамешваран [3]. J. G. Blanche и D. C. H. Yang исследовали влияние допусков обработки на зазор и пульсацию крутящего момента циклоидального привода [4]. L. Lixing, L. Xin, H. Weidong, Q. Yuanmei выполнили анализ сил в точной циклоидной передаче. В работе [6] представлен анализ крутильной жесткости циклоидной передачи с учетом допусков. М. Благоевич [7] предложил методику расчета деформаций зубьев циклоидного диска и зазоров, возникающих между циклоидным диском и зубчатым венцом. Li Xin Xu и др. [8] создали аналитическую модель для прогнозирования нагрузок на элементы циклоидального редуктора при наличии зазоров. Ning Jiang, Shuting Wang и др. [9] рассмотрели влияние коррекции профиля на деформации и зазоры, а также на количество зубьев, которые одновременно передают нагрузку. В работах авторов данной статьи [10–16] также изучалось

влияние зазоров в зацеплении на свойства, проявляющиеся в неработающей и работающей передачах. Однако многие эффекты до сих пор слабо изучены. В частности, совместное влияние зазоров в зацеплении и эксцентриситета сателлита на положение и размеры зоны контакта и распределение нагрузки в зацеплении.

1. Аналитическое решение

В точной планетарно-цевочной передаче все цевки (ролики) находятся в одновременном контакте с зубьями сателлита. При изготовлении деталей передачи возникают погрешности, поэтому существует опасность, что при сборке передачи детали займут положения, при которых собираемость передачи будет невозможна. Для сборки передачи и обеспечения смазки необходимы гарантированные зазоры между зубьями сателлитов и цевками (роликами) цевочного колеса. Поэтому при проектировании и изготовлении передачи вводят модификацию профилей зубьев. Кроме собираемости, она позволяет улучшать показатели передачи.

Широко применяется модификация, при которой профили зубьев сателлитов эквидистантны теоретическому. Такой метод модификации относят к равномерно корректирующим профили зубьев. При этом в зацеплении образуются одинаковые зазоры. В передаче с зазором в зацеплении без нагрузки движение должно передаваться одной парой «цевка – зуб сателлита», т.е. зацепление однопарное. Под нагрузкой образуется зона контакта, величина и положение которой зависят от приложенного вращающего момента, модификации профилей зубьев сателлитов, жесткости контактной пары и технологических погрешностей. К числу основных погрешностей относится эксцентриситет сателлита, когда ось зубчатого венца смещена относительно оси отверстия под подшипник.

Рассмотрим передачу в обратном движении при неподвижном входном вале и вращающихся сателлите и цевочном колесе (рис. 1). В качестве исходного принимаем положение, когда ролик (цевка) № 1 цевочного колеса располагается на вертикальной оси, τ_{ci} – угол расположения i -й цевки на цевочном колесе, он отсчитывается против часовой стрелки от цевки № 1. На рис. 1 r_{w1} – радиус начальной окружности сателлита, $r_{w1} = z_1 a_w$; z_1 – число зубьев сателлита; r_{w2} – радиус начальной окружности цевочного колеса, $r_{w2} = z_2 a_w$; z_2 – число цевок цевочного колеса; a_w – межосевое расстояние передачи; r_2 – радиус окружности расположения цевок (радиус цевочного колеса). Отношение $\lambda = r_{w2}/r_2$ называют коэффициентом укорочения эписиклоиды.

В увеличенном масштабе на рис. 1 показан фрагмент, на котором O_1 – центр отверстия в сателлите, O' – центр зубчатого венца сателлита, O_2 – центр цевочного колеса, e_s – эксцентриситет, расстояние $O_1 O'_1$. Направление вектора эксцентриситета задается углом ξ , который он образует с вертикальной осью симметрии $O_1 O_2$ передачи. Вследствие такого направленного смещения зазоры в зацеплении изменяются, теперь они уже не одинаковые в различных парах «зуб сателлита – цевка».

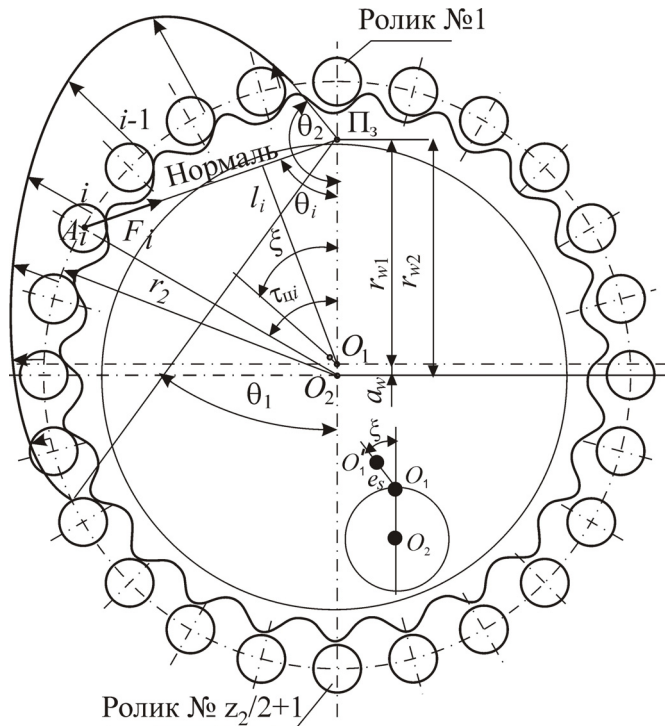


Рис. 1. Силы, действующие в зацеплении в передаче с сателлитом, имеющим эксцентриситет

Нагружение передачи происходит вследствие поворота сателлита вокруг т. O_1 . Приближенно будем полагать, что зазоры и эксцентриситет не меняют положения контактных нормалей в контактных парах, а контакт будет, если сумма проекций перемещений точек профиля сателлита, расположенных на пересечении контактных нормалей $A_i\Pi_3$ с профилем зуба сателлита вследствие поворота сателлита на угол β и смещения вследствие эксцентриситета, будет равна первоначальному зазору в зацеплении Δ_z . Вначале зазор исчезает в одной контактной паре, при этом сателлит поворачивается относительно своего центра O_1 на угол β_d . В остальных контактных парах зазоры также изменяются. Далее сателлит дополнительно поворачивается на угол $\beta_{упр}$, что приводит к образованию зоны контакта. Так что суммарный угол поворота $\beta = \beta_d + \beta_{упр}$. Деформации в контактных парах:

$$\delta_i = \beta l_i - e_s \cos(\xi + \theta_i) - \Delta_z. \quad (1)$$

Если $\delta < 0$, то в паре «цевка – зуб сателлита» остается зазор. Пренебрегаем (вследствие малости) влиянием эксцентриситета на плечо l_i силы F_i , действующей в зацеплении, и принимаем $l_i = r_{w1} \sin \theta_i$.

Нормальные силы в контактных парах при $\delta_i > 0$:

$$F_i = c_{zi} \cdot \delta_i, \quad (2)$$

где c_{zi} – коэффициент жесткости контактной пары в зацеплении.

Максимальное значение силы соответствует максимальной деформации. Угол θ_m , при котором деформация достигает максимального значения, определим из условия $\frac{d\delta}{d\theta} = 0$. Для этого преобразуем (1) к следующему виду:

$$\delta_i = (\beta r_{w1} + e_s \sin \xi) \sin \theta - e_s \cos \xi \cos \theta - \Delta_z,$$

или

$$\delta_i = a \sin \theta - b \cos \theta - \Delta_z, \quad (3)$$

где $a = \beta r_{w1} + e_s \sin \xi$, а $b = e_s \cos \xi$.

Из условия

$$\frac{d\delta}{d\theta} = a \cos \theta + b \sin \theta = 0$$

получаем соотношение для определения угла θ_m , соответствующего максимальной деформации и силе

$$\operatorname{tg} \theta_m = -\frac{a}{b}. \quad (4)$$

Подставим полученное соотношение в (3) и, учитывая, что

$$\sin \theta = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}, \text{ а } \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

или

$$\sin \theta_m = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ и } \cos \theta_m = \frac{-b}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

получим

$$\delta_{\max} = \sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z, \quad (5)$$

$$F_{\max 3.э} = c_3 \left(\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z \right), \quad (6)$$

$$F_{i3.э} = c_3 (a \sin \theta_i - b \cos \theta_i - \Delta_z). \quad (7)$$

Из (3) и (6), учитывая, что $l_i = r_{w1} \sin \theta_m$, получаем угол поворота сателлита $\beta_{\text{л}}$, необходимый для выбора люфта:

$$\beta_{\text{л}} = \frac{1}{r_{w1}} \left(\frac{\Delta_z + e_s \cos \xi \cos \theta_m}{\sin \theta_m} - e_s \sin \xi \right). \quad (8)$$

Деформация в контактной паре:

$$\delta_i = \beta_{\text{упр}} r_{w1} \sin \theta - e_s \cos \xi \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\operatorname{tg} \theta_m} \right) - \Delta_z \left(1 - \frac{\sin \theta}{\sin \theta_m} \right). \quad (9)$$

Вращающий момент на спутнике, создаваемый силами, действующими на зубья спутника:

$$T_c = \sum F_i l_i . \quad (10)$$

В зацеплении без зазора и эксцентриситета $F_{i\delta.3} = c_3 \beta r_{w1} \sin \theta_i$, $F_{\max \delta.3} = c_3 \beta r_{w1}$ и $F_i = F_{\max \delta.3} \sin \theta_i$. Подставляя приведенные соотношения в (10), получим

$$T_c = F_{\max \delta.3} r_{w1} \sum_0^{\pi} \sin^2 \theta_i . \quad (11)$$

В зацеплении с зазором и эксцентриситетом спутника:

$$F_{i3.э} = F_{\max 3.э} \frac{a \sin \theta_i - b \cos \theta_i - \Delta_z}{\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z} . \quad (12)$$

Подставив (12) в (10), получим

$$T_c = F_{\max 3.э} \frac{r_{w1} \sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i - b \sin \theta_i \cos \theta_i)}{\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z} . \quad (13)$$

При одинаковых моментах в передачах, приравнявая правые части (11) и (13), получим

$$F_{\max 3.э} \frac{r_{w1} \sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i - b \sin \theta_i \cos \theta_i)}{\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z} = F_{\max \delta.3} r_{w1} \sum_0^{\pi} \sin^2 \theta_i .$$

Введем коэффициент увеличения максимальной силы в зацеплении передачи с зазором и эксцентриситетом по сравнению с точной передачей:

$$k_z = \frac{F_{\max 3.э}}{F_{\max \delta.3}} = \frac{\left(\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z \right) \sum_0^{\pi} \sin^2 \theta_i}{\sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i - b \sin \theta_i \cos \theta_i)} . \quad (14)$$

Суммирование в числителе формулы (14) выполняется для $i \in [0, z_2/2]$, а в знаменателе – для зоны контакта $\theta_1 \dots \theta_2$. Ее размеры могут быть определены из условия $\delta_{1,2} = 0$ следующим образом. Учитывая (3), получим

$$a^2 (1 - \cos^2 \theta) = b^2 \cos^2 \theta + 2 \Delta_z b \cos \theta + \Delta_z^2 ,$$

отсюда

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{-\Delta_z b \pm a \sqrt{a^2 + b^2 - \Delta_z^2}}{a^2 + b^2}, \quad (15)$$

и

$$\theta_{1,2} = \arccos \left[\frac{-\Delta_z b \pm a \sqrt{a^2 + b^2 - \Delta_z^2}}{a^2 + b^2} \right]. \quad (16)$$

Сумму в числителе формулы (14) вычислим по соотношению

$$\sum \sin^2 \theta_i \approx \frac{\int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta}{2\pi/z_2} = \frac{z_2}{2\pi} \frac{1}{2} \int_0^\pi (1 - \cos 2\theta) d\theta = \frac{z_2}{4}. \quad (17)$$

Аналогично выражение в знаменателе $\sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i)$ вычис-

лим как

$$\sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i) \approx \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta - \Delta_z \sin \theta) d\theta}{2\pi/z_2}.$$

Проинтегрировав данное выражение, получим

$$\begin{aligned} & \sum_{\theta_1}^{\theta_2} (a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i) \approx \\ & \approx \frac{z_2}{4\pi} \left\{ a \left[(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2) \right] - 2\Delta_z (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Так как

$$\sin \theta_i = \sin \tau_{\Pi i} / \left(1 - 2\lambda \cos \tau_{\Pi i} + \lambda^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \cos \theta_i = (\lambda - \cos \tau_{\Pi i}) / \left(1 - 2\lambda \cos \tau_{\Pi i} + \lambda^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

то

$$\sin \theta_i \cos \theta_i = \sin \tau_{\Pi i} (\lambda - \cos \tau_{\Pi i}) / \left(1 - 2\lambda \cos \tau_{\Pi i} + \lambda^2 \right).$$

Вычислим эту сумму по формуле

$$\sum_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta_i \cos \theta_i \approx -\frac{z_2}{2\pi} \int_{\tau_{\Pi 1}}^{\tau_{\Pi 2}} \frac{\sin \tau_{\Pi} (\lambda - \cos \tau_{\Pi}) d\tau_{\Pi}}{1 - 2\lambda \cos \tau_{\Pi} + \lambda^2}. \quad (19)$$

Знак минус определяется тем, что θ_1 соответствует углу $\tau_{и2}$, а θ_2 – $\tau_{и1}$. Интеграл, входящий в выражение (16):

$$\int_{\tau_{и1}}^{\tau_{и2}} \frac{\sin \tau_{и} (\lambda - \cos \tau_{и}) d\tau_{и}}{1 - 2\lambda \cos \tau_{и} + \lambda^2} = \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda} \ln \left| \frac{\cos \tau_{и2} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}}{\cos \tau_{и1} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}} \right| + \cos \tau_{и1} - \cos \tau_{и2} \right). \quad (20)$$

Теперь имеем

$$\begin{aligned} & \sum_{\theta_1}^{\theta_2} \left(a \sin^2 \theta_i - \Delta_z \sin \theta_i - b \sin \theta_i \cos \theta_i \right) = \\ & = \frac{z_2}{4\pi} \left\{ a \left[(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2) \right] - \right. \\ & \left. - \frac{z_2}{4\pi} \left\{ 2\Delta_z (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) - \frac{b}{\lambda} \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda} \ln \left| \frac{\cos \tau_{и2} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}}{\cos \tau_{и1} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}} \right| + \cos \tau_{и1} - \cos \tau_{и2} \right) \right\} \right\}. \end{aligned}$$

Коэффициент увеличения силы:

$$\begin{aligned} k_z = \pi \left(\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z \right) \cdot & \left[a \left[(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2) \right] - \right. \\ & \left. - 2\Delta_z (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) + \frac{b}{\lambda} \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda} \ln \left| \frac{\cos \tau_{и2} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}}{\cos \tau_{и1} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}} \right| + \cos \tau_{и1} - \cos \tau_{и2} \right) \right]^{-1}. \quad (21) \end{aligned}$$

Углы θ_1, θ_2 определяются по формуле (16), при этом углу θ_1 соответствует знак плюс перед радикалом, а углу θ_2 – минус.

Из (15) получаем

$$\cos \theta_1 - \cos \theta_2 = \frac{2a\sqrt{a^2 + b^2 + \Delta_z^2}}{a^2 + b^2}. \quad (22)$$

Входящее в формулу (21) выражение $\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2$ равно

$$2(\sin \theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_2) = \frac{4\Delta_z (a^2 - b^2) \sqrt{a^2 + b^2 + \Delta_z^2}}{a^2 + b^2}.$$

Теперь формулу (19) можно привести к следующему, более удобному, виду:

$$k_z = \frac{\pi \left(\sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z \right)}{a} \cdot \left[(\theta_2 - \theta_1) - \frac{2\Delta_z (a^2 + 3b^2) \sqrt{a^2 + b^2} - \Delta_z^2}{(a^2 + b^2)^2} - \right. \\ \left. - \frac{b}{a\lambda} \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda} \ln \left| \frac{\cos \tau_{\text{ц}2} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}}{\cos \tau_{\text{ц}1} - \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda}} \right| + \cos \tau_{\text{ц}1} - \cos \tau_{\text{ц}2} \right) \right]^{-1}. \quad (23)$$

Значения $\cos \tau_{\text{ц}1,2}$ можно определить по следующим формулам:

$$\begin{cases} \cos \tau_{\text{ц}1} = \lambda \sin^2 \theta_1 - \cos \theta_1 \sqrt{(1 - \lambda^2 \sin^2 \theta_1)}, \\ \cos \tau_{\text{ц}2} = \lambda \sin^2 \theta_2 - \cos \theta_2 \sqrt{(1 - \lambda^2 \sin^2 \theta_2)}. \end{cases}$$

В соответствии с (3) и (8) имеем

$$a = \beta r_{w1} + e_s \sin \xi = \beta_{\text{упр}} r_{w1} + \frac{\Delta_z + e_s \cos \xi \cos \theta_m}{\sin \theta_m}.$$

Решение этого уравнения относительно величины a приводит к громоздким преобразованиям. Поэтому на первом этапе итерации учитываем, что θ_m не намного отличается от $\pi/2$, тогда $a \approx \beta_{\text{упр}} r_{w1} + \Delta_z$. Угол упругого поворота $\beta_{\text{упр}}$ приближенно определим по контактной паре, в которой действует максимальная сила

$$\beta_{\text{упр}} = \frac{F_{\text{max 3.э}}}{cr_{w1}} = \frac{4k_z T_s}{cr_{w1}^2 z_2},$$

откуда получаем

$$a = \frac{4k_z T_s}{cr_{w1} z_2} + \Delta_z. \quad (24)$$

Общее сближение центров кривизны зуба и ролика для наиболее нагруженной пары:

$$\delta_{\text{max}} = 2F_{\text{max 3.э}} \frac{1 - \nu^2}{\pi E b} \left[\ln \frac{\pi E b \rho_{si} r_r}{2F_i (1 - \nu^2) \rho_{\text{comi}}} + 0,815 \right] = \\ = 2F_{\text{max 3.э}} \frac{1 - \nu^2}{\pi E b} \left[\ln \frac{\pi E b |\rho_t|}{2F_i (1 - \nu^2)} + 0,815 \right],$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; b – ширина сателлита; ρ_{si} – радиус кривизны зуба сателлита; r_r – радиус ролика (цевки); ρ_{comi} – приведенный радиус кривизны в точке контакта; ρ_t – радиус кривизны эпициклоиды.

Коэффициент жесткости, входящий в формулу (24), примем в следующем виде [11]:

$$c_{k.c} = (k_k \pi E b) \left\{ 2(1 - \nu^2) \left[\ln \frac{z_2 r_{w1} \pi E b r_2 \sqrt{1 - \lambda^2}}{8 k_z T_s (1 - \nu^2)} + 0,815 \right] \right\}^{-1}, \quad (25)$$

где k_k – коэффициент, учитывающий особенности конструкции узла, $k_k < 1$.

Силы, действующие в контакте, определяют по формуле (7). Коэффициент k_z , входящий в формулу (25), а опосредовано и в формулу (7), до расчета неизвестен. Поэтому расчет выполняется методом итераций. Вначале k_z принимается без учета эксцентриситета [15], рассчитываются силы и момент сил. Затем корректируется угол упругого поворота для того, чтобы момент на сателлите был равен заданному, вновь рассчитываются силы, моменты, и так до достижения требуемой точности.

2. Интерпретация решения

Приведенные модели позволяют определить влияние модификации профиля зубьев и погрешностей изготовления на силы, действующие в зацеплении. Эти модели применимы для неподвижной статически нагруженной передачи. На рис. 2, 3 показаны результаты расчетов, выполненных в MathCad, при следующих параметрах передачи: вращающий момент на сателлите $T_c = 350 \text{ Н} \cdot \text{м}$, ресурс передачи 10 000 ч, режим работы тяжелый, передаточное отношение $u = 33$, число сателлитов $n_c = 2$, межосевое расстояние $a_w = 1,985 \text{ мм}$.

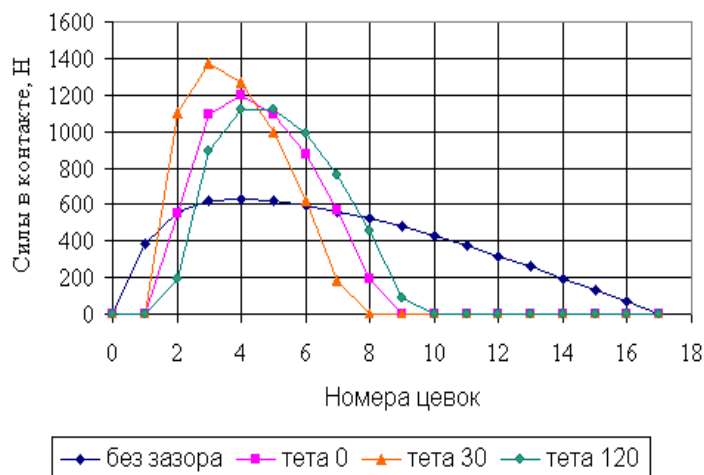


Рис. 2. Силы в контактных парах зацепления: эксцентриситет 0,0025 мм

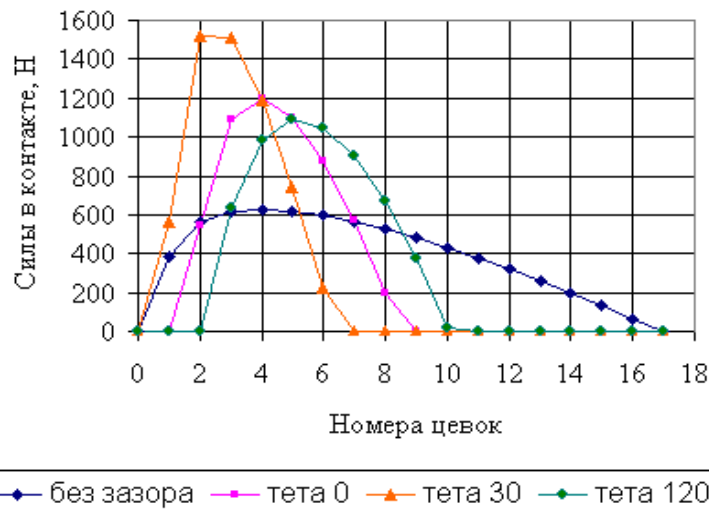


Рис. 3. Силы в контактных парах зацепления: эксцентриситет 0,005 мм

Дополнительные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Зазор, мм	Эксцентриситет	Угол эксцентриситета, град	Угол поворота сателлита, рад	Угол упругого поворота сателлита, рад	a , мм	b , мм	Θ_m , рад
1	0,01	0	—	$2,068 \cdot 10^{-5}$	$2,068 \cdot 10^{-5}$	—	—	$\pi/2$
2			—	$1,903 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	—	—	$\pi/2$
3		0,0025	30	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$4,39 \cdot 10^{-5}$	$1,2647 \cdot 10^{-2}$	$2,165 \cdot 10^{-3}$	1,740
4			120	$1,545 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$1,2285 \cdot 10^{-2}$	$-1,25 \cdot 10^{-3}$	1,469
5		0,005	30	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$5,25 \cdot 10^{-5}$	$1,2522 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	1,904
6			120	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$1,1987 \cdot 10^{-2}$	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	1,365

Влияние эксцентриситета на силу в контактной паре определяется расположением вектора эксцентриситета по отношению к контактной нормали. Если угол ξ , определяющий направление вектора эксцентриситета, меньше $\pi/2 - \theta$, то эксцентриситет увеличивает зазор в контактной паре и уменьшает силу, а если больше, то уменьшает зазор и увеличивает силу. Если вектор смещения перпендикулярен контактной нормали, то эксцентриситет не меняет зазора в соответствующей паре. Максимальное уменьшение зазора и, соответственно, увеличение деформации и контактной силы, приходится на контактные пары, положение которых удовлетворяет формуле (4). Для передач без эксцентриситета это пары, для которых $\theta \approx \pi/2$. Для передачи с $\xi = 30^\circ$ это соответствует 3–4-й парам при эксцентриситете $e = 0,0025$ мм и 2–3-й парам при $e = 0,005$ мм, а для $\xi = 120^\circ$ – парам 4–5 при $e = 0,0025$ мм и парам 5–6 при $e = 0,005$ мм. Это привело к тому, что при $\xi = 30^\circ$ в зоне, близкой к полюсу зацепления, где и без эксцентриситета силы большие, они еще

увеличились. При $\xi = 120^\circ$ максимальное увеличение смещено в зону, удаленную от полюса. За счет этого максимальная сила в этой передаче по сравнению с передачей без эксцентриситета даже уменьшилась. В работающей передаче относительное положение звеньев и нагрузки циклически меняются. При этом амплитуда сил, по-видимому, возрастет.

Заключение

Смещение зубчатого венца сателлита относительно оси отверстия под подшипник, эксцентриситет сателлита, меняет картину силового нагружения зацепления. В контактных парах, в направлении которых смещен зубчатый венец, силы возрастают. При этом меняются также положение и размеры зоны контакта. Вследствие этого меняется также угол упругого поворота сателлита. Приведенные результаты показывают, что эксцентриситет может существенно изменять максимальные нагрузки. Для более полного выявления влияния эксцентриситета на закономерности распределения нагрузки в зацеплении в работающей передаче требуются дополнительные исследования.

Список литературы

1. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи. М. ; Л. : Машиностроение, 1966. 308 с.
2. Юдин В. А., Лобастов В. К. К теории проектирования «реальных» планетарных передач с цевочным внеполюсным зацеплением // Теория передач в машинах. М. : Наука, 1971. С. 83–95.
3. Malhotra S. K., Parameswaran M. A. Analysis of a Cycloid Speed Reducer // Mechanism and Machine Theory. 1983. Vol. 18, № 6. P. 491–499. doi: 10.1016/0094-114X(83)90066-6
4. Blanche J. G., Yang D. C. H. Cycloid Drives with Machining Tolerances // ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design. 1989. Vol. 111 (3). P. 337–344.
5. Lixing L., Xin L., Weidong H., Yuanmei Q. Accurate Force Analysis on Cycloid Drive // Proceeding of the 11th ASME International Power Transmission and Gearing Conference DETC2011, August 28–31. Washington, DC, USA, 1997.
6. Anh Duc Pham. Torsional rigidity analysis of cycloid reducers considering tolerances // 16th Asia Pacific Vibration Conference 24–26 November, 2015 HUST. Hanoi, Vietnam, 2015. doi: 10.15625/vap.2016.000088
7. Blagojevic M. Analysis of Clearances and Deformations at Cycloid Disc // Machine design. 2014. Vol. 6, № 3, P. 79–84.
8. Xu Li-xin A dynamic model to predict the number of pins to transmit load in a cycloidal reducer with assembling clearance // Article in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018. doi: 10.1177/0954406218809732
9. Jiang N., Wang Sh., Xie X., Yuan X., Yang A., Zhang J. A vectorial modification methodology based on an efficient and accurate cycloid tooth profile model // Precision Engineering. 2022. Vol. 73. P. 435–456.
10. Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е. Гуревич Ю. Е., Курманов Р. М. Влияние зазоров на силы в зацеплении в планетарно-цевочной передаче // Материалы и технологии XXI века : сб. статей XIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2016. С. 123–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26305716>
11. Artyomov I. I., Tchufistov E. A., Tchufistov O. E. Analysis of static loading of meshing in planetary cycloid gear // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012056.

12. Артемов И. И., Шептунов С. А., Чуфистов Е. А. [и др.]. Моделирование силового взаимодействия в зацеплении планетарно-цевочной передачи // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2019. № 2 (49). С. 75–80.
13. Tchufistov E. A., Tchufistov O. E. Loading of satellite bearing of planetary cycloid gear by forces acting in meshing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. doi: 10.1088/1757-899X/862/3/032042
14. Tchufistov E. A., Tchufistov O. E. Simulation of satellite bearings loading in planetary cycloid gear // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971 (4).
15. Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е. Закономерности нагружения планетарно-цевочной передачи при ее работе // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 1. С. 171–178.
16. Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е. Изменение радиальной силы в зацеплении планетарно-цевочной передачи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 142–155.

References

1. Kudryavtsev V.N. *Planetarnye peredachi = Planetary gears*. Moscow; Leningrad: Mashinostroenie, 1966:308. (In Russ.)
2. Yudin V.A., Lobastov V.K. Towards the theory of designing “real” planetary gears with pinion off-pole engagement. *Teoriya peredach v mashinakh = Theory of gears in machines*. Moscow: Nauka, 1971:83–95. (In Russ.)
3. Malhotra S.K., Parameswaran M.A. Analysis of a Cycloid Speed Reducer. *Mechanism and Machine Theory*. 1983;18(6):491–499. doi: 10.1016/0094-114X(83)90066-6
4. Blanche J.G., Yang D.C.H. Cycloid Drives with Machining Tolerances. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*. 1989;111(3):337–344.
5. Lixing L., Xin L., Weidong H., Yuanmei Q. Accurate Force Analysis on Cycloid Drive. *Proceeding of the 11th ASME International Power Transmission and Gearing Conference DETC2011, August 28–31*. Washington, DC, USA. 1997.
6. Anh Duc Pham. Torsional rigidity analysis of cycloid reducers considering tolerances. *16th Asia Pacific Vibration Conference 24–26 November, 2015 HUST*. Hanoi, Vietnam, 2015. doi: 10.15625/vap.2016.000088
7. Blagojevis M. Analysis of Clearances and Deformations at Cycloid Disc. *Machine design*. 2014;6(3):79–84.
8. Xu Li-xin A dynamic model to predict the number of pins to transmit load in a cycloidal reducer with assembling clearance. *Article in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018. doi: 10.1177/0954406218809732
9. Jiang N., Wang Sh., Xie X., Yuan X., Yang A., Zhang J. A vectorial modification methodology based on an efficient and accurate cycloid tooth profile model. *Precision Engineering*. 2022;73:435–456.
10. Chufistov E.A., Chufistov O.E. Gurevich Yu.E., Kurmanov R.M. Effect of clearances on engagement forces in planetary-pinion gear. *Materialy i tekhnologii XXI veka: sb. statey XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Materials and technologies of the 21st century: proceedings of the 14th International scientific and engineering conference*. Penza, 2016:123–130. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26305716>
11. Artyomov I.I., Tchufistov E.A., Tchufistov O.E. Analysis of static loading of meshing in planetary cycloid gear. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;734:012056.
12. Artemov I.I., Sheptunov S.A., Chufistov E.A. et al. Modeling of force interaction in planetary pinion gear engagement. *Vestnik MGTU «STANKIN» = Bulletin of MSTU «STANKIN»*. 2019;(2):75–80.

13. Tchufistov E.A., Tchufistov O.E. Loading of satellite bearing of planetary cycloid gear by forces acting in meshing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 862. doi: 10.1088/1757-899X/862/3/032042
14. Tchufistov E.A., Tchufistov O.E. Simulation of satellite bearings loading in planetary cycloid gear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;971(4).
15. Chufistov E.A., Chufistov O.E. Loading patterns of planetary pinion gear during its operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(1):171–178. (In Russ.)
16. Chufistov E.A., Chufistov O.E. Hanging the radial force un the engagement of the planetary pinion gear. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):142–155. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Алексеевич Чуфистов

кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры транспортных
машин, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ea_tchufistov@mail.ru

Evgeniy A. Tchufistov

Candidate of engineering sciences,
professor, professor of the sub-department
of transport machines, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Олег Евгеньевич Чуфистов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: tchufistov@mail.ru

Oleg E. Tchufistov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.02.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.04.2024

Принята к публикации / Accepted 30.05.2024

УДК 621.923

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-13

Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования

П. В. Малинин¹, П. Ю. Бочкарев², И. И. Артемов³, М. О. Гончаров⁴

^{1,2}Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

^{2,4}Саратовский государственный университет генетики,

биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴mixgoncharov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Недостаточно широкое использование методов бесцентрового шлифования, отличающихся высокой производительностью и качеством обработанных поверхностей, в современном производстве связано с недостаточной научной проработкой отдельных вопросов наладки технологических операций. В связи с этим актуальным является развитие научной базы, созданной отечественными учеными и специалистами. *Материалы и методы.* Представлены и систематизированы результаты обследования передовых предприятий Поволжского региона по вопросам, касающимся выполнения процедур наладки бесцентрового шлифовального оборудования. Представлены модели и алгоритм определения наладочных параметров с учетом реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок. Предложены наладочные параметры, регулирование которыми возможно с использованием рабочих органов оборудования, что повышает объективность качества выполнения работ и сокращает трудоемкость процедуры наладки оборудования. *Результаты.* Результатами экспериментов подтверждена взаимосвязь реальных размерных характеристик элементов технологической системы и их влияние на назначение наладочных параметров. *Выводы.* Разработанные методики позволяют исключить субъективный фактор процесса наладки оборудования и управления реализацией, что дает возможность повышения эффективности операций проходного бесцентрового шлифования.

Ключевые слова: проходное бесцентровое шлифование, проектные процедуры наладки оборудования, технологическая подготовка механообрабатывающих производств, операции бесцентрового шлифования

Для цитирования: Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 142–156. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-13

Ustification of the parameters for setting up operations of through-pass centerless grinding

P.V. Malinin¹, P.Yu. Bochkaev², I.I. Artemov³, M.O. Goncharov⁴

^{1,2}Kamyshin Technological Institute, branch of

Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

^{2,4}Saratov State University of Genetics, Biotechnology
and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

© Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

³Penza State University, Penza, Russia¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴mixgoncharov@gmail.com

Abstract. *Background.* The insufficiently widespread use of centerless grinding methods, characterized by high productivity and the quality of the treated surfaces, in modern production is due to insufficient scientific study of certain issues of setting up technological operations. In this regard, it is urgent to develop the scientific base created by domestic scientists and specialists. *Materials and methods.* The results of a survey of advanced enterprises in the Volga region on issues related to the implementation of procedures for setting up centerless grinding equipment are presented and systematized. Models and an algorithm for determining the adjustment parameters are presented, taking into account the actual dimensional characteristics of grinding and driving wheels, and the sizes of workpieces. The adjustment parameters are proposed, which can be regulated using the working bodies of the equipment, which increases the objectivity of the quality of work and reduces the complexity of the equipment adjustment procedure. *Results.* The results of the experiments confirmed the relationship between the real dimensional characteristics of the elements of the technological system and their influence on the purpose of the adjustment parameters. *Conclusions.* The developed methods make it possible to eliminate the subjective factor of the process of equipment setup and implementation management, which makes it possible to increase the efficiency of through-pass centerless grinding operations.

Keywords: through-through centerless grinding, design procedures for setting up equipment, technological preparation of machining plants, centerless grinding operations

For citation: Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Ustification of the parameters for setting up operations of through-pass centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):142–156. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-13

Введение

При всестороннем анализе состояния любого объекта техники и технологии необходим детальный сбор информации о состоянии действительного применения результатов научно-исследовательских работ и выявлении с учетом временного промежутка практической значимости представленных исследований или констатации причин их не востребоваемости. Такую проработку целесообразно провести применительно к технологическим операциям бесцентрового шлифования, базовые научные исследования которых были заложены достаточно давно [1–4] и в последующем принципиальным корректировкам не подвергались. В современной научно-технической литературе приводятся методические рекомендации по технологической подготовке операций, выполняемых на бесцентрово-шлифовальном оборудовании. С учетом высокой производительности способов бесцентрового шлифования с одно-временным получением высоких качественных размерных характеристик и геометрической формы обрабатываемых поверхностей [5, 6] актуальность развития научной базы, созданной отечественными учеными и производственниками, не вызывает сомнений.

Материалы и методы

Рассматривая использование данных операций в действующих производственных системах механообработки, однозначно можно отметить тенденцию сокращения видов обработки методом бесцентрового шлифования;

особенно это заметно на примере операций врезного бесцентрового шлифования и обработки внутренних цилиндрических поверхностей. С целью выявления и конкретизации причинно-следственных связей сложившейся ситуации было выполнено обследование передовых предприятий Поволжского региона (Саратовская, Пензенская, Волгоградская области). Изучались конструкторско-технологическая документация, состав парка оборудования, подходы к организации технологической подготовки и функционированию производственных систем. Отдельное место занимали опросы наладчиков и операторов технологического оборудования, используемого на операциях бесцентрового шлифования с фиксацией информации в опросных листах. На рис. 1 приведены результаты обобщения собранного материала, дающего достаточно подробный срез по реальному состоянию применения операций бесцентрового шлифования в современных отечественных производственных системах.

Анализ полученной информации позволил сформулировать следующие основные заключения, обосновывающие необходимость кардинального изменения организации технологической подготовки операций бесцентрового шлифования:

- при наладке в значительной мере не используются известные теоретические методики и рекомендации;
- качество наладки бесцентрового оборудования в основном зависит от опыта и квалификации наладчиков;
- во всех случаях основным способом настройки является подгонка методом шлифования пробных деталей;
- предварительная настройка станка выполняется разнообразными способами, связанными с большими погрешностями и временными затратами труда наладчиков.

Для нивелирования перечисленных недостатков и значительного снижения трудоемкости выполнения процесса наладки и подналадки проведены исследования, позволяющие развить известные теоретические методы. На их основе разработаны модели определения наладочных параметров с учетом реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок [7–11]. В качестве устанавливаемых наладочных параметров выбраны такие, регулирование которыми возможно с использованием рабочих органов оборудования, что повышает объективность качества выполнения работ и сокращает трудоемкость процедуры наладки оборудования.

Полученные зависимости устанавливают взаимосвязи между размерными характеристиками обрабатываемой поверхности и элементами технологического оборудования и оснастки, влияющими на места их контакта и обеспечивающими условия силового замыкания в процессе реализации обработки [12]. Для наладочного параметра – расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов в сечении, в котором выполняется наладка (оси кругов расположены в одной горизонтальной плоскости), представлены зависимости, устанавливающие взаимосвязь размерных характеристик.

Расстояние между центрами кругов $L_{D_{ш}D_{в}} = |D_{ш}D_{в}|$ зависит от изменения размерных характеристик:

- диаметра шлифовального круга $D_{ш}$;

- диаметра ведущего круга D_B ;
- действительного размера диаметра заготовки обрабатываемой поверхности d .



Рис. 1. Структура подходов к процедурам наладки операций проходного бесцентрового оборудования на промышленных предприятиях

То есть $L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}}$ является функцией трех переменных $L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}} = \mathcal{F}(d, D_{\text{ш}}, D_{\text{в}})$.

В этом случае для функции могут быть составлены уравнения в частных производных (на примере $\frac{\partial L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}}}{\partial d}$):

$$\frac{\partial L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}}}{\partial d} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}} + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}} \right) - \frac{h}{(D_{\text{ш}} + d) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}}} - \frac{h}{(D_{\text{в}} + d) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}}},$$

решениями которых являются выражения:

- при переменной d :

$$L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}} = \left((d + D_{\text{ш}}) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}}} \right| - \right. \\ \left. - (d + D_{\text{в}}) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}} + h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}}} \right| - \right. \\ \left. - h \ln \left| D_{\text{в}} + d - h + \sqrt{(D_{\text{в}} + d)^2 - 2h(D_{\text{в}} + d)} \right| - \right. \\ \left. - h \ln \left| D_{\text{ш}} + d - h + \sqrt{(D_{\text{ш}} + d)^2 - 2h(D_{\text{ш}} + d)} \right| + C(D_{\text{ш}}; D_{\text{в}}); \right.$$

- при переменной $D_{\text{ш}}$:

$$L_{D_{\text{ш}}D_{\text{в}}} = \frac{D_{\text{ш}}}{2} \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}} + \frac{1}{2} \left((D_{\text{ш}} + d) \sqrt{1 + \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{ш}} + d}}} \right| + \right. \\ \left. + h \ln \left| D_{\text{ш}} + d - h + \sqrt{(D_{\text{ш}} + d)^2 - 2h(D_{\text{ш}} + d)} \right| + \frac{D_{\text{ш}} h}{(D_{\text{в}} + d) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{в}} + d}}} + \check{C}(d; D_{\text{в}}); \right.$$

• при переменной D_B :

$$L_{D_{III}D_B} = \frac{D_B}{2} \sqrt{1 + \frac{2h}{D_{III} + d}} + \frac{1}{2} \left((D_B + d) \sqrt{1 + \frac{2h}{D_B + d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_B + d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_B + d}}} \right| \right) +$$

$$+ h \ln \left| D_B + d - h + \sqrt{(D_B + d)^2 - 2h(D_B + d)} \right| + \frac{D_B h}{(D_B + d) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_B + d}}} + \tilde{C}(d; D_{III}),$$

где h – рекомендованная высота установки центра заготовки обрабатываемой поверхности.

Созданные модели позволили разработать алгоритмическое обеспечение для определения расчета параметров наладки оборудования. Представленная на рис. 2 блок-схема поясняет последовательность выполнения групп действий по расчету параметров наладки оборудования при расположении центров шлифовального и ведущего кругов на одной горизонтальной линии и предназначена для создания программного обеспечения данной проектной процедуры технологической подготовки в части реализации операции.

Первоначальный ввод исходной информации связан с занесением данных, отражающих реальное состояние технологического оснащения операции бесцентрового шлифования наружных цилиндрических поверхностей: действительные диаметры шлифовального и ведущего кругов, угол наклона опорной поверхности установочного ножа. Следующим шагом является занесение информации о диаметре обрабатываемой поверхности – вводится средний диаметр поверхности с учетом известных предельных размеров в сечении рабочей зоны, когда центры шлифовального и ведущего кругов расположены на одной горизонтальной прямой. Представленная информация является неизменяемой для расчета наладочных параметров выполнения технологической операции в конкретных условиях.

В соответствии с разработанными нормативными рекомендациями [13, 14] выбирается первоначальное значение высоты установления центра обрабатываемой поверхности относительно горизонтальной линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов.

Выполнение расчетного этапа схемы заключается в последовательном выполнении вычислительных действий с использованием разработанных зависимостей и позволяет установить: угол между линиями, соединяющими центр шлифовального круга с центром детали и центром ведущего круга; угол между линиями, соединяющими центр ведущего круга с центром детали и центром шлифовального круга; угол между линиями, соединяющими центр детали с центром ведущего круга и точкой контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа. Это обеспечивает получение расчетного значения расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов, предлагаемого в качестве основного наладочного параметра, отличающегося свойством объективности контроля и удобством регулирования.

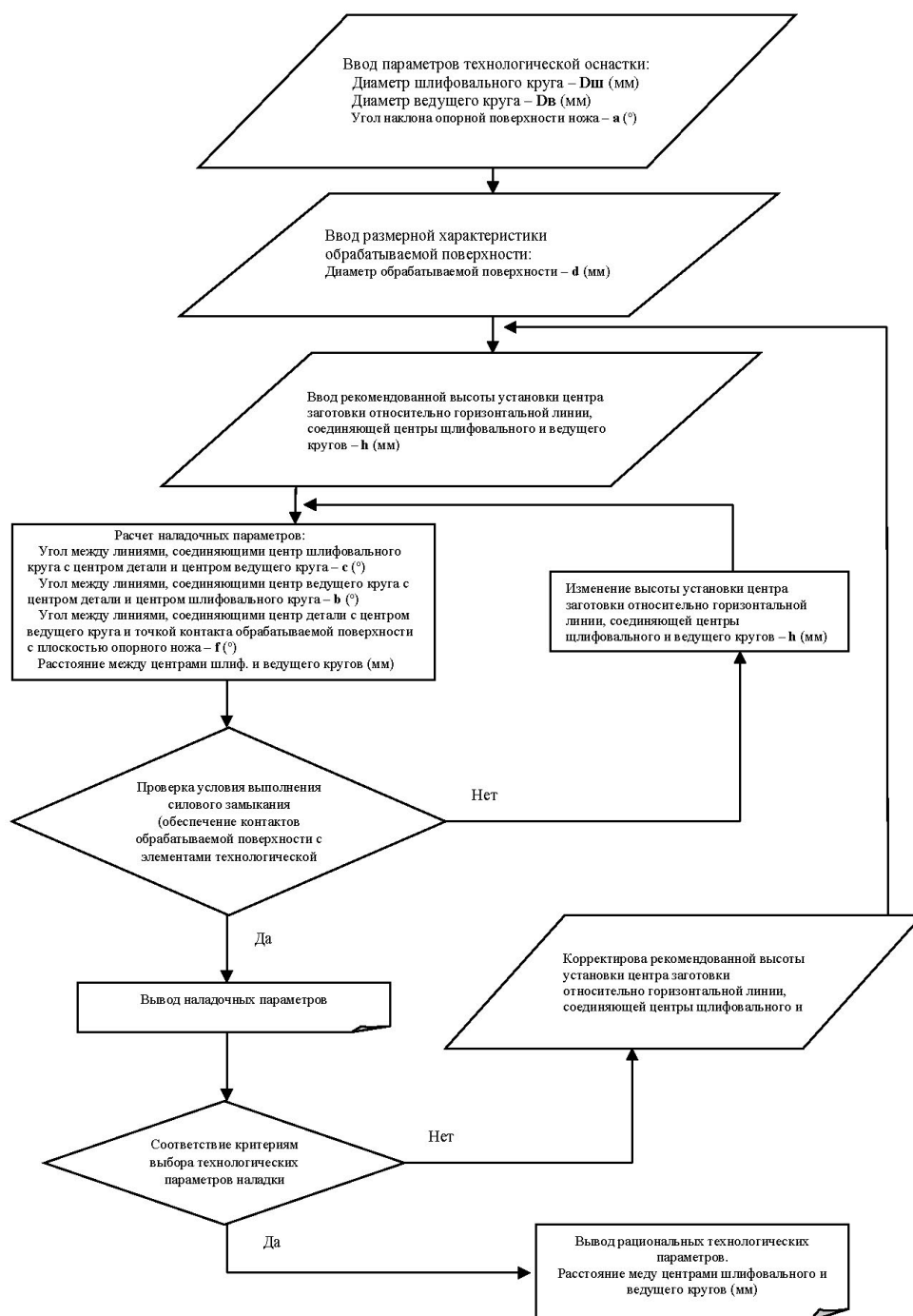
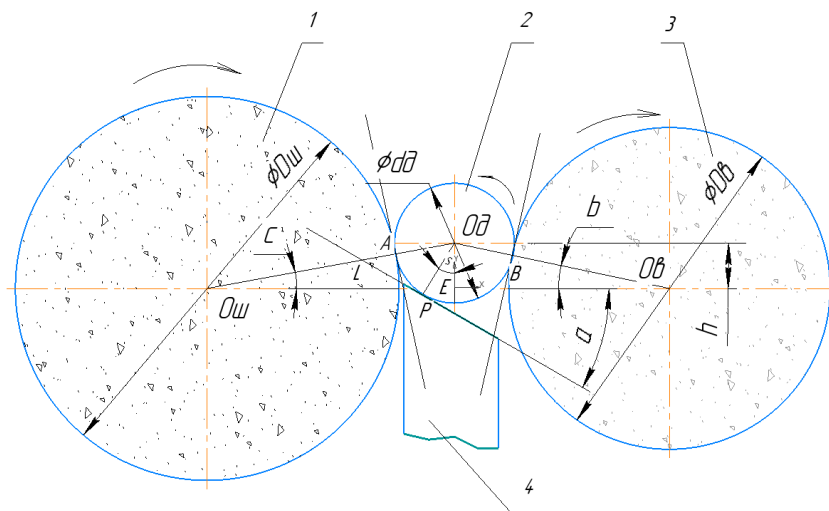


Рис. 2. Блок-схема расчета параметров наладки оборудования

На следующем этапе на основе рассчитанных значений наладочных параметров проводится проверка с позиции выполнения условия силового замыкания при реализации обработки детали в части обеспечения контактов обрабатываемой поверхности во всех трех точках с элементами технологической системы. Данное геометро-пространственное условие является обяза-

Продолжением реализации действий в соответствии с блок-схемой является возможность проведения анализа нескольких вариантов расчета наладочных параметров, отличающихся значениями рекомендованных высот установления центра обрабатываемой поверхности относительно горизонтальной линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов, что расширяет многовариантность принятия решений и позволяет на следующих этапах проектирования технологических операций принимать рациональные решения.

Экспериментальная проверка созданных моделей, алгоритмов и программного обеспечения выполнялась на базе исходных данных изготовления детали «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520–2011 в условиях ПР-8 АО «ЕПК Саратов» на станке Sasl 200*500. Представлено графическое представление (обозначения приведены на рис. 3) для первого прохода предварительного шлифования, подтверждающее взаимосвязь размерных характеристик отдельных элементов технологической системы и их влияние на назначение наладочных параметров (рис. 4–16).



149

На рис. 4–7 представлены графики зависимостей при изменяющемся диаметре шлифовального круга I ; на рис. 8–10 – при изменяющемся диаметре ведущего круга 3 ; на рис. 11–13 – при неизменяющейся величине суммы диаметров шлифовального I и ведущего 2 ведущих кругов; на рис. 14–16 – при изменении диаметра заготовки в рамках допуска координат точек контакта поверхности заготовки 2 со шлифовальным кругом – т. A , с ведущим кругом – т. B , опорной поверхностью ножа 4 – т. P , при принятии за центр координат центра заготовки обрабатываемой поверхности.

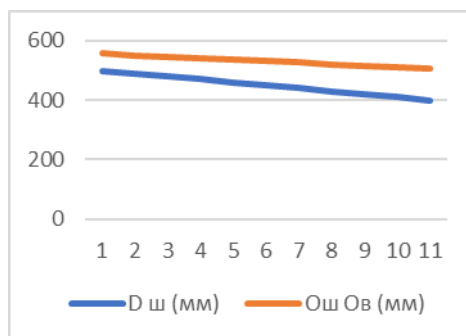


Рис. 4. Влияние расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов от диаметра шлифовального круга

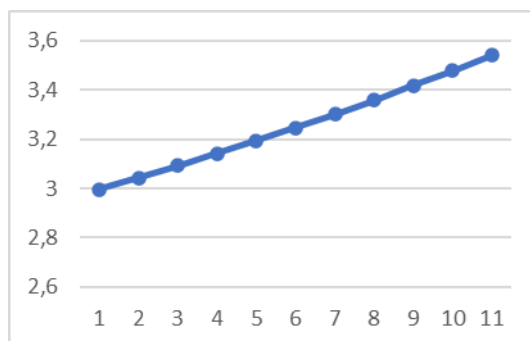


Рис. 5. Влияние значения угла c° от диаметра шлифовального круга

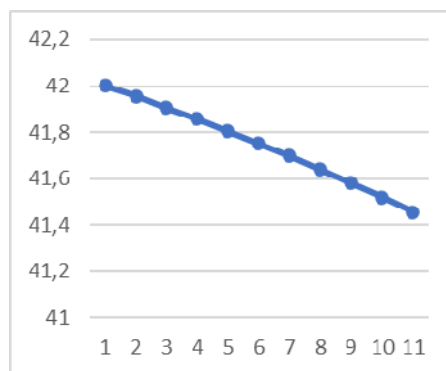


Рис. 6. Влияние значения угла f° (между линией, соединяющей центры заготовки и шлифовального круга и линией, соединяющей центр заготовки с точкой контакта заготовки и опорной поверхностью ножа) от диаметра шлифовального круга

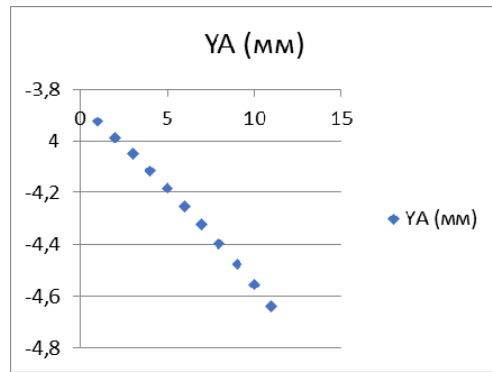


Рис. 7. Влияние значения координаты Y_A от диаметра шлифовального круга

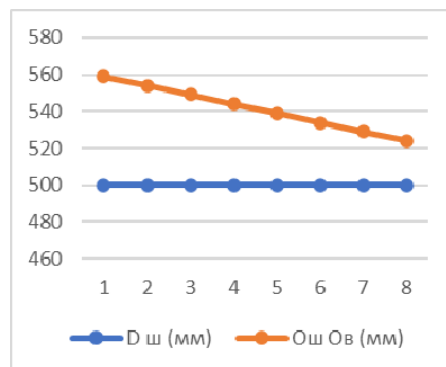


Рис. 8. Влияние расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов от диаметра ведущего круга

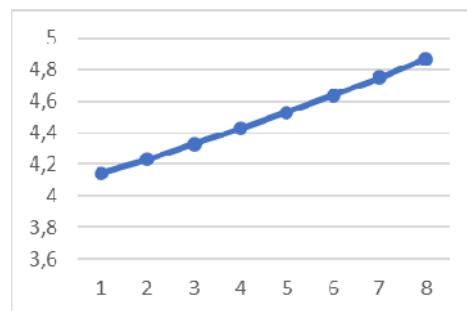


Рис. 9. Влияние значения угла b° от диаметра ведущего круга

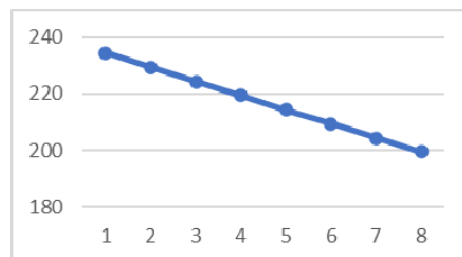


Рис. 10. Влияние диаметра ведущего круга на величину расстояния по горизонтали между центром ведущего круга и осью заготовки

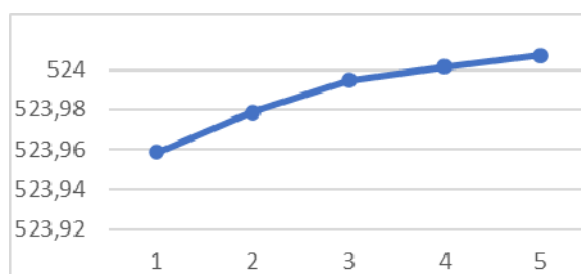


Рис. 11. Изменение расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов

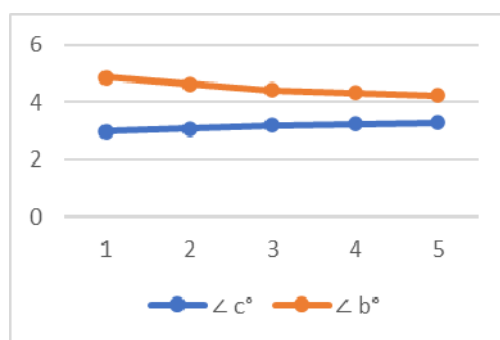


Рис. 12. Изменение величин углов c° и b°

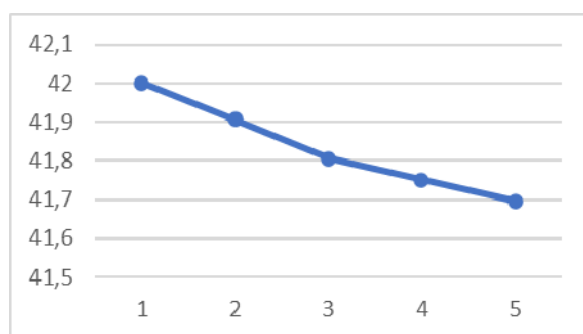


Рис. 13. Изменение угла f°

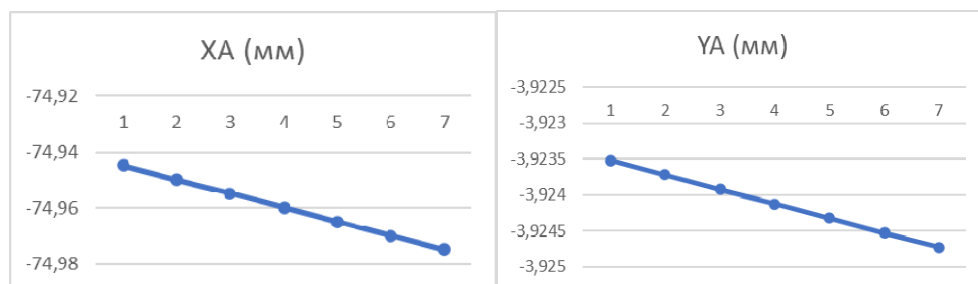


Рис. 14. Изменение координат т. А

Результаты

Полученные результаты подтверждают взаимовлияние всех рассматриваемых характеристик и доказывают необходимость создания целостной ме-

тодической основы по расчету наладочных параметров операций бесцентрового шлифования, без учета которых невозможно обеспечить технологическое сопровождение процедур подготовки и реализации процессов обработки деталей.

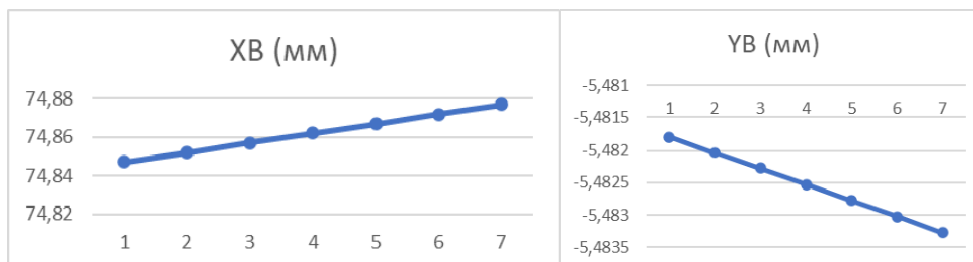


Рис. 15. Изменение координат т. В

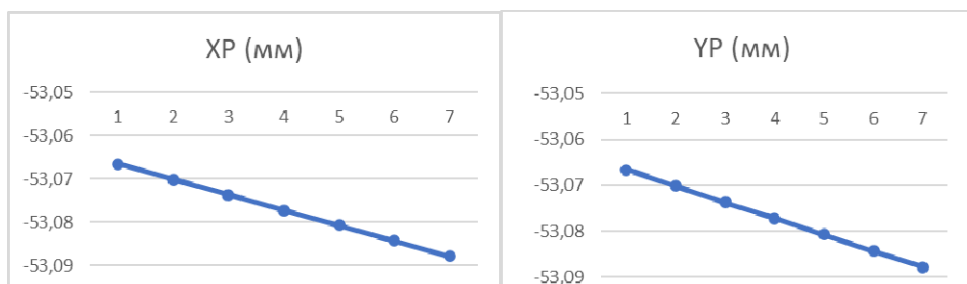


Рис. 16. Изменение координат т. Р

Заключение

Проведенный анализ известных научных работ по технологическому обеспечению операций бесцентрового шлифования с позиций современных условий и сложившихся в настоящий период технико-экономических требований показал, что базовые принципы, на которых строится методическое обеспечение в данной области, не позволяет исключить сугубо субъективный фактор процесса наладки оборудования и управление процессом. Такая ситуация не дает возможности эффективного функционирования производственных систем, состоящих из групп бесцентрового шлифовального оборудования. Данный вывод подтвержден исследованиями, проведенными на действующих машиностроительных предприятиях Поволжского региона, в производственном процессе которых задействованы технологии обработки заготовок методом проходного бесцентрового шлифования.

Предложены пути развития научно-методической базы технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования на основании полученных авторами результатов. Разработаны модели определения наладочных параметров с учетом реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок с учетом их взаимовлияния, алгоритмическое и программное обеспечение выполнения проектных процедур наладки станков. Результаты проведенной апробации теоретических исследований для условий действующего производства подтвердили выдвинутые гипотезы и положения и позволили совместно со специалистами

предприятий сформулировать принципы разрабатываемых методических положений наладки технологических операций проходного бесцентрового шлифования как реализующих созданные формализованные модели, так и учитывающих их удобное практическое внедрение и использование.

Список литературы

1. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Машгиз, 1952. 286 с.
2. Прохоров А. Ф., Константинов К. Н., Волков Л. П. Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков. М. : Машиностроение, 1976. 192 с.
3. Филькин В. П., Колтунов И. Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М. : Машиностроение, 1971. 204 с.
4. Муцянюк В. И., Братчиков А. Я. Бесцентровое шлифование. Л. : Машиностроение, 1986. 96 с.
5. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
6. Безъязычный В. Ф. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2013. 568 с.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8. С. 36–39.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Ульянова Л. Д., Шалунов В. В. Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 147–160.
9. Митин С. Г., Бочкарев П. Ю. Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для проектирования технологических операций со сложной структурой // Автоматизация в промышленности. 2018. № 2. С. 45–51.
10. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
11. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1, № 1. С. 61–69.
12. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159.
13. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. 4-е изд., перераб. и доп. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.
14. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Суслова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

References

1. Slonimskiy V.I. *Teoriya i praktika bescentrovogo shlifovaniya. 2-e izd., pere-rab. i dop.* = *Theory and practice of centerless grinding. The 2nd edition, revised and supplemented.* Leningrad: Mashgiz, 1952:286. (In Russ.)
2. Prokhorov A.F., Konstantinov K.N., Volkov L.P. *Naladka i ekspluatatsiya bes-tsentrovyykh shlifoval'nykh stankov* = *Adjustment and operation of centerless grinding machines.* Moscow: Mashinostroenie, 1976:192. (In Russ.)

3. Fil'kin V.P., Koltunov I.B. *Progressivnye metody bestsentrovogo shlifovaniya = Progressive methods of centerless grinding*. Moscow: Mashinostroenie, 1971:204. (In Russ.)
4. Mutsyanko V.I., Bratchikov A.Ya. *Bestsentrovoe shlifovanie = Centerless grinding*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986:96. (In Russ.)
5. Ashkinaziy Ya.M. *Bestsentrovye shlifoval'nye stanki. Konstruktsii, obrabotka i pravka = Centerless grinding machines. Design, processing and dressing*. Moscow: Mashinostroenie, 2003:352. (In Russ.)
6. Bez"yazychnyy V.F. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov = Fundamentals of mechanical engineering technology: textbook for universities*. Moscow: Mashinostroenie, 2013:568. (In Russ.)
7. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Structuring of centerless grinding methods using cluster analysis. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2022;(8):36–39. (In Russ.)
8. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Ul'yanova L.D., Shalunov V.V. Improving the technological preparation of centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(4):147–160. (In Russ.)
9. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Development of models and methods for automation of design procedures for designing technological operations with a complex structure. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2018;(2):45–51. (In Russ.)
10. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Determination of setup parameters for the centerless grinding operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):144–153. (In Russ.)
11. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Grouping of longitudinal centerless grinding operations according to technological characteristics. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik = Voronezh Scientific and Technical bulletin*. 2024;1(1):61–69. (In Russ.)
12. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Interrelation of forces in continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):149–159. (In Russ.)
13. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. (eds.). *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya: v 2 t. 4-e izd., pererab. i dop. = Handbook of a mechanical engineer: in 2 volumes. The 4th edition, revised and supplemented*. Moscow: Mashinostroenie, 1986;2:496. (In Russ.)
14. Suslov A.G. (ed.). *Spravochnik tekhnologa = Technologist's handbook*. Moscow: Innovatsionnoe ma-shinostroenie, 2019:800. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Витальевич Малинин

аспирант, Камышинский
технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного
технического университета (Россия,
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: mpv92@yandex.ru

Pavel V. Malinin

Postgraduate student, Kamyshin
Technological Institute, branch of
Volgograd State Technical University
(6A Lenina street, Kamyshin, Russia)

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения и прикладной механики, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Россия, г. Камышин, ул. Ленина, 6А); профессор кафедры технического обеспечения АПК, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: bpy@mail.ru

Petr Yu. Bochkarev

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of engineering technology and applied mechanics, Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University (6A Lenina street, Kamyshin, Russia); professor of the sub-department of technical support of the agro-industrial complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street, Saratov, Russia)

Игорь Иосифович Артемов

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

Igor' I. Artemov

Doctor of engineering sciences, professor, director of the Research Institute of Fundamental and Applied Research, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Михаил Олегович Гончаров

инженер, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: mixgoncharov@gmail.com

Mikhail O. Goncharov

Engineer, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street, Saratov, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.08.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 11.09.2024

Принята к публикации / Accepted 13.10.2024

УДК 621.914:658.562

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик

Е. С. Янов¹, С. В. Антонычев², А. В. Анцев³, М. С. Воротилин⁴, Е. И. Минаков⁵

^{1,3,4,5}Тульский государственный университет, Тула, Россия

²ООО «Энергопромсервис», Москва, Россия

¹es.yanov@mail.ru, ²25111976@list.ru, ³a.antsev@yandex.ru, ⁵eminakov@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях санкционного давления вновь стал актуальным вопрос интенсификации производства. Повышение эффективности производства за счет внедрения новых технологий – это уже не просто мировой тренд, а одно из условий выживания, при этом цифровизация как один из основных драйверов роста и развития играет здесь важнейшую роль. Цель исследования – обоснование варианта рационального места размещения датчика вибрации диагностического модуля информационно-измерительной системы мониторинга технологических систем. *Результаты.* На примере фрезерного станка BRIDGEPORT (модель Hardinge GX 600) предложен вариант формирования «вибропаспорта» на основе регистрируемых вибродинамических характеристик при работе станка, анализ которого позволил определить место установки датчика вибрации.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, датчик вибрации, вибропаспорт, вибродиагностика, фрезерный станок

Для цитирования: Янов Е. С., Антонычев С. В., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 157–166. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Studying methods for controlling the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics

E.S. Yanov¹, S.V. Antonychev², A.V. Antsev³, M.S. Vorotilin⁴, E.I. Minakov⁵

^{1,3,4,5}Tula State University, Tula, Russia

²“Energopromservis” LLC, Moscow, Russia

¹es.yanov@mail.ru, ²25111976@list.ru, ³a.antsev@yandex.ru, ⁵eminakov@bk.ru

Abstract. *Background.* In the context of sanctions pressure, the issue of production intensification has again become relevant. Increasing production efficiency through the introduction of new technologies is no longer just a global trend, but one of the conditions for survival, while digitalization as one of the main drivers of growth and development plays a crucial role here. The purpose of the study is to substantiate the option of a rational location for the vibration sensor of the diagnostic module of the information and measuring system for monitoring technological systems. *Results.* Using the example of the BRIDGEPORT milling machine (model Hardinge GX 600) an option for forming a "vibration passport" is proposed based on the recorded vibrodynamics characteristics during machine operation, the analysis of which made it possible to determine the location of the vibration sensor.

© Янов Е. С., Антонычев С. В., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Keywords: information and measuring system, vibration sensor, vibration passport, vibration diagnostics, milling machine

For citation: Yanov E.S., Antonychev S.V., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Studying methods for controlling the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):157–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Введение

В условиях санкционного давления и мирового кризиса отечественное машиностроение получило стимул к дополнительному развитию как единственной возможной альтернативе банкротства. Вновь стал актуальным вопрос интенсификации производства, при этом цифровизация как один из основных драйверов роста и развития играет здесь важнейшую роль.

Повышение эффективности производства за счет внедрения новых технологий – это уже не просто мировой тренд, а одно из условий выживания. Но все инновационные системы создают предпосылки для снижения человеко-часов на производстве, поэтому у многих сотрудников, тем более линейных исполнителей, есть опасения, что качественная работа этой системы приведет к массовым сокращениям рабочих.

Материалы и методы

Одним из примеров цифровизации производства является работа [1], в которой рассматривались вопросы разработки информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния режущего инструмента при точении по уровню вибрации в процессе механической обработки и мониторинга состояния оборудования, реализованной в виде аппаратно-программного комплекса (АПК). Именно при обработке исследования природы вибраций представляют наибольший интерес [2]. Подробнее в [3] рассмотрены вопросы выбора оптимального расположения датчиков вибрации на токарных станках. Кроме того, в работе [4] рассматривались вопросы применения АПК для решения производственных задач по оптимизации режимов обработки и контроля технологической дисциплины.

Отметим, что рассмотренные выше аспекты разработки и внедрения АПК касаются токарной обработки, а для применения на других видах оборудования требуется проведение отдельных работ. Так, в случае фрезерования причины вибраций и ее распространение по узлам станка изучены недостаточно. В работе [5] рассматривались вопросы контроля вибрации в процессе обработки на фрезерном станке с помощью датчика вибрации, расположенного на державке режущего инструмента. Однако применение такого типа датчика приводит к возникновению дополнительных технических сложностей:

1. Необходимость постоянной зарядки аккумулятора датчика, так как время автономной работы ограничено емкостью аккумулятора.
2. Отсутствие унификации, так как геометрические размеры корпуса датчика зависят от державки, на которую он устанавливается.
3. Не исключена возможность повреждения датчика в процессе работы станка.

4. Значительные затраты на внедрение, так как каждый инструмент в магазине станка должен оснащаться собственным датчиком, что существенно повышает стоимость такой системы, установленной на станке.

В этой связи определение оптимальных мест для установки датчиков вибрации диагностических модулей АПК и изучение с их помощью вибродинамических характеристик фрезерных станков с целью получения достоверных исходных данных как основы для корректной работы информационно-измерительной системы (ИИС) является актуальной задачей.

Вибрации при фрезеровании вызываются прежде всего прерывистостью самого процесса фрезерования. Наибольшие вибрации, как известно, в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) при фрезеровании претерпевает фреза, закрепленная в коническом отверстии шпинделя станка. В связи с этим ранее проводились опыты по установлению характера и интенсивности вибраций при фрезеровании фрезами различных диаметров, которые показали, что с уменьшением диаметра фрезы, т.е. с уменьшением жесткости системы, интенсивность колебаний возрастает [6]. Вибрации при фрезеровании одновременно с ухудшением чистоты обработанной поверхности ускоряют износ инструмента, снижают точность обработки и вызывают преждевременный износ оборудования.

Для определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля проведены работы по оценке вибродинамических характеристик фрезерного оборудования на примере вертикального фрезерного станка BRIDGEPORT (модель Hardinge GX 600) (рис. 1,а). Измерение вибрации проводилось анализатором вибрации АГАТ-М, производство ООО ДИАМЕХ-2000 (рис. 1,б).

Акселерометр АС-102 (канал А) располагался в ключевых точках станка (рис. 1,в) путем поочередной установки датчика на магните в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях в соответствии с действующей нормативной базой (ГОСТ ИСО 10816-3-1999), а именно: т.1п – двигатель в поперечном направлении; т.2в – задняя опора шпинделя в вертикальном направлении; т.3в – шпиндель в вертикальном направлении; т.3п – шпиндель в продольном направлении; т.4о – суппорт в осевом направлении; т.4в – суппорт в вертикальном направлении; т.4п – суппорт в продольном направлении.

В процессе исследования измерялись следующие представления вибрации:

- спектры виброскорости в диапазоне от 2 до 5000 Гц;
- спектры виброускорения в диапазоне от 2 до 10 000 Гц.

Для определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля использовался вариант вибродиагностики по нескольким уровням:

- 1) диагностика по общему уровню параметров вибрации;
- 2) спектральный анализ.

Собранную информацию о вибрации технических систем с целью хранения истории технического состояния технических систем и их отдельных элементов, а также получения этой информации за необходимый период в ряде работ [7–10] предлагается записывать в информационный объект – вибропаспорт. В данной работе под вибропаспортом системы СПИЗ понимается информационный объект, содержащий информацию об уровне вибрации

системы СПИЗ в процессе обработки за определенный период времени на разных уровнях анализа.

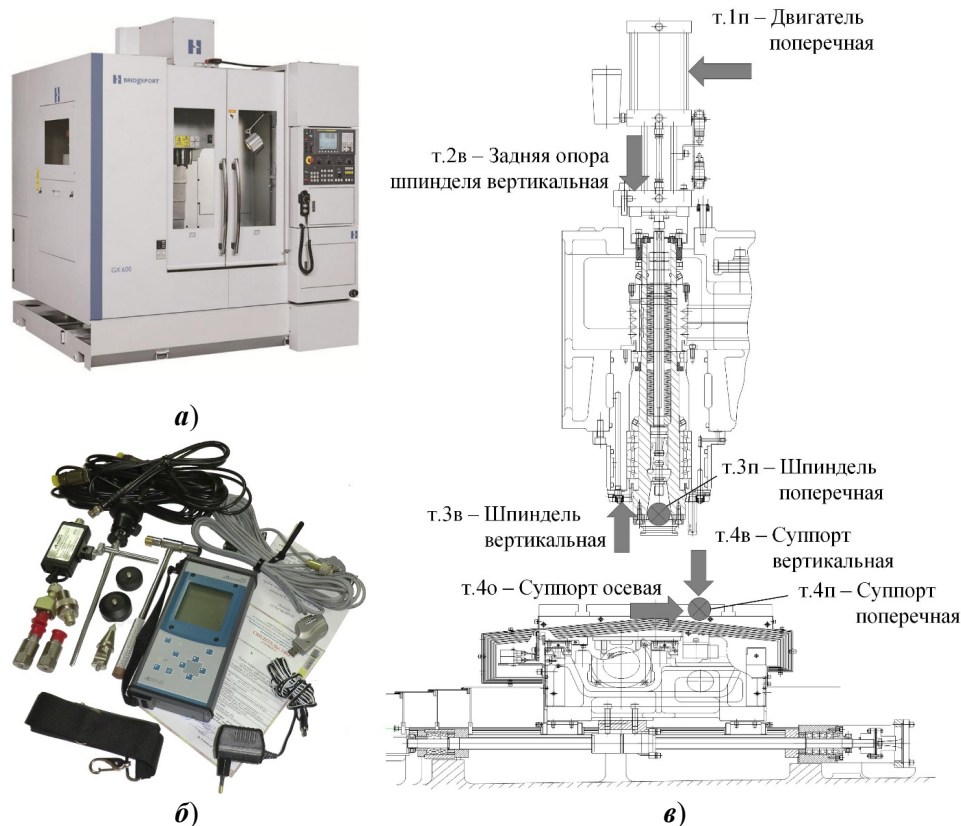


Рис. 1. Станок и оборудование для проведения исследования: *а* – станок BRIDGEPORT – модель Hardinge GX 600; *б* – анализатор вибрации АГАТ-М; *в* – схема размещения акселерометра AC-102

В случае диагностики по общему уровню параметров вибрации критерии работы оборудования полностью ориентированы на нормативные уровни вибрации, соответствующие определенному элементу. При этом превышение принятой нормы уровня вибрации может свидетельствовать о дефекте соответствующего элемента. Результаты измерения виброскорости в полосе 2–5000 Гц в процессе обработки представлены в табл. 1, а результаты измерения виброускорения в полосе 10–10 000 Гц – в табл. 2.

Таблица 1
Результаты измерения виброскорости в полосе 2–5000 Гц

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации
Вертикальное	–	0,2	0,2	0,1	Зона А – до 2,3 мм/с Зона Б – до 4,5 мм/с Зона С – до 7,1 мм/с Зона D – свыше 7,1 мм/с
Поперечное	0,4	–	0,1	0,1	
Осевая	–	–	–	2,7	

Таблица 2

Результаты измерения виброускорения в полосе 10–10000 Гц

Режим работы	Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации, м/с ²	
На холостом ходу	вертикальное	–	1,8	1,1	0,1	10	20
	поперечное	3,1	–	1,5	0,1		
	осевое	–	–	–	0,1		
Под нагрузкой	вертикальное	–	2,0	2,3	0,1		
	поперечное	3,2	–	2,0	0,1		
	осевое	–	–	–	0,2		

Результаты

Анализ измеренных значений виброскорости в выбранных точках замера показывает, что данный параметр не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования, так как обладает низкой чувствительностью и способен зарегистрировать лишь последнюю стадию развития дефектов рассматриваемых узлов и не дает возможности достоверной оценки оптимальности места установки датчика вибрации диагностического модуля.

Анализ измеренных значений виброускорения в выбранных точках замера показывает, что данный параметр информативнее виброскорости и может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования. Увеличение уровня виброускорения под нагрузкой (в процессе обработки) также позволяет косвенно контролировать силу резания для оценки состояния режущего инструмента.

Из табл. 2 видно, что максимальный уровень вибрации наблюдается в точке 1. Но в этой точке происходит наложение вибраций из разных источников (процесс резания, работа электродвигателя), поэтому сложнее выделить составляющую вибрационного сигнала, характеризующую работу оборудования непосредственно в процессе обработки. При этом распространение вибросигнала от инструмента по узлам станка достаточно хорошо локализуется по всей цепке двигателя и шпинделя. Вибросигнал без затухания хорошо регистрируется в точке 2. Уровни вибрации в процессе обработки в точках 2 и 3 находятся на одном уровне, но размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным, так как обеспечивает защиту датчика от воздействий со стороны стружки, смазочно-охлаждающей жидкости или оператора. При прохождении через упругие элементы станка уровень вибрации сильно ослабляется, поэтому расположение датчика в точке 4 нецелесообразно.

Для уточнения состояния узлов оборудования и процесса обработки использован спектральный анализ вибрационных параметров. Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, который позволяет выявить частотный состав сигнала. Спектрограммы виброскорости используются при мониторинге развитых повреждений. Анализ спектрограмм виброускорения позволяет идентифицировать нестабильность работы оборудования на ранней стадии. При спектральном анализе, кроме частоты колебаний, учитывают значение амплитуды на данной частоте. Для анализа вибрационного спектра

выделяют основные составляющие спектрального сигнала: оборотная частота, субгармоники, резонансные частоты, негармонические колебания, зубцовые частоты, боковые полосы, вибрации электрического происхождения и шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах.

На рис. 2 по рассматриваемому фрезерному станку представлены спектры виброскорости, а на рис. 3 – виброускорения.

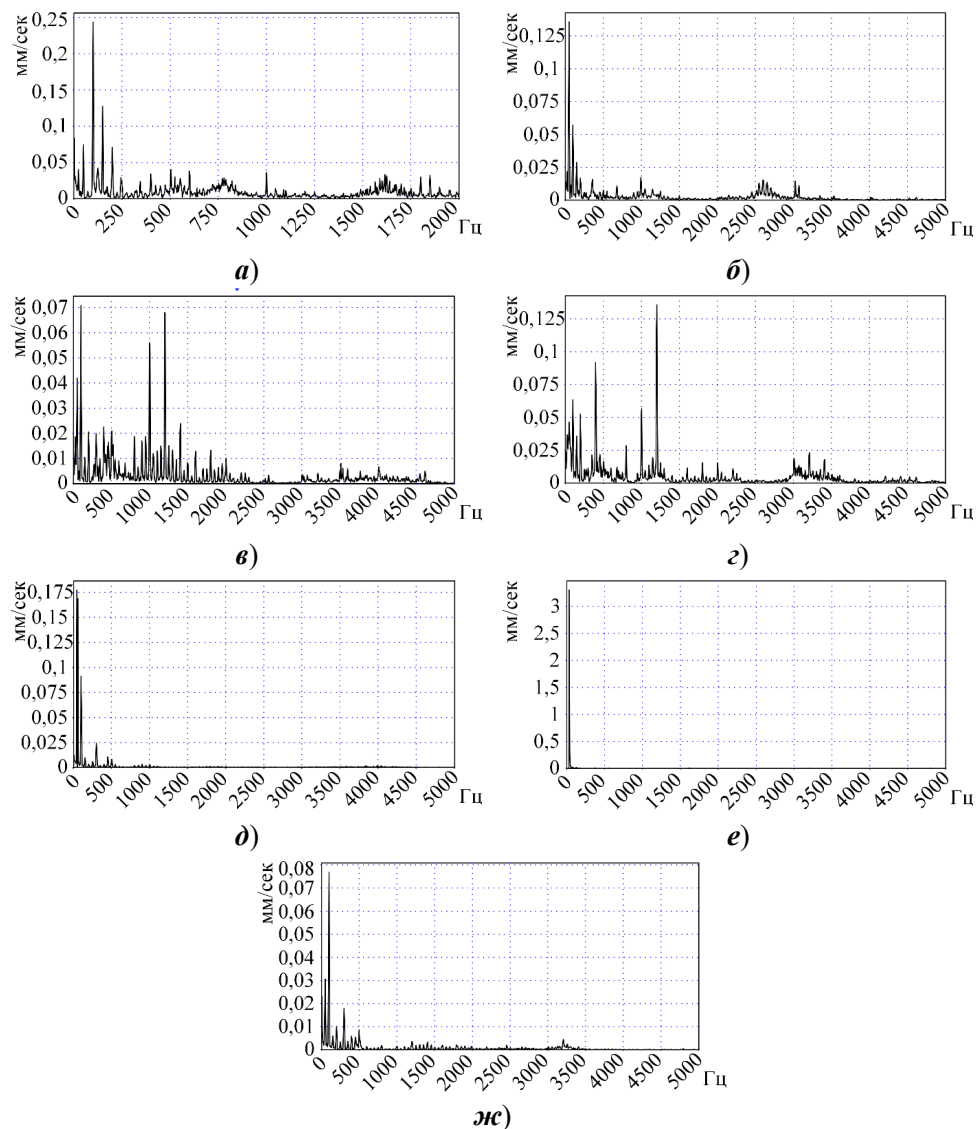


Рис. 2. Спектр виброскорости в ключевых точках станка:

а – 1п; *б* – 2в; *в* – 3п; *г* – 3в; *д* – 4п; *е* – 4о; *ж* – 4в

Общий уровень составляющих спектра виброскорости в полосе частот от 2 до 5000 Гц не превышает принятую норму по параметру виброскорости 4,5 мм/с. На всех спектрах прослеживается оборотная частота вращения шпинделя 43,75 Гц, что соответствовало частоте вращения шпинделя 2625 об/мин в процессе обработки во время проведения исследования.

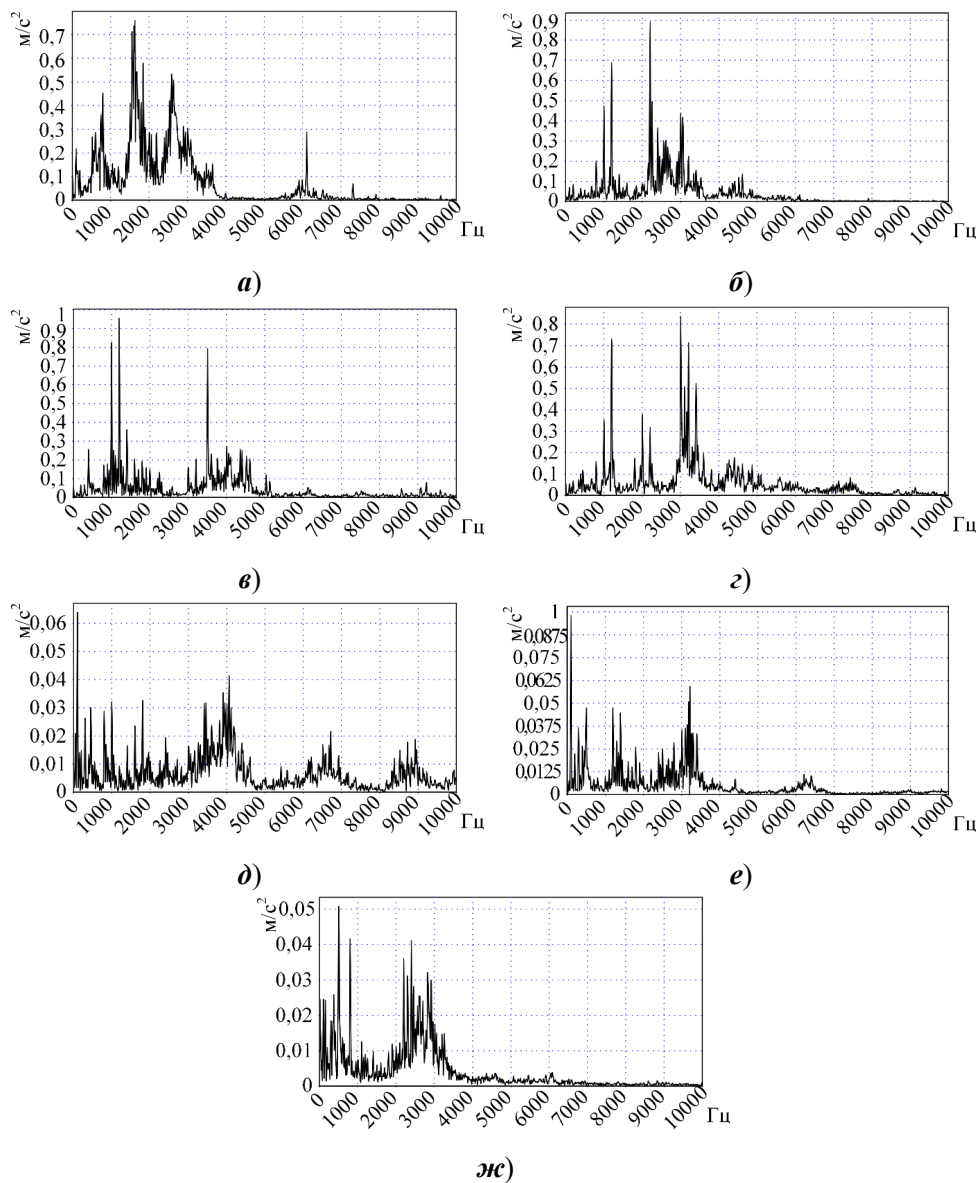


Рис. 3. Спектр виброускорения в ключевых точках станка:
а – 1п; *б* – 2в; *в* – 3п; *г* – 3в; *д* – 4п; *е* – 4о; *жс* – 4в

По спектрам виброускорения в полосе частот от 2 до 20 000 Гц не обнаружены ударные импульсы, превышающие общую принятую норму виброускорения 10 м/с^2 . Соответственно никаких повреждений исследуемый станок не имеет.

Обсуждение

Видно, что диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях данным методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей

картине частотного распределения всей мощности вибросигнала. Анализ спектра виброускорения в ключевых точках станка подтвердил, что размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным.

В АПК [1] для контроля вибрации используются микроэлектромеханические системы (МЭМС) акселерометры, с помощью которых производится контроль вибрации 200 раз в секунду, соответственно есть возможность контролировать сигнал до 100 Гц. Диапазон измерений, в котором работает датчик МЭМС, по умолчанию составляет $\pm 4g$ ($\pm 39,2 \text{ м/с}^2$). Максимально настраиваемый диапазон $\pm 16g$ ($\pm 156,8 \text{ м/с}^2$).

Заявленный частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станов и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте). Датчиками на основе МЭМС акселерометра не получится в полной мере контролировать дефекты подшипников качения (необходимый диапазон 8000–16000 Гц), дефекты подшипников качения приводного двигателя (необходимый диапазон 20–400 Гц) и дефекты электромагнитной системы электродвигателей (необходимый диапазон 800–3000 Гц).

Заключение

Расширение функциональных возможностей АПК путем обеспечения его применения на фрезерных станках, эксплуатируемых в составе машиностроительных предприятий Тульского региона, с использованием результатов проведенного анализа вибрационных характеристик и определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля обеспечивает эффективную эксплуатацию оборудования с целью повышения качества выпускаемой продукции и своевременного реагирования на нештатные ситуации.

Список литературы

1. Янов Е. С., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И. Аппаратно-программный комплекс мониторинга технологических систем и процессов // СТИН. 2024. № 5. С. 32–35.
2. Антонычев С. В., Савин М. В., Аляев А. А., Дубовцев А. В. Приспособление для проверки технического состояния подшипников качения валковой сборки станов холодной прокатки труб на основе экспертной системы «СВК-Ариадна» // Производство проката. 2006. № 1. С. 41–45.
3. Анцев А. В., Данг Ч. Х., Янов Е. С., Полев М. В. Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 2. С. 151–158.
4. Янов Е. С., Анцев А. В., Воротилин М. С. Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении. Тула : Изд-во ТулГУ, 2024. 173 с.
5. Анцев А. В., Данг Х. Ч. Оценка состояния режущего инструмента по уровню вибрации при фрезерной обработке // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий : сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / под ред. В. А. Лебедева. Ростов н/Д. : ДГТУ, 2020. С. 131–138.
6. Сахаров Д. В., Дуюн Т. А. Методика определения жесткости фрезы, установленной в цанговый патрон при обработке нержавеющей сталей // Вестник Белгород-

- ского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2013. № 2. С. 97–99.
7. Голованов В. В., Василенко В. Г., Земсков А. А. [и др.]. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 3-1. С. 213–221.
 8. Позынич Е. К. Исследование процесса деградации крановых металлоконструкций методом неразрушающего контроля // Механики XXI века. 2008. № 7. С. 341–345.
 9. Суриков Д. Г. Разработка методики предупреждения отказов механических трансмиссий мехатронных приводов трубопроводной арматуры // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 5-2 (313). С. 233–241.
 10. Анцев А. В., Пасько Н. И., Янов Е. С., Данг Х. Ч. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296.

References

1. Yanov E.S., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Hardware and software complex for monitoring technological systems and processes. *STIN*. 2024;(5):32–35. (In Russ.)
2. Antonychev S.V., Savin M.V., Alyaev A.A., Dubovtsev A.V. Device for checking the technical condition of rolling bearings of the roll assembly of cold rolling mills for pipes based on an expert system “SVK-Ariadna”. *Proizvodstvo prokata* = Rolled products production. 2006;(1):41–45. (In Russ.)
3. Antsev A.V., Dang Ch.Kh., Yanov E.S., Polev M.V. Experimental setup for vibration control during CNC machining. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(2):151–158. (In Russ.)
4. Yanov E.S., Antsev A.V., Vorotilin M.S. *Issledovanie vliyaniya iznosa rezhushchego instrumenta na vibratsiyu tonkostennykh zagotovok pri tochenii* = *Studying the influence of cutting tool wear on the vibration of thin-walled workpieces during turning*. Tula: Izd-vo TulGU, 2024:173. (In Russ.)
5. Antsev A.V., Dang Kh.Ch. Evaluation of the condition of the cutting tool by the vibration level during milling. *Fundamental'nye osnovy fiziki, khimii i mekhaniki naukoemkikh tekhnologicheskikh sistem formoobrazovaniya i sborki izdeliy: sb. tr. nauch. simpoziuma tekhnologov-mashinostroiteley* = *Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of scientific technological systems of product formation and assembly: collection of scientific papers on mechanical engineering*. Rostov-on-Don: DGTU, 2020:131–138. (In Russ.)
6. Sakharov D.V., Duyun T.A. Method for determining the rigidity of a cutter installed in a collet chuck when processing stainless steels. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* = *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013;(2):97–99. (In Russ.)
7. Golovanov V.V., Vasilenko V.G., Zemskov A.A. et al. Methods and means of diagnostics of aircraft drives during their operation according to their technical condition. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Samara State Aerospace University*. 2015;14(3-1):213–221. (In Russ.)
8. Pozynich E.K. Study of the process of degradation of crane metal structures by non-destructive testing. *Mekhaniki XXI veka* = *Mechanics of the 21st century*. 2008;(7):341–345. (In Russ.)
9. Surikov D.G. Development of a methodology for preventing failures of mechanical transmissions of mechatronic drives of pipeline valves. *Fundamental'nye i prikladnye*

problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015;(5-2):233–241. (In Russ.)

10. Antsev A.V., Pas'ko N.I., Yanov E.S., Dang Kh.Ch. Methodology of vibration signal processing for assessing the condition of a cutting tool. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Engineering sciences*. 2020;(4):291–296. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Сергеевич Янов

кандидат технических наук, заместитель
директора Тульской инженерной школы
«Интеллектуальные оборонные
системы» имени академика
А. Г. Шипунова, Тульский государствен-
ный университет (Россия, г. Тула,
пр-кт Ленина, 92)

E-mail: es.yanov@mail.ru

Evgeny S. Yanov

Candidate of engineering sciences,
deputy director, Tula Engineering School
“Intelligent Defense Systems” named
after Academician A.G. Shipunov,
Tula State University (92 Lenina
avenue, Tula, Russia)

Станислав Владимирович Антонычев

Генеральный директор
ООО «Энергопромсервис»
(г. Москва, ул. Изюмская, д. 46, кв. 168)

E-mail: 25111976@list.ru

Stanislav V. Antonychev

Director general “Energopromservis” LLC
(app. 168, 46 Izyumskaya street,
Moscow, Russia)

Александр Витальевич Анцев

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой машиностроения
и материаловедения, Тульский
государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

E-mail: a.antsev@yandex.ru

Aleksandr V. Antsev

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of mechanical engineering and materials
science, Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Михаил Сергеевич Воротилин

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе, Тульский
государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

Mikhail S. Vorotilin

Doctor of engineering sciences, professor,
vice-rector for research, Tula State
University (92 Lenina
avenue, Tula, Russia)

Евгений Иванович Минаков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектроники,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

E-mail: eminakov@bk.ru

Evgeny I. Minakov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
electronics, Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.07.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.08.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

ПАМЯТИ УЧЕНЫХ

IN THE MEMORY OF SCIENTISTS

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ СМОГУНОВ

(к восьмидесятилетию со дня рождения)

VLADIMIR VASILYEVICH SMOGUNOV

(on the eightieth anniversary of his birth)



Исполнилось 80 лет со дня рождения Владимира Васильевича Смогунова, выдающегося ученого, действительного члена Международной академии информатизации, заслуженного работника высшей школы РФ.

Родился Владимир Васильевич Смогунов 16 августа 1944 г. в г. Пензе. После окончания средней школы работал фрезеровщиком и монтажником на Пензенском велозаводе (1963). С 1961 по 1966 г. проходил обучение на радиотехническом факультете Пензенского политехнического института (вечернее обучение). Работал инженером-регулирующим на заводе «Электроприбор» (1967), инструктором областного комитета ВЛКСМ (1968). В 1969 г. закончил университет марксизма-ленинизма (философское отделение). В 1968–1992 гг. работал инженером, руководителем группы, заместителем начальника отдела на предприятии Министерства среднего машиностроения (Пенза-19). В 1971–1973 гг. заочно обучался во Всесоюзном институте стандартизации, качества метрологии (факультет стандартизации и управления качеством), в 1979–1980 гг. – в Московском институте электронного машиностроения (специальный факультет). Закончил заочную аспирантуру (1979–1982), в 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1992 г. – доцент кафедры «Теоретическая механика». В 1994 году защитил докторскую диссер-

тацию. С 1994 г. – профессор кафедры «Теоретическая механика», с 2001 г. – заведующий кафедрой «Теоретическая механика», с 2009 г. – заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика».

Научная деятельность Владимира Васильевича Смогунова неразрывно связана с созданием научно-педагогической школы «Динамика гетерогенных структур» Пензенского государственного университета и руководством ею.

Научно-педагогическая школа «Динамика гетерогенных структур» Пензенского государственного университета базируется на научно-педагогической школе механики Одесского индустриального института, переместившейся в г. Пензу в октябре 1943 г. и развиваемой в дальнейшем трудами известных ученых-механиков Пензенского индустриального института, возглавлявших в разное время кафедру «Теоретическая механика»: Бориса Мейровича Абрамова (заведовал кафедрой с 1 октября 1943 г. по 18 августа 1947 г.); к.т.н., доцента Козьмы Мироновича Густина (заведовал кафедрой с 1 сентября 1947 г. по 7 марта 1957 г.); к.т.н., доцента Константина Ивановича Костина (заведовал кафедрой с 7 марта 1957 г. по 26 августа 1957 г.); к.ф.-м.н., к.т.н., доцента Бронислава Францевича Вилюма (заведовал кафедрой с 26 августа 1957 г. по 17 сентября 1971 г.); к.т.н., доцента Гедаля Овсеевича Ярошевича (заведовал кафедрой с 1 сентября 1971 г. по 1 сентября 1975 г.); к.т.н., доцента Алексея Александровича Ростова (заведовал кафедрой «Теоретическая механика» с 17 сентября 1976 г. по 1 сентября 1981 г.); д.т.н., профессора Николая Ивановича Гордиенко (заведовал кафедрой с 1 сентября 1981 г. по 1 октября 1996 г.).

Формирование научно-педагогической школы «Динамика гетерогенных структур» как современного раздела теоретической механики было осуществлено В. В. Смогуновым. На протяжении более 25 лет он являлся руководителем этой научно-педагогической школы.

Владимир Васильевич Смогунов – почетный инженер Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, действительный член (академик) Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, Международной академии информатизации. Он был членом Ученого совета ПГУ, членом экспертного совета ВАК, методического совета университета, ученым секретарем двух докторских диссертационных советов и член трех докторских диссертационных советов ПГУ.

В. В. Смогунов являлся главным редактором и соавтором многотомного издания «Динамика гетерогенных структур», монографии «Гибридный интеллект» (Пенза, 2007), в которой рассматриваются проблемы интеллекта индивида и социума как систем со сложной гетерогенной структурой. Общее число его научных трудов превышает 250.

В состав научно-педагогической школы входят и входили: д.т.н., профессор В. В. Смогунов (руководитель школы); д.т.н., профессор А. Н. Алексеев; д.т.н., профессор Н. Н. Вершинин; д.т.н., профессор В. А. Васильев; д.т.н., профессор А. Н. Литвинов; д.т.н., профессор П. Г. Михайлов; д.т.н., профессор А. Ю. Муйземнек; д.т.н., профессор В. Г. Недорезов; к.т.н., доцент Ю. Г. Бочкарева; к.т.н., доцент О. А. Вдовикина; к.т.н., доцент М. И. Вольников; к.т.н., доцент В. Ю. Зайцев; к.т.н., доцент А. В. Ноздрачев; к.т.н., доцент Б. А. Филиппов; к.т.н., доцент Т. В. Хураева; к.т.н., доцент В. А. Шорин и др.

Основными направлениями научных исследований коллектива научно-педагогической школы «Динамика гетерогенных структур» являются исследования по внешней и внутренней динамике гетерогенных структур, динамике гетерогенных структур дорог, теории субъективной самоорганизации интеллекта.

Основными результатами научных исследований являются разработанные методики экспериментальных исследований характеристик гетерогенных структур, модели и критерии оценки в области виброударозащиты стержневых гетерогенных структур, эволюционные модели структур, расчетно-экспериментальные методы исследования многофазных гетерогенных структур, методики исследования колебаний структур с распределенными параметрами.

Наиболее важные научные результаты, полученные за последние годы, связаны с открытием принципиально новой закономерности в диссипативных гетерогенных структурах – зависимости внешнего трения от ускорения, разработкой инновационных моделей реконструкции и укрепления тела дорог, с установлением механизмов разрушения дорог, с созданием инновационных средств спасения людей с многоэтажных зданий.

За время существования научно-педагогической школы издано более 116 научно-учебных трудов по динамике гетерогенных структур, 14 научно-учебных изданий, 32 статьи в научных журналах, получено шесть патентов.

Научная школа «Динамика гетерогенных структур» имеет уникальное оборудование собственной разработки.

Представителями школы получено множество дипломов, грамот, благодарственных писем от ректората, губернатора, других государственных структур. В. В. Смогунов в 2003 г. получил благодарственное письмо министра образования РФ В. М. Филиппова и был удостоен почетного звания «Заслуженный работник высшей школы РФ».

Результаты научной деятельности отражались в издаваемых собственных сборниках: «Системный анализ, обработка информации и новые технологии» (Пенза), «Динамика гетерогенных структур» (Пенза).

На кафедре функционировал постоянно действующий университетский семинар «Динамика гетерогенных структур» (руководитель – д.т.н., профессор В. В. Смогунов) с участием представителей вузов, предприятий, организаций, в том числе иногородних (Москва, Самара, Саратов, Саранск, Ульяновск, Волгоград, Астрахань, Челябинск, Магнитогорск, Пермь).

Члены научно-педагогической школы участвовали в работе различных редакционных коллегий: В. В. Смогунов был главным редактором научного журнала «Динамика гетерогенных структур», членом редколлегий центральных и региональных научных журналов: «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки», «Живая математика», «Математика, механика, информатика» (Пермь).

На базе научно-педагогической школы создано и работало Региональное отделение научного совета по методологии искусственного интеллекта, в том числе молодежная секция, целью работы которого являлись организация и повышение эффективности междисциплинарного диалога по проблемам искусственного интеллекта и вопроса его соотношений с естественным интеллектом, содействие интегративным процессам в области существующих

направлений научных исследований и технической деятельности, качественное методологическое обеспечение разработок проблематики искусственного интеллекта, распространение знаний по методологии когнитивных и компьютерных наук среди широкой научной общественности.

Под эгидой школы в 2008 г. организованы и проведены Международная конференция «Перспективные технологии искусственного интеллекта» и совещание руководителей научных школ «Эффективность гибридного интеллекта».

Поддерживаются тесные творческие связи с научными и учебными организациями: МАДИ, МИРЭА, МИЭМ, МГУ им. М. В. Ломоносова, МГУ им. Н. П. Огарева, МВТУ, САЭУ, СГУ, УГУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», БГТУ «Военмех», Саратовский ТУ, ГТУ, Магнитогорский ГТУ, Пермский ГУ, Астраханский ГТУ, Пензенская ГТУ, Пензенский ГУАС.

Общее число подготовленных аспирантов и докторов наук, в том числе из других вузов, превышает 26. Под руководством В. В. Смогунова защитили кандидатские диссертации 23 соискателя, в том числе: И. П. Климинов, В. Ю. Зайцев, В. Н. Решилов, Н. Я. Карасев, Максуд Даас, Н. А. Карпова, Т. А. Воячек, С. В. Цивин, С. С. Виноградов, Р. С. Шамсетдинов, А. В. Ротенберг, Г. В. Гуральник, Н. Н. Багаев, А. А. Сосна, В. Г. Горелин, Л. В. Провсирнин, Б. А. Филиппов, Ю. Г. Бочкарева, М. И. Вольников; докторские диссертации – три соискателя: А. И. Воячек, В. А. Васильев, П. Г. Михайлов.

Темы диссертаций посвящены динамике гетерогенных структур изделий приборостроения, микроэлектроники, датчиков ракетно-космических систем.

Результаты научных исследований, заключающиеся в разработке математических моделей для изучения динамики пространственных гетерогенных структур, внедрены в учебный процесс на кафедре «Теоретическая и прикладная механика и графика» в виде методик вычислительного эксперимента при изучении курса «Теоретическая механика» в разделе «Динамика» и используются в подготовке бакалавров по техническим направлениям подготовки и специальностям.

На базе компьютерного центра кафедры создана межкафедральная мультимедийная лаборатория, обеспечивающая обучение студентов различных специальностей, проведение и обработку результатов научных исследований.

С целью дальнейшего развития научно-технического творчества студентов, овладения ими навыков научно-исследовательской работы, проведения исследований по перспективной теме «Динамика гетерогенных структур» организован и работает студенческий научный кружок «Механика и графика».

Владимир Васильевич Смогунов умер 2 ноября 2023 г. Он был необычайно талантлив, очень работоспособен, обладал высокими моральными принципами и отличался личной скромностью. Среди студентов и сотрудников университета он пользовался заслуженным авторитетом. Он остался в нашей памяти как выдающийся ученый, педагог, организатор и патриот.

*Редакция журнала «Известия высших учебных заведений.
Поволжский регион. Технические науки».*

Коллектив кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика»

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материалы и методы. Результаты. Выводы) **и английском** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions) **языках**.

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавитов должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные направления (группы специальностей):

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки)

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки)

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки)

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. +7 (8412) 64-32-89. E-mail: volgavuz@pnzgu.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.