

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*Дмитриенко А. Г., Николаев А. В., Ляшенко А. В., Тюрин М. В.,
Ярославцева Д. А.*

ЭЛЕМЕНТЫ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
И КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
И ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

5

Борисов Г. А., Колодяжная И. Н., Слепова А. Ш.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

14

Конкина М. С., Медведева С. Н.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

19

Чернецов М. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

26

Щербакова А. А., Соловьев В. А.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АТОМОВ ГАЗОВ
ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИНЦИПОВ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

34

Уткин К. Э., Торгашин С. И., Хошев А. В.

УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

41

**Михайлов С. А., Горячев В. Я., Бростилова Т. Ю.,
Бростилов С. А., Шатова Ю. А.**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ В ЦЕХЕ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

47

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

**Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Бастрыгин К. И.,
Ефимов П. Н., Шуртин А. Э., Тугускин А. А.**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ДАТЧИКА БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ**

59

Миронов А. Н., Дементьева Е. С., Карпухин Э. В.
**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ SDN-СЕТЕЙ**

67

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Тычков А. Ю.

**АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОД ЭКГ СИГНАЛОВ
ПРИ ПОГРАНИЧНЫХ ПСИХИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВАХ**

77

Бердибаева Г. К., Бодин О. Н., Фирсов Д. С.

**КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВУКОВ АСТМАТИЧЕСКОГО ДЫХАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

86

Бодин О. Н., Убиенных А. Г., Убиенных Г. Ф., Кузьмин А. В.

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МИОКАРДЕ**

91

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 2 (24), 2018

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Dmitrienko A. G., Nikolaev A. V., Lyashenko A. V.,

Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A.

ELEMENTS OF DEVELOPMENT CONCEPT FOR INTELLIGENT
MONITORING AND CONTROL SYSTEMS IN THE ITEMS
OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT AND OBJECTS
OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE

5

Borisov G. A., Kolodyazhnaya I. N., Slepova A. S.

IMPROVING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL
SYSTEMS THROUGH THE APPLICATION
OF MODERN POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

14

Konkina M. S., Medvedeva S. N.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GRAPHO-ANALYTICAL
METHODS OF RESEARCH OF ELECTRIC CIRCUITS

19

Chernetsov M. V.

THE USE OF PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS
FOR THE IDENTIFICATION OF EQUIVALENT
CIRCUITS OF PARAMETRIC SENSORS

26

Shcherbakova A. A., Solov'ev V. A.

THE IDENTIFICATION OF THE GASES ATOMS
IN THE EMISSION SPECTRA USING THE PRINCIPLES
OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

34

Utkin K. E., Torgashin S. I., Khoshev A. V.

CONTROLLED SYNTHESIS OF THIN FILMS OBTAINED
BY MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE

41

***Mihailov S. A., Gorjachev V. Ya., Brostilova T. Yu.,
Brostilov S. A., Shatova Yu. A.***

APPLICATION OF THE METHOD OF DISTRIBUTED POWER
DENSITY TO OPTIMIZE THE LOCATIONS
OF THE SUBSTATIONS IN THE PLANT ENGINEERING

47

MEASUREMENTS OF ELECTRICAL AND MAGNETIC QUANTITIES

***Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Bastrygin K. I.,
Efimov P. N., Shurtin A. E., Tuguskin A. A.***

SIMULATION OF HIGH TEMPERATURE PIEZOELECTRIC
SENSOR OF RAPIDLY VARYING PRESSURES

59

Mironov A. N., Dementeva E. S., Karpukhin E. V.

NUMERICAL CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS
OF MAGNETOSTRICTIVE CONVERTERS
OF LEVEL USING SDN-NETWORKS

67

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENT

Tychkov A. Yu.

ANALYSIS OF EMPIRICAL MODES OF ECG SIGNAL
WITH BORDER MENTAL DISORDERS

77

Berdibaeva G. K., Bodin O. N., Firsov D. S.

CLASSIFICATION OF SOUNDS OF ASTHMATIC BREATHING
USING NEURAL NETWORKS

86

Bodin O. N., Ubiennykh A. G., Ubiennykh G. F., Kuzmin A. V.

SOFTWARE IMPLEMENTATION
OF THE CARDIAC EXCITATION MODEL

91

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.518.5: 007

DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-1

*А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Ляшенко,
М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева*

ЭЛЕМЕНТЫ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*A. G. Dmitrienko, A. V. Nikolaev, A. V. Lyashenko,
M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva*

ELEMENTS OF DEVELOPMENT CONCEPT FOR INTELLIGENT MONITORING AND CONTROL SYSTEMS IN THE ITEMS OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT AND OBJECTS OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрены элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля (СМиК) технического состояния объектов ракетно-космической техники (РКТ) и наземной космической инфраструктуры (НКИ). Проведен анализ основных тенденций развития современных технически сложных объектов РКТ и НКИ. **Материалы и методы.** Используется системный подход к рассмотрению проблемы создания интеллектуальных СМиК объектов РКТ и НКИ. **Результаты.** Представлены результаты реализации Проекта № 25, одобренного комиссией при Президенте Российской Федерации (РФ) «Создание интеллектуальных систем мониторинга и контроля состояния технически сложных объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры», созданы интеллектуальные СМиК, внедренные и успешно эксплуатируемые на стартовых комплексах «Союз» космодрома Байконур. На Президиуме научно-технического совета (НТС) Госкорпорации «Роскосмос» одобрены развитие и интеграция интеллектуальных СМиК на космодромах «Плесецк» и «Восточный», отмечено, что данные системы готовы к дальнейшему внедрению. **Выводы.** Предложен новый подход к концепции оценки технического состояния объектов РКТ и НКИ космодрома «Восточный» при формировании реальной модели объекта исследования на основе их эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ).

A b s t r a c t. Background. Elements of development concept for intelligent monitoring and control systems (MaCS) in the items of rocket and space equipment (RSE) and objects of ground-based space infrastructure (GSI) are discussed. Analysis of principal trends in devel-

opment of advanced technically demanding objects for RSE and GSI is carried out. **Materials and methods.** System approach to the development problem of intelligent MaCS in RSE and GSI objects is used. **Results.** Operational results of Project 25 «Development of Intelligent Monitoring and Control Systems for Monitoring the Condition of Technically Demanding Objects of Rocket and Space Equipment and Ground-Based Space Infrastructure» approved by the Presidential Commission of the Russian Federation are presented. MaCS have been developed, successfully installed and operated at «Soyuz» launch facilities of Baikonur Space Center. Presidium of Science and Engineering Board of State Space Corporation ROSCOSMOS has approved development and integration of intelligent MaCS at Plesetsk and Vostochny Space Centers and defined them as suitable for further implementation. **Conclusions.** New approach to the concept of condition estimation for technically demanding objects of Vostochny Space Center RSE and GSI has been suggested while developing an actual model of study subject on the basis of physical and operational characteristics.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интеллектуальная система мониторинга и контроля, наземная безопасность, ракетно-космическая техника, наземная космическая инфраструктура, стартовый комплекс.

Key words: intelligent monitoring and control system, ground operations safety, rocket and space equipment, ground-based space infrastructure, launch facility.

В соответствии со ст. 48.1 Градостроительного кодекса Российской Федерации № 190-ФЗ объекты космической инфраструктуры относятся к особо опасным и технически сложным объектам (ТСО) [1].

С целью обеспечения национальной безопасности, контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, предупреждения угроз техногенного и природного характера, а также угроз, вызванных проявлениями терроризма в отношении потенциально опасных объектов, была разработана Концепция федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов (далее – Концепция) [2].

Концепция определяет цели, задачи и функции, состав и структуру, основные принципы направления работ в области создания, использования и развития систем мониторинга.

Повышение надежности и безопасности изделий ракетно-космической техники (РКТ) и объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) является одной из приоритетных задач ракетно-космической отрасли [3–7].

Находящиеся в эксплуатации объекты РКТ и НКИ космодрома Байконур, относящиеся одновременно к технически сложным и потенциально опасным объектам, эксплуатируются далеко за пределами гарантированного ресурса. При этом степень их опасности постоянно возрастает. Поэтому вопросы, связанные с дальнейшей эксплуатацией данных объектов за пределами назначенных показателей ресурса и срока службы имеют в настоящее время особую актуальность по следующим основным причинам:

- возрастание риска эксплуатации объектов РКТ и НКИ, обусловленного процессами старения и износа их элементов с ухудшением технических и эксплуатационно-технических характеристик, на фоне которого становится сложнее обеспечивать требования по надежности и безопасности;

- усложнение системы эксплуатации объектов РКТ и НКИ как следствие изменений в существующей ранее кооперации их разработчиков и производителей.

Интеллектуальные системы мониторинга и контроля (СМиК) предназначены как для разрабатываемых, так и эксплуатируемых в настоящее время систем, агрегатов и объектов РКТ и НКИ.

Современная структура интеллектуальных СМиК – это многоуровневая совокупность аппаратных и программных средств, имеющих блочно-модульную структуру, реконфигурируемую организацию распределенных датчиков физических величин и связь, как на определенном уровне, так и между уровнями системы, предназначенных для исследования сложных объектов и обеспечивающих формирование, получение, преобразование, передачу, накопление, обработку, представление, документирование и выдачу информации в удобном для пользователя виде, для передачи в другие системы.

Анализ аварий и техногенных катастроф последних десятилетий показал, что традиционные системы автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) не способны в полной мере обеспечить подготовку и принятие обоснованных управленческих решений в условиях неопределенности поведения ТСО и быстроменяющейся обстановки. Это объясняется применением совершенных, но разобщенных систем мониторинга и управления, когда излишняя локализация данных систем может привести к катастрофическим последствиям для ТСО РКТ и НКИ космодронов.

Анализ основных тенденций развития современных ТСО РКТ и НКИ показывает, что ТСО имеют целый ряд особенностей, среди которых следует выделить: многоаспектность, отсутствие строгой регламентации и структуризации технологий управления, избыточность основных элементов и подсистем, связей между ними, территориальную распределенность их компонент.

На космодромах отсутствуют интегрированные интеллектуальные СМиК с использованием интеллектуальных мониторинговых датчиков нового поколения для сбора, обработки, интеллектуального анализа данных, накопления, архивирования и доведения сведений о техническом состоянии и надежности ТСО до заинтересованных структур космодрома, что делает невозможным обобщение и распределение информации в едином информационном пространстве космодрома.

При создании интеллектуальных СМиК необходимо руководствоваться следующими основными элементами концепции построения интеллектуальных СМиК:

- интеллектуальные СМиК должны обеспечивать получение достоверной информации о состоянии оборудования (объекта мониторинга) в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости его технического состояния;

- принцип достаточности регламентирует выбор минимального числа датчиков физических величин, сопровождающих работу оборудования и систем в целом. При этом выходной сигнал датчиков может быть представлен в широком диапазоне амплитуд и частот с последующей обработкой (обнаружением, фильтрацией, линеаризацией, коррекцией амплитудно-фазовых характеристик и т.д.);

- принцип информационной полноты в общем виде может быть сформулирован так, что помимо диагностических признаков, описывающих техническое состояние объекта известным образом, из спектра сигнала после удаления из него известных признаков выделяют остаточный «шум». При достаточно общих условиях такая система признаков почти ортогональна, т.е. каждый из признаков отражает свой класс неисправностей оборудования;

- принцип инвариантности регламентирует выбор и селекцию таких диагностических признаков, которые инвариантны к конструкции оборудования и форме связи с параметрами ее технического состояния, что обеспечивает применение стандартных процедур без эталонной диагностики и прогнозирования ресурса;

- принцип самодиагностики всех измерительных и управляющих каналов интеллектуальных СМиК реализуется подачей калибровочных сигналов в цепь «датчик – вторичный преобразователь», и проводится анализ данных этого сигнала на выходе системы. Таким образом проверяется функционирование всего тракта интеллектуальных СМиК;

- принцип коррекции измерительных каналов обеспечивает высокую точность и стабильность метрологических характеристик интеллектуальных СМиК [8];

- принцип дружелюбности интерфейса при максимальной информационной емкости обеспечивает восприятие оператором состояния системы в целом при одном взгляде на монитор и получение целеуказывающего предписания на ближайшие неотложные действия;

- принцип многоуровневой организации обеспечивает работу с интеллектуальной СМиК специалистам разных уровней квалификации и ответственности;

- принцип организации интеллектуальных СМиК в режиме реального времени обеспечивает автоматический ввод планирования ресурсов ТСО, информации о состоянии агрегатов и оборудования, планах его ремонта и т.д. по фактическому техническому состоянию.

Используя концептуальные основы построения интеллектуальных СМиК, АО «НИИФИ» разработало и защитило на заседании рабочей группы № 6 «Космос и телекоммуникации» Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России проект «Создание интеллектуальных систем мониторинга и контроля технически сложных объектов» (протокол заседания Комиссии при Президенте Российской Федерации № 5 утвержден Президентом Российской Федерации).

Основная цель проекта – устранение неуклонно увеличивающегося отставания Российской Федерации в области средств измерений, контроля, диагностики и мониторинга технического состояния как разрабатываемых, так и эксплуатируемых объектов РКТ и НКИ.

Решение указанной проблемы обеспечивается созданием методов и интеллектуальных систем контроля, диагностики, мониторинга и аварийной защиты технически сложных объектов на основе интеллектуальных датчиков.

АО «НИИФИ» в рамках реализации проекта № 25 «Создание интеллектуальных систем мониторинга и контроля состояния технически сложных объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры» созданы интеллектуальные СМиК ТСО РКТ и НКИ:

1. Интеллектуальные системы мониторинга и контроля наземной безопасности стартовых комплексов 17П32-5, 6 индексы систем – 406ДЭ21, 373ИК44;

2. Интеллектуальная система мониторинга, контроля, регистрации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН стартового комплекса 17П32-6, индекс системы – 373СО57;

3. Интеллектуальная система мониторинга, контроля, визуализации результатов контроля состояния (критических параметров) технически сложных устройств для руководителя работ при испытаниях и пуске РКН стартового комплекса 17П32-6, индекс системы – 373ИК45.

Интеллектуальные системы мониторинга и контроля наземной безопасности стартовых комплексов 17П32-5, 6 (406ДЭ21, 373ИК44) (рис. 1) предназначены для мониторинга и контроля выполнения опасных и особо опасных операций при подготовке ракеты космического назначения (РКН) на стартовых комплексах (СК) к пуску с целью исключения нарушений технологической дисциплины персоналом расчета и снижения рисков возникновения инцидентов и аварий на СК, ведущих к гибели персонала и разрушению сложных инженерных сооружений.

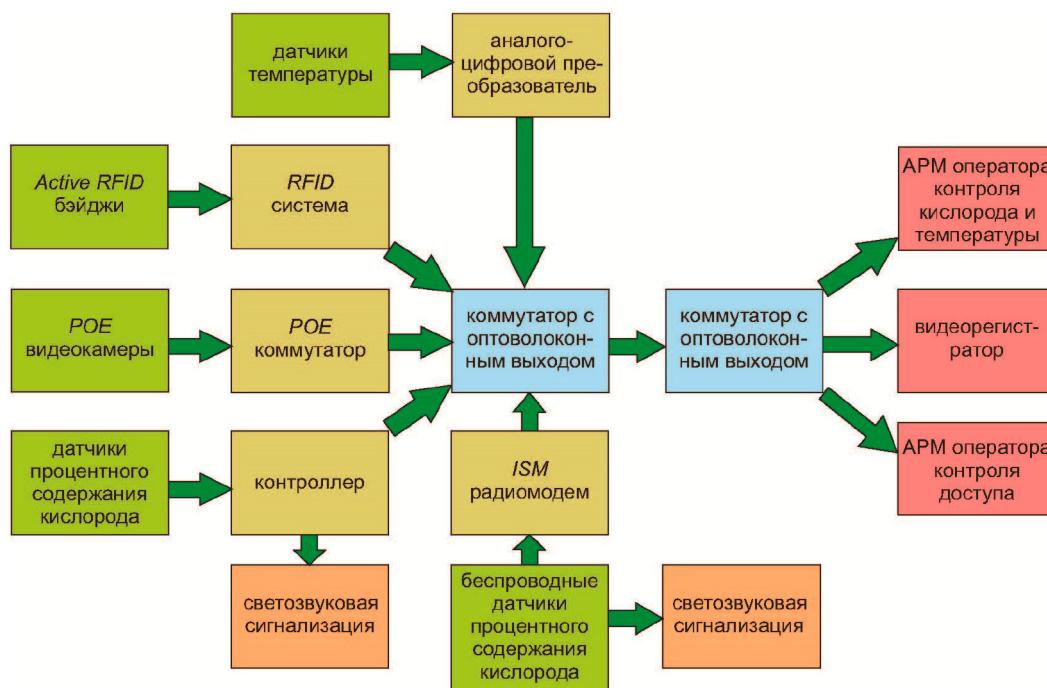


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы мониторинга и контроля наземной безопасности СК

Интеллектуальные СМиК 406ДЭ21 и 373ИК44 выполняют следующие функции:

- постоянный контроль процентного содержания кислорода в рабочих зонах стартового комплекса, передачу информации на дисплей оператора по наземной безопасности;
- выдачу светового и звукового сигнала для оповещения персонала о предельно допустимых значениях процентного содержания кислорода и необходимости немедленно покинуть аварийное помещение или сооружение;

- измерение температуры магистралей с перекисью водорода, передачу данных на дисплей оператора по наземной безопасности, выдачу предупреждения о превышении допустимой температуры;
- допуск номеров расчета в помещения стартового комплекса в соответствии с требованиями технологического графика подготовки РКН к пуску;
- контроль пребывания и позиционирования номеров расчета в опасных зонах стартового комплекса с использованием RFID-технологии;
- визуальный контроль средствами промышленного телевидения номеров расчетов в опасных зонах стартового комплекса (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид автоматизированного рабочего места оператора наземной безопасности

2. Интеллектуальная система мониторинга, контроля, регистрации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН стартового комплекса 17П32-6 (373СО57) (рис. 3) предназначена для мониторинга, контроля и регистрации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН, контроля состояния оборудования и систем, сбора, обработки, архивирования и хранения информации.

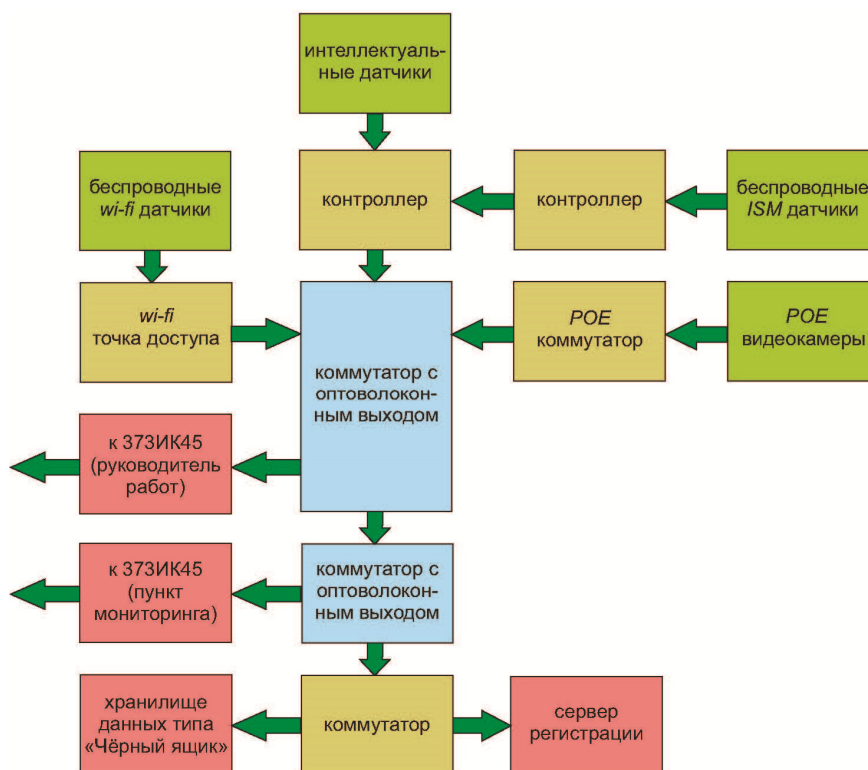


Рис. 3. Структурная схема системы мониторинга, контроля, регистрации 373CO57

Функции, выполняемые интеллектуальной СМик 373СО57:

- контроль хода и выполнения технологических операций подготовки пуска РКН;
- оперативное отображение и регистрация состояния контролируемых параметров оборудования и систем при подготовке к пуску;
- оперативная сигнализация отклонений параметров процесса подготовки от нормального хода, возникновения аварийных ситуаций и отказов (неисправностей) наземных систем;
- регистрация (распознавание; идентификация) отклонений от нормального хода процесса подготовки, в том числе приводящих к аварийным ситуациям, запись данных в «черный ящик»;
- отображение подсказывающей информации (рекомендаций) по выходу из аварийных ситуаций и устранению отказов или неисправностей.

3. Интеллектуальная система мониторинга, контроля, визуализации результатов контроля состояния (критических параметров) технически сложных устройств для руководителя работ при испытаниях и пуске РКН стартового комплекса 17П32-6 (373ИК45) (рис. 4) предназначена для приема сообщений от интеллектуальной системы мониторинга, контроля, регистрации (373СО57) и визуализации хода выполнения технологических операций, включая ручные, параметров технологического процесса, анализа полученных данных с целью выявления неисправностей и отклонений от нормального хода процесса подготовки к пуску РКН.

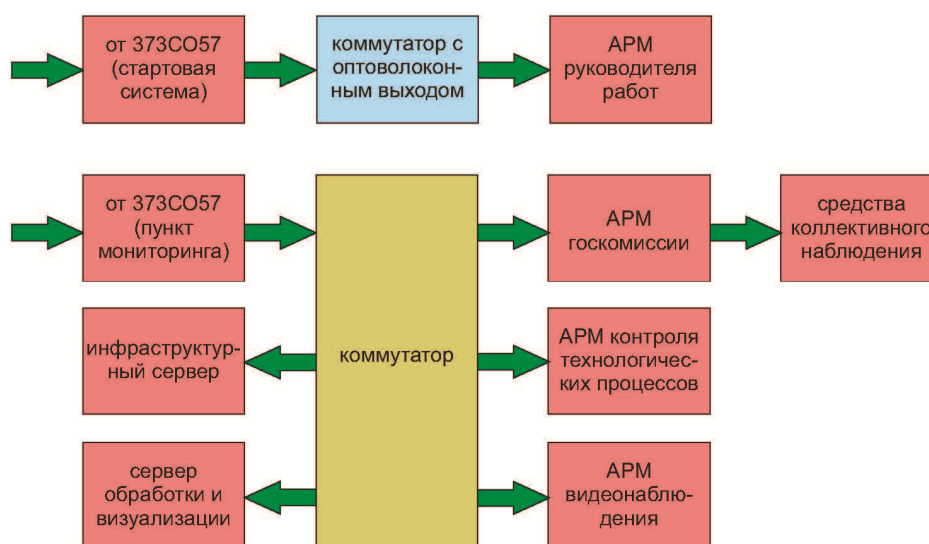


Рис. 4. Структурная схема интеллектуальной системы мониторинга, контроля, визуализации 373ИК45

Интеллектуальная СМик 373ИК45 выполняет следующие функции:

- прием сообщений от 373СО57 о результатах выполнения технологических операций, включая и ручные операции с использованием карточек «штрих-кодов» и терминалов сбора данных;
- анализ полученных данных с целью выявления отклонений от нормального хода процесса подготовки, в том числе приводящих к аварийным ситуациям;
- оперативное отображение и регистрация контрольных параметров процесса подготовки и состояния контролируемого оборудования и систем;
- оперативную сигнализацию отклонений параметров процесса подготовки от нормального хода, возникновения аварийных ситуаций и отказов (неисправностей);
- отображение подсказывающей информации (рекомендаций) по выходу из аварийных ситуаций и устранению отказов (неисправностей);
- визуализацию результатов обработки и анализа данных, получаемых от 373СО57.

АО «НИИФИ» разработало и внедрило на СК 17П32-5, 6 космодрома «Байконур» интеллектуальные системы мониторинга и контроля наземной безопасности, регистрации и визуализации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН, которые в отличие от существующих обеспечивают в реальном времени контроль дей-

ствий боевого расчета с учетом меняющейся обстановки в опасной зоне и позволяют своевременно принимать меры к недопущению аварийных ситуаций и техногенных катастроф [9–11].

Результаты выполнения данных работ были доложены на Президиуме НТС Госкорпорации «Роскосмос» по вопросу «Результаты и перспективы создания интеллектуальных систем мониторинга и контроля состояния сложных объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры».

Президиум НТС Госкорпорации «Роскосмос» в Решении от 30.06.2016 г. № 160-р п. 3 рекомендовал «обеспечить продолжение разработки и внедрения созданных промышленных технологий в качестве научно-технического задела создания систем мониторинга и контроля за техническим состоянием объектов РКТ и НКИ на космодромах «Байконур», «Плесецк», «Восточный».

На основе разработанных и внедренных интеллектуальных СМиК, интеллектуальных мониторинговых датчиков физических величин в настоящее время существует уникальная возможность создать распределенную реконфигурируемую интеллектуальную СМиК ЭТХ агрегатов и систем РКТ и НКИ в едином информационном пространстве космодрома «Восточный».

Эксплуатационно-технические характеристики агрегатов и систем космодрома «Восточный» дают возможность получить и обработать первичную мониторинговую информацию о ЭТХ состояния каждой единицы оборудования агрегатов и систем до момента первого старта РКТ, в том числе во время пуско-наладочных работ, автономных и комплексных испытаний. Тем самым появляется возможность сравнить ЭТХ реального оборудования РКТ и НКИ с характеристиками, заложенными в его проекте. Получение мониторинговой информации до момента первого старта РКТ позволит сформировать реальную модель ЭТХ, максимально приближенную к проектной. Использование такой модели в свою очередь позволит разработать комплекс мероприятий и работ, обеспечивающих возвращение ЭТХ агрегатов и систем РКТ и НКИ после очередного пуска, максимально приближенных к проекту. Это принципиально отличается от сложившейся практики управления техническим состоянием объектов РКТ и НКИ по принципу «от достигнутого», тем более что существующая нормативно-техническая документация определяет лишь общую номенклатуру требований к оцениванию текущего состояния объектов РКТ и НКИ [12].

В этой связи предлагается новый подход к формированию концепции оценивания технического состояния объектов РКТ и НКИ. Эта концепция содержит два основных аспекта: системный и физический. Физический аспект отражает природу процессов эксплуатации и изменения технического состояния объектов, а системный аспект используется для координации исследований разнообразных явлений и процессов в рамках единого информационного пространства, а также комплекса алгоритмически взаимосвязанных моделей, методов и характеристик [13].

Новый подход включает:

- методики и алгоритмы выявления и агрегирования мониторинговых данных для определения технического состояния, которые могут служить основой для продления сроков эксплуатации объектов РКТ и НКИ;
- комплекс моделей, состоящий из трех типов моделей: эталонной; проектной, обобщающей ЭТХ, заложенные в процессе проектирования; реальной индивидуальной модели конкретного объекта РКТ и НКИ, полученной по результатам мониторинговых данных;
- текущую индивидуальную модель конкретного объекта РКТ и НКИ, полученную по результатам мониторинга ЭТХ, собираемых во время подготовки и проведения пусков, а также регламентных работ.

Объединение всех применяемых и вновь разрабатываемых подходов к обеспечению безопасности РКТ и НКИ на основе предлагаемого способа формирования концепции «ЭТХ проект (эталон) – ЭТХ конкретного вновь созданного объекта, приведение к эталонному – реальные ЭТХ объектов в процессе эксплуатации после каждого пуска – приведение ЭТХ объектов в процессе подготовки к пуску – к эталонным ЭТХ».

Разработка этого направления имеет своей целью создание единой концепции построения интеллектуальных СМиК ЭТХ объектов РКТ и НКИ космодрома «Восточный», которая ляжет в основу информационно-коммуникационных технологий и методик инженерного синтеза, интеллектуального анализа данных и информационной поддержки принятия решений,

что обусловлено общностью проблем, задач, различных критериев, признаков, параметров и других особенностей, характеризующих данные процессы при рассмотрении их на общесистемном уровне. Такой концептуальный подход к созданию интеллектуальных СМК ЭТХ объектов РКТ и НКИ позволит осуществлять координацию и системную совместимость соответствующих работ [12].

Библиографический список

1. Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004. № 190-ФЗ.
2. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2005. № 1314-р. «Об одобрении концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры РФ и опасных грузов». – 8 с.
3. Федеральное космическое агентство (Роскосмос) Приказ от 22 июня 2012. № 135 «Об утверждении Положения по выполнению требований безопасности при эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры космодрома Байконур» (ПВТБЭ-2012).
4. Бармин, И. В. Вопросы обеспечения безопасности функционирования ракетно-космического стартового комплекса / И. В. Бармин, В. Л. Каджаев // Полет. – 2007. – № 2. – С. 3–11.
5. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. / И. В. Бармин, В. А. Зверев, А. Ю. Украинский, В. В. Чугунков, А. В. Языков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 3. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/630.html>
6. Бармин, И. В. Принципы обеспечения надежности и безопасности функционирования ракетно-космического комплекса на этапе предпусковой подготовки / И. В. Бармин, В. Л. Каджаев // Полет. – 2013. – № 8. – С. 53–64.
7. Бирюков, Г. П. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов / Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торпачев. – М. : Изд-во МАИ, 2002. – 258 с.
8. ГОСТ Р 8.731-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М. : Стандартинформ, 2012. – 19 с.
9. Дмитриенко, А. Г. Распределенная интеллектуальная система мониторинга состояния объектов РКТ / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, В. Н. Новиков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии – 2010 : тр. III Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (1–3 июня 2010 г.) / под ред. Ю. М. Урличича, А. А. Романова. – М. : Радиотехника, 2011. – С. 413–419.
10. Николаев, А. В. Интеллектуальная система мониторинга состояния технически сложных объектов РКТ / А. В. Николаев, А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов // Современные информационные технологии : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2011. – Вып. 14. – С. 5–10.
11. Бакланов, В. И. Алгоритм оценки параметров процесса подготовки к пуску ракеты космического назначения / В. И. Бакланов, О. В. Саклаков // Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии : науч. тр. : в 2 т. – М. : НИИ КС им. А. А. Максимова, 2012. – Т. 2. – С. 78–87.
12. Элементы концепции безопасности объектов наземной космической инфраструктуры на основе систем контроля и функционального мониторинга / А. Г. Дмитриенко, А. И. Белозерцев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, А. В. Ляшенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 3–21.
13. Романов, А. А. Прикладной системный инжиниринг / А. А. Романов. – М. : Физматлит, 2015. – 555 с.

Дмитриенко Алексей Геннадиевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Dmitrienko Aleksey Gennadievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and airtation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николаев Андрей Валерьевич

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Nikolaev Andrey Valer'evich

the general director,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ляшенко Антон Валерьевич

начальник конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Lyashenko Anton Valer'evich

head of the design bureau,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Tyurin Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ярославцева Дарья Александровна

аспирант,
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Yaroslavtseva Dar'ya Aleksandrovna

postgraduate student,
design engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.518.5: 007

Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 5–13. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-1.

Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная, А. Ш. Слепова

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

G. A. Borisov, I. N. Kolodyazhnaya, A. S. Slepova

IMPROVING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS THROUGH THE APPLICATION OF MODERN POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются вакуумные насосные системы как пример сложных технических систем. Предметом исследования является повышение надежности вакуумных насосных систем путем замены штатных подшипников качения на подшипники скольжения, изготовленные из современных неметаллических композиционных материалов. Целью работы является рассмотрение возможности внедрения неметаллических композиционных материалов для оптимизации физических свойств деталей и агрегатов, ведущих к повышению надежности элементов и конструктивных узлов агрегатов. *Результаты.* Рассмотрены марки современных неметаллических материалов и их характеристики. Определены основные критерии выбора антифрикционного материала, предложены способы, подтверждающие эффективность предлагаемого решения повышения ресурса подшипников в узлах трения сложных технических систем. Приведены примеры внедрения полимерных композиционных материалов в различных областях машиностроения. *Выводы.* Широкий температурный диапазон и низкие значения коэффициентов трения неметаллических композиционных материалов позволят существенно продлить жизненный цикл узлов трения сложных технических систем, тем самым повысив надежность эксплуатации системы.

A b s t r a c t. *Background.* The object of research is vacuum pumping systems as an example of complex technical systems. The subject of the study is to increase the reliability of vacuum pumping systems by replacing rolling bearings with sliding bearings made of modern non-metallic composite materials. The purpose of the work is to consider the possibility of introducing non-metallic composite materials to optimize the physical properties of parts and assemblies leading to an increase in the reliability of elements and structural units of units. *Results.* The brands of modern non-metallic materials and their characteristics are considered. The main criteria for the choice of antifriction material are determined, and methods are proposed that confirm the effectiveness of the proposed solution to increase the life of bearings in the friction nodes of complex technical systems. Examples of the introduction of polymer composite materials in various fields of engineering are given. *Conclusions.* Wide temperature range and low values of friction coefficients of nonmetallic composite materials will allow to extend substantially the life cycle of the friction nodes of complex technical systems, thereby increasing the reliability of the system operation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сложные технические системы, надежность, антифрикционные материалы, подшипник.

К e y w o r d s: complex technical systems, reliability, antifriction materials, bearing.

Применение традиционных конструкционных материалов в сложных технических системах и агрегатах на сегодняшний день является неэффективным, так как, помимо низких показателей долговечности ввиду быстрой выработки их ресурса, наблюдается также удорожание технологических этапов производства и, как следствие, высокая себестоимость продукции. Этим объясняется повышенный интерес специалистов к внедрению современных полимерных композиционных материалов в различные отрасли машиностроения, автомобилестроения, космической и авиационной отрасли, в технологическое обеспечение этапов наземных работ подготовки ракетноносителей, а также в сельскохозяйственные машины и технику.

Большой интерес вызывает увеличение ресурса и продление жизненного цикла вакуумных насосных систем за счет замены традиционных материалов изготовления на полимерные композиционные материалы.

Надежность оборудования, которое эксплуатируется при высоких нагрузках с большими коэффициентами трения, экстремальных температурах и неравномерном режиме, определяется ресурсом материала изготовления конструктивных деталей и элементов изделия [1]. Поэтому использование антифрикционных материалов в узлах трения позволяет в значительной мере сократить трудоемкость изготовления деталей и уменьшить затраты на техническое обслуживание.

Для увеличения ресурса подшипниковых узлов и пар трения специалисты все большее внимание уделяют современным антифрикционным композиционным материалам [2, 3].

В целях уменьшения стоимости деталей из композиционных полимеров в качестве армирующих материалов используют комбинацию из углепластиков и стеклянных волокон [4]. Ввиду того, что стоимость углепластиков выше, их потребление меньше относительно стеклопластиков. Однако создание углеродистых волокон диаметром нескольких нанометров позволяет получить новые нанокompозиты с углеродным армирующим наполнителем повышенной прочности. На сегодняшний день в качестве основного сырья для получения углеродных волокнистых материалов используют полиакрилонитрильные волокна. Результатом их применения являются высокопрочные углеродные волокна. Известны такие представители композиционных материалов, как американские марки «Акрилон» и «Орлон», специальное акриловое волокно «Куртель», которое выпускается английской фирмой «Куртолдз», представитель Германии – марка «Дралон». Отечественная промышленность выпускает это волокно под фирменным названием «Нитрон».

Помимо ПАН-волокон, хорошо зарекомендовали себя арамидные волокна кевлар (США), армос (Россия) и ряд других.

Большое распространение в настоящее время получил карбон CF (углеродные волокна) – материал из тонких нитей (5–15 микрон в диаметре). Несколько тысяч углеродных волокон скручены вместе, образуя нити, из которых плетут ткань. Способы плетения влияют на некоторые физические свойства ткани. Карбон характеризуется высокой прочностью, износостойкостью. Он отличается высокой термостойкостью, сохранением формы и свойств до температуры 2273,15 К, хорошими виброгасящими свойствами и теплоемкостью, коррозионной стойкостью, высоким пределом прочности на разрыв и высоким пределом упругости.

Еще одним примером композита углеродных волокон является углеродистое графитовое волокно (*GFRP*), или по-другому *graphite fiber*, стекловолоконный армированный полимер *glass-(fiber)-reinforced polymer*. Данный композит отличается хорошей устойчивостью к температурам. Углеволокно совмещают также с кевларом, алюминием, стекловолокном для улучшения дополнительных физических свойств материала.

На сегодняшний день существует множество отечественных и зарубежных производителей полимерных композиционных материалов.

ООО «Овитэк» выпускает изделия из полимерных композиционных материалов оксафен и оксафен опм-94, которые превосходят по износостойкости бронзу и латунь в 2–3 раза, текстолит – в 4–12 раз [5].

В ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны антифрикционные углепластики на основе эпоксидных и фенольных термореактивных полимерных матриц и углеродных тканей – марок УГЭТ и ФУТ, а также новый антифрикционный углепластик на основе термопластичной матрицы – полифениленсульфида (ПФС), получивший название – УПФС.

Акционерное общество «Особое Конструкторско-технологическое бюро "Орион"» занимается производством антифрикционных самосмазывающихся биостойких композиционных

ных материалов под торговой маркой «Маслянит»: маслянит АСМК-112, маслянит АСМП-И, маслянит АСМК-112Л. «Масляниты» успешно эксплуатируются в узлах трения в космической и авиационной технике, в сельскохозяйственной, автомобильной технике, как подшипник скольжения – в гидротехнических сооружениях.

Компания «Кондор» предлагает антифрикционный материал Синтек-УМ, область применения которого связана с изготовлением подшипников скольжения и уплотнения узлов трения в различных средах без применения дополнительной смазки. Синтек-УМ характеризуется значением коэффициента трения 0,06–0,12, а температурный диапазон лежит в пределах от 77,15 до 573,15 К.

Приведем несколько примеров, в которых внедрение композитов может существенно продлить жизненный цикл сложных технических систем.

На сегодняшний день приобретен опыт применения в космической технике композиционных материалов. В связи с повышенной удельной прочностью и низким значением коэффициента термического расширения углеэпоксидных материалов они использованы в системе навигации спутника АТС-F, а также включены в его жесткие конструкции. Перспективным считается дальнейшее внедрение антифрикционных композиционных материалов в узлы трения различных сложных технических систем. Данные по использованию композитов в аэрокосмической технике представлены в работе [6].

Предметом исследования в этой работе является область возможности применения антифрикционных композиционных материалов в насосных системах, в том числе участвующих в процессе заправки ракет. На рис. 1 приведена схема центробежного насоса.

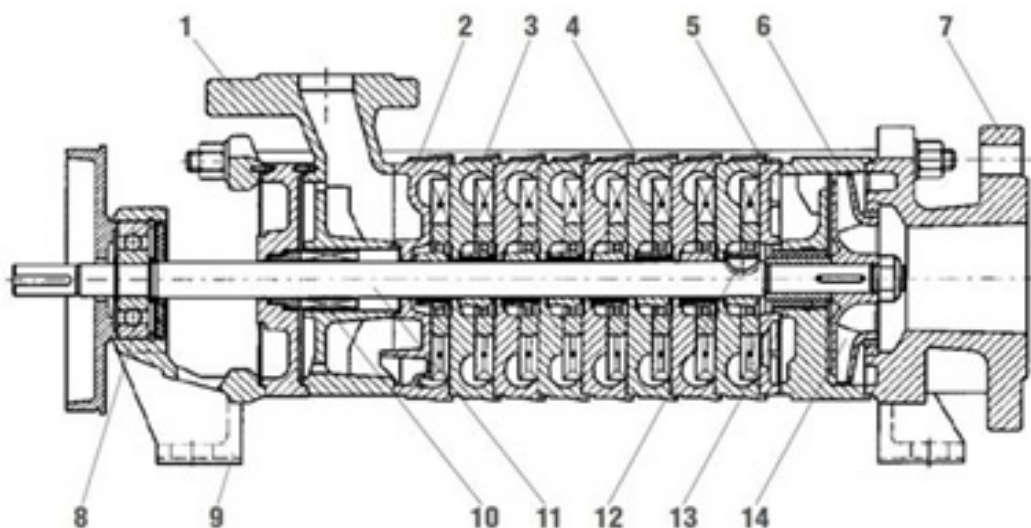


Рис. 1. Схема центробежного насоса: 1 – нагнетательный корпус; 2 – нагнетательный блок; 3 – нагнетательно-всасывающий блок; 4 – ротор; 5 – всасывающий блок; 6 – рулевой механизм; 7 – корпус всасывающий; 8 – шарикоподшипник; 9 – корпус подшипника; 10 – уплотнение вала; 11 – вал; 12 – сегментная шпонка; 13 – подшипник; 14 – центробежное рабочее колесо

Центробежные насосы (рис. 1), сообщаящие топливу определённое давление при соответствующем расходе, определяемом временем заправки [7], используются подшипники качения, которые являются опорой быстровращающихся валов и должны быть надежными в работе.

При работе насоса с максимальной эффективностью подшипник должен выдерживать большую нагрузку [8]. Однако условия эксплуатации, специфичность жидкости, перекачиваемой в вакуумных насосах, ведут к преждевременному износу подшипников. Высокие нагрузки ведут к нагреву подшипника, а нагрев обуславливает уменьшение вязкости смазочных материалов, что ведет к потере способности нести нагрузку подшипникам. В свою очередь охлаждение внешней поверхности подшипника служит причиной высыхания смазки, увеличивает трение и создает дополнительную нагрузку.

Те же проблемы возникают и в ротационных вакуумных насосах установки ВВУ-60/45, используемых в сельскохозяйственной технике, в том числе в доильных установках типа

УДА. По этой причине перспективным направлением можно считать повышение надежности таких конструктивных элементов, как подшипник в сельскохозяйственной технике путем замены штатного подшипника качения из традиционных материалов на подшипник скольжения из антифрикционных композиционных материалов, в частности углепластики. Существует множество конструкторских решений и разработаны различные узлы трения с применением материалов, имеющих повышенные антифрикционные свойства. Внедрение композитов как материалов, имеющих высокую стойкость к трению и истиранию, в структуру различных узлов трения существенно увеличит их ресурс. Компания SKF изготавливает скользящий слой подшипника из нитей высокопрочного полиэстера, который усилен политетрафторэтиленом (ПТФЕ), в матрице из эпоксидной смолы.

Наиболее широкое применение получили материалы из углепластиков. Свойства углепластиков обусловлены свойствами углеродного волокна. В частности, допустимый диапазон рабочих температур определяется их связующей. Стеклопластики на полиамидной основе повышают значения рабочих температур. Несмотря на невысокие напряжения сдвига и предела прочности при сжатии, углепластики обладают высокими показателями антифрикционных свойств, что делает возможным использование их как наполнитель для связующих, используемых для изготовления подшипников, втулок, прокладок.

Основными критериями выбора антифрикционных неметаллических полимерных материалов для модификации подшипников в насосных системах помимо стоимости являются коэффициент трения и рабочий температурный диапазон.

В табл. 1 приведена сравнительная характеристика наиболее популярных марок антифрикционных неметаллических материалов [9].

Таблица 1

Сравнительная характеристика антифрикционных неметаллических полимерных материалов для подшипников скольжения

Показатель	Маслянит К	Углепластики ФУТ	Углепластики УГЭТ
Плотность, кг/м ³	1150	1450	1450
Прочность при сжатии, МПа	49	150	200
Коэффициент термического расширения, 1/°C·10 ⁻⁵	9,5	1,6	1,6
Коэффициент трения	0,15	0,01	0,12
Рабочая температура, К	273,15...313,15	73,15...140	73,15...393,15

В работе [10] приведены результаты испытаний подшипников скольжения из полиформальдегида, которые представили превышение ресурсных показателей в два раза относительно штатной конструкции.

Таким образом, продемонстрировано, насколько широко применение неметаллических композиционных материалов, приведен ряд марок композитов, которые могут быть использованы для улучшения физических свойств конструктивных узлов агрегатов. На примере узлов трения насосных систем как способ повышения надежности предложено заменить штатные подшипники из традиционных материалов на подшипники скольжения из антифрикционных неметаллических материалов.

Библиографический список

1. Слепова, А. Ш. Анализ факторов, влияющих на износ подшипников / А. Ш. Слепова // Наука, техника и образование. – 2017. – № 10 (40). – С. 28–33.
2. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам : в двух томах / Дж. Любин. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. I. – 252 с.
3. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин, И. А. Алфутов, А. И. Бейль. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
4. Борисов, Г. А. Перспективные конструкционные материалы на основе полимеров для применения в сельскохозяйственной технике / Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная // Вестник РГАТУ. – 2010. – № 4. – 67 с.
5. Краснов А. П. «ОВИТЕК» – разработка и производство износостойких полимерных композиционных материалов / А. П. Краснов. – URL: <http://oxafen.ru/>
6. Sandvik coromant. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com/>

7. Архаров, А. М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / А. М. Архаров, И. Д. Кунис. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 78 с.
8. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции : учебник / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 320 с.
9. Маслянит антифрикционный материал // НПП Терминал. – URL: <http://maslyanit.ru/>
10. Колодяжная, И. Н. Технологическое обеспечение долговечности роликовых узлов картофелеуборочных машин применением подшипников скольжения их полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук / Колодяжная И. Н. – Рязань : РГТУ, 2011. – 181 с.

Борисов Геннадий Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра технологии металлов и ремонта машин,
Рязанский государственный агротехнологический
университет им. П. А. Костычева
(Россия, г. Рязань, ул. Костычева, 1)
E-mail: tmirm@yandex.ru

Borisov Gennadiy Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of technology of metals
and repair of machines,
Ryazan State Agrotechnological University
named after P. A. Kostychev
(1 Kostycheva street, Ryazan, Russia)

Колодяжная Ирина Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструкции и испытаний
летательных аппаратов,
Филиал Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
«Восход»
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: kin1958@rambler.ru

Kolodyazhnaya Irina Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and testing aircraft,
Branch of Moscow Aviation Institute
(National Research University) "Voskhod"
(5 Gagarin street, Baikonur, Kazakhstan)

Слепова Альфия Шамилевна

старший преподаватель,
кафедра вычислительных систем и технологий,
Филиал Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
«Восход»
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: alf.slepova@yandex.ru

Slepova Al'fiya Shamilevna

senior lecturer,
sub-department of computer systems and technologies,
Branch of Moscow Aviation Institute
(National Research University) "Voskhod"
(5 Gagarin street, Baikonur, Kazakhstan)

УДК 621.822:621.763

Борисов, Г. А.

Повышение надежности сложных технических систем путем применения современных полимерных композиционных материалов / Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная, А. Ш. Слепова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 14–18. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-2.

М. С. Конкина, С. Н. Медведева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

M. S. Konkina, S. N. Medvedeva

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GRAPHO-ANALYTICAL METHODS OF RESEARCH OF ELECTRIC CIRCUITS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются графоаналитические или топологические методы расчета электрических схем. Существует достаточно большое количество типов графов: графы Мейсона, Коутса, токовые, потенциально-токовые графы, потенциальные сигнальные графы и т.д. Все графы характеризуются наглядностью и представляют собой один из способов записи системы линейных уравнений. Целью работы является обоснование выбора одного из типов графов для анализа электрических схем. **Материалы и методы.** В основе исследования использован раздел неметрической математики, в основе которой заложен топологический подход к изучаемым процессам и явлениям. Полученные результаты согласуются с основными положениями теории графов и алгебраических методов, позволяющих быстро получить математические выражения, весьма удобные с точки зрения последующего анализа. **Результаты.** Исследованы различные типы графов, для каждого определены его характеристики. Выявлено, что по совокупности характеристик для анализа электрических цепей более удобными являются обобщенные сигнальные графы, которые объединяют сильные стороны графов Мейсона и Коутса и свободны от присущих им недостатков. Все разновидности сигнальных графов являются частными случаями обобщенных сигнальных графов. **Выводы.** Показано, что обобщенные сигнальные графы являются наиболее удобными для анализа электрических цепей благодаря большей информативности и наглядности представления взаимосвязей между параметрами электрической цепи.

A b s t r a c t. Background. The object of study is graphic or topological methods of calculation of electric circuits. There are many types of graphs: graphs Mason, Coates, current, potential-current graph, potential of the signal graphs, etc. All graphs are characterized by clarity and constitute one of the ways of the system of linear equations. The aim of this work is justification of selection of one of the types of graphs for analysis of electrical circuits. **Materials and methods.** The study used non-metric section of mathematics, which is based upon a topological approach to the study of processes and phenomena. The obtained results are consistent with the basic provisions of the theory of graphs and algebraic methods to quickly obtain mathematical expressions, is extremely convenient from the point of view of subsequent analysis. **Results.** Studied various types of graphs, each defined by its characteristics. It is revealed that the set of characteristics for the analysis of electric circuits more convenient are generalized signal graphs, which combine the strengths of the counts of Mason and Coates, and free from inherent disadvantages. All varieties of signal graphs are special cases of the generalized signal graphs. **Conclusions.** It is shown that the generalized signal graphs are the most convenient for the analysis of electric circuits, due to the greater informational content and visibility of relationships between parameters of the electrical circuit.

К л ю ч е в ы е с л о в а: граф, определитель графа, топологическая формула, потенциально-токовый граф, потенциальный сигнальный граф, обобщенный сигнальный граф.

Key words: graph, the determinant of the graph, a topological formula, potential-current graph, potential of the signal graph, the generalized signal graph.

В настоящее время существуют и эффективно работают разделы «математики без чисел», один из которых позволяет проводить топологические преобразования, упрощающие анализ результата. Другим практически важным разделом неметрической математики является теория графов, в основе которой также заложен геометрический подход к изучаемым процессам и явлениям. Это дает возможность наглядного представления взаимодействия изучаемых процессов и явлений в их взаимосвязи и взаимообусловленности. На основе указанных разделов математики были разработаны графоаналитические методы анализа. В этих методах найдено и реализовано органическое сочетание топологических и алгебраических методов, позволяющих быстро получить математические выражения, весьма удобные с точки зрения последующего анализа. Однако в приложении для исследования энергетических режимов и определения параметров электрических цепей не выявлено четких критериев выбора алгоритма, наиболее перспективного для анализа, типа графа. В связи с этим сравнение характеристик типов графов, методик их построения и выявление наиболее подходящих для анализа электрических цепей является актуальным.

Графоаналитические или топологические методы расчета электрических схем появились всего лишь около 60 лет тому назад [1, 2], но успели завоевать широкую популярность у инженеров, что обуславливается наглядностью и простотой использования данных методов. Вне зависимости от того, какого типа граф используется (Мейсона, Коутса), обобщенная процедура реализации графоаналитических методов сводится к следующему:

1. Отображение исходной (анализируемой) схемы, содержащей пассивные RLC элементы, активные источники напряжения (тока) и активные управляемые источники (усилители, повторители, преобразователи), в виде некоторой топологической структуры (графа), характеризующейся не только взаимным расположением узлов и вершин и их связями, но и некоторыми числовыми параметрами (весами вершин и дуг).

2. Расчет определителя графа, являющегося определителем системы линейных уравнений, описывающих схему.

Определитель графа – Δ – находится как сумма весов элементарных графов, т.е.

$$\Delta = \sum_i \delta_i.$$

Отсюда следует топологическая формула нахождения определителя графа [1, 2]

$$\Delta = \prod N_i + \sum L^{(s)} \Delta^{(s)} + \sum L^{(i)} L^{(k)} \Delta^{(ik)} + \dots,$$

где $\prod N_i$ – произведение весов всех взвешенных вершин; $\Delta^{(s)}$ – произведение весов всех взвешенных вершин, не входящих в одиночный S -й контур с весом $L^{(s)}$; $\Delta^{(ik)}$ – произведение весов взвешенных вершин, не входящих в попарно некасающиеся контуры i и k с весами $L^{(i)}$ и $L^{(k)}$.

3. Расчет необходимых схемных функций, т.е. отношений интересующих токов и напряжений. Для этого используется топологическая формула передачи, которая позволяет определить соотношение двух любых переменных либо отношение исследуемой переменной к значению активного воздействия на исследуемую цепь. Для нахождения схемной функции используется формула Мейсона [2]

$$T_{kl} = \frac{x_k}{x_l} = \frac{1}{\Delta} \sum_s P^{(s)} \Delta^{(s)},$$

где Δ – определитель графа; $P^{(s)}$ – вес s -го пути из вершины-истока x_l к вершине x_k ; $\Delta^{(s)}$ – определитель части графа, не касающейся s -го пути.

Ориентированные графы представляют собой один из способов записи системы линейных уравнений или, в иной терминологии, являются топологической моделью системы линейных уравнений. Существует целый ряд разновидностей и модификаций графов, с помощью которых отображаются свойства электрических цепей. Рассмотрим наиболее широко применяемые методы топологического анализа и проведем их сравнение на примере расчета тока i_3

и напряжения в точке c для активной электрической цепи, представленной на рис. 1. Покажем параллельно, что все разновидности сигнальных графов являются частными случаями обобщенных сигнальных графов (ОСГ).

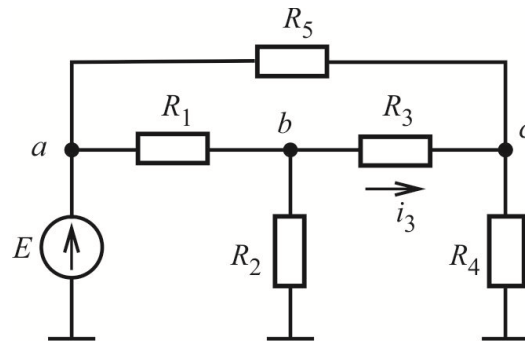


Рис. 1. Анализируемая схема

Построим потенциально-токовый граф (рис. 2) и соответствующий ему ОСГ (рис. 3). По ОСГ рассчитаем определитель

$$\Delta_{\text{ОСГ}} = R_3(R_1Y_2 + 1) \cdot (R_5Y_4 + 1) + R_1(R_5Y_4 + 1) + R_5(R_1Y_2 + 1).$$

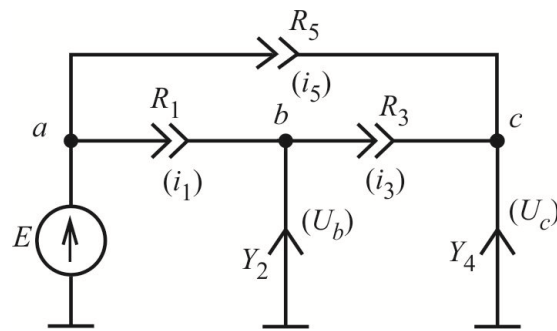


Рис. 2. Потенциально-токовый граф

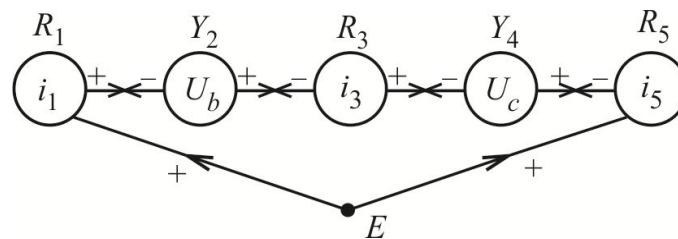


Рис. 3. Обобщенный сигнальный граф

Искомые ток и напряжение определяются на основании топологической формулы передачи (1) [1]

$$i_3 = E \left(\frac{i_3}{E} \right) = \frac{E}{\Delta_{\text{ОСГ}}} [(R_5Y_4 + 1) + (R_1Y_2 + 1)];$$

$$U_c = E \left(\frac{U_c}{E} \right) = \frac{E}{\Delta_{\text{ОСГ}}} [R_1R_3Y_2 + R_1 + R_3 + R_5].$$

Потенциальные сигнальные графы (ПСГ) основываются на составлении системы линейных уравнений, описывающих анализируемую цепь методом узловых потенциалов. Этот метод более удобен в тех случаях, когда требуется непосредственно находить напряжения в различных точках цепи относительно общего узла (земли).

Потенциальный сигнальный граф может быть получен непосредственно из ОСГ путем исключения из графа рис. 3 токовых вершин i_1 , i_3 и i_5 . После исключения вершин получаем ПСГ рис. 4. Его определитель описывается выражением

$$\Delta_{\text{ПСГ}} = (Y_1 + Y_2 + Y_3) \cdot (Y_3 + Y_4 + Y_5) - Y_3^2,$$

а соответствующие ток и напряжение

$$i_3 = (U_b - U_c) Y_3 = \frac{E Y_3}{\Delta_{\text{ПСГ}}} [Y_3 Y_3 + Y_1 (Y_4 + Y_3 + Y_5) - Y_1 Y_3 - Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3)] = \frac{E Y_3}{\Delta_{\text{ПСГ}}} [Y_1 Y_4 - Y_5 Y_3];$$

$$U_c = \frac{E}{\Delta_{\text{ПСГ}}} [Y_1 Y_3 + Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3)].$$

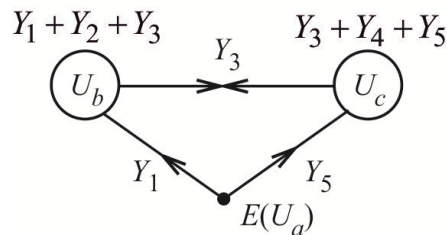


Рис. 4. Потенциальный сигнальный граф

Токовые сигнальные графы (ТСГ) строятся на основе системы линейных уравнений, описывающей исследуемую цепь, построенной методом контурных токов. Данный метод целесообразно использовать в тех случаях, когда требуется найти токи в токовых ветвях главных контуров ПТГ (рис. 2) или когда в цепи имеется много узлов, но мало контуров.

ТСГ можно получить непосредственно из ОСГ (рис. 3) путем исключения потенциальных вершин U_b и U_c . После исключения указанных вершин получаем токовый сигнальный граф (рис. 5). Веса вершин в ТСГ представляют собой так называемое собственное сопротивление контура, равное сумме всех сопротивлений, входящих в s -й контур. Соответствующий определитель описывается выражением

$$\Delta_{\text{ТСГ}} = (R_2 + R_3 + R_4)(R_1 + R_2)(R_5 + R_4) - R_4^2(R_1 + R_2) - R_2^2(R_4 + R_5),$$

а искомые ток и напряжение

$$i_3 = \frac{E}{\Delta_{\text{ТСГ}}} [R_2 \cdot (R_4 + R_5) + R_4 \cdot (R_1 + R_2)];$$

$$U_c = R_4(i_3 + i_5) = \frac{R_4 E}{\Delta_{\text{ТСГ}}} [R_2(R_4 + R_5) + R_4(R_1 + R_2) + R_2 R_4 + (R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4) - R_2^2].$$

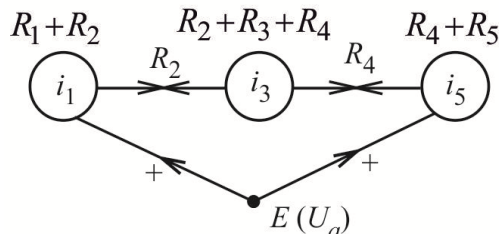


Рис. 5. Токовый сигнальный граф

Классические общепринятые графы Мейсона [2] отличаются от потенциальных сигнальных графов тем, что веса их вершин равны 1, а веса дуг делятся на веса потенциальных

вершин ПСГ, в которые эти дуги входят. Прделав с учетом сказанного необходимые операции, получим *потенциальный граф Мейсона* (ПГМ), представленный на рис. 6. Его определитель представляется выражением

$$\Delta_{\text{ПГМ}} = 1 - \frac{Y_3^2}{(Y_1 + Y_2 + Y_3)(Y_3 + Y_4 + Y_5)},$$

а искомые ток и напряжение

$$i_3 = \frac{EY_3}{\Delta_{\text{ПГМ}}} \left[\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_3} + \frac{Y_3Y_5 - Y_1Y_3}{(Y_1 + Y_2 + Y_3)(Y_3 + Y_4 + Y_5)} - \frac{Y_5}{Y_3 + Y_4 + Y_5} \right];$$

$$U_c = \frac{E}{\Delta_{\text{ПГМ}}} \left[\frac{Y_5}{Y_3 + Y_4 + Y_5} + \frac{Y_1Y_3}{(Y_1 + Y_2 + Y_3)(Y_3 + Y_4 + Y_5)} \right].$$

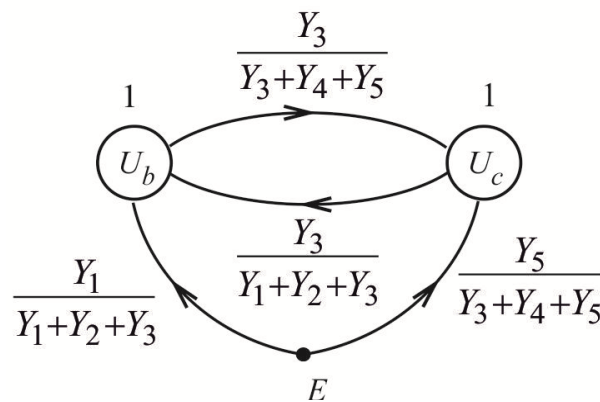


Рис. 6. Потенциальный граф Мейсона

Токовые графы Мейсона (ТГМ) легко получить из сигнальных токовых графов, если проделать операции, аналогичные используемым при переходе от ПСГ к ПГМ. На рис. 7 приведен ТГМ, полученный из ТСГ рис. 5.

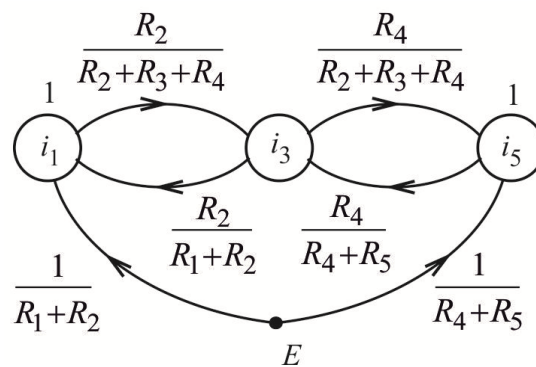


Рис. 7. Токовый граф Мейсона

Согласно приведенному ТГМ имеем

$$\Delta_{\text{ТГМ}} = 1 - \frac{R_2^2}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4)} - \frac{R_4^2}{(R_4 + R_5)(R_2 + R_3 + R_4)};$$

$$i_3 = \frac{E}{\Delta_{\text{ТГМ}}} \left[\frac{R_2}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4)} + \frac{R_4}{(R_4 + R_5)(R_2 + R_3 + R_4)} \right];$$

$$U_c = \frac{R_4 E}{\Delta_{\text{ТТМ}}} \left[\frac{R_2}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4)} + \frac{R_4}{(R_4 + R_5)(R_2 + R_3 + R_4)} + \frac{R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4)(R_2 + R_3 + R_4)} + \frac{R_2^2}{(R_4 + R_5)(R_1 + R_2)(R_2 + R_3 + R_4)} \right].$$

Были также рассмотрены потенциальные, токовые графы Коутса, обобщенные графы Коутса и Мейсона [3]. Построена табл. 1, где приведены основные топологические характеристики графов и даны оценки сложности аналитических вычислений. По результатам анализа рассмотренного примера можно сделать следующие выводы:

1. Самыми неудобными с практической точки зрения являются графы Коутса, которые характеризуются весьма громоздкой процедурой определения знака слагаемых при расчете определителей.

2. Достоинством графов Коутса является то обстоятельство, что графы этого типа непосредственно соответствуют системе линейных уравнений в самой общей форме.

3. Графы Мейсона предлагают простые топологические решения, но вычисляемые с их помощью схемные функции требуют проведения дополнительных алгебраических преобразований для приведения к виду, удобному для анализа.

4. Самые удачные позиции (по совокупности характеристик) среди рассмотренных графов для анализа электрических цепей занимают обобщенные сигнальные графы, которые объединяют сильные стороны графов Мейсона и Коутса и вместе с тем свободны от свойственных им недостатков.

Таблица 1

Основные топологические характеристики графов

Характеристики	Обобщенные сигнальные графы			Графы Мейсона			Графы Коутса		
	ОСГ	ПСГ	ТСГ	ПГМ	ТГМ	ОГМ	ПГК	ТГК	ОГК
Число вершин	6	3	4	3	4	6	3	4	6
Число дуг	10	4	6	4	6	10	6	9	15
Число контуров	4	1	2	1	2	4	3	5	9
Число петель	—	—	—	—	—	—	2	3	5
Веса вершин	R_i или Y_i	$\sum_i Y_i$	$\sum_i R_i$	1	1	1	1	1	1
Веса дуг	± 1	Y_i	R_i	$\frac{Y_k}{\sum_i Y_i}$	$\frac{R_k}{\sum_i R_i}$	R_i или Y_i	± 1 или Y_i	± 1 или R_i	± 1 или R_i или Y_i
Размерность Δ	[Ом]	[Ом] ⁻²	[Ом] ³	[1]	[1]	[1]	[Ом] ⁻²	[Ом] ³	[Ом]
Число операций для вычисления Δ									
— умножения/деления;	8	1	4	2	4	8	3	7	24
— сложения/вычитания;	6	5	8	5	8	7	7	11	15
— возведения в степень	—	1	2	1	2	—	3	5	8

Обобщенные сигнальные графы были использованы для синтеза имитационных моделей переменных сопротивлений [4], для анализа помехоустойчивости схем измерительных цепей [5], для анализа пассивных схем включения резистивно-емкостного датчика [6], для исследования краевых эффектов в резистивно-емкостных датчиках [7], для анализа влияния неидеальных входных активных воздействий на измерительную цепь [8]. В этих работах показано, что с помощью обобщенных сигнальных графов можно легко и просто провести анализ или исследование различных эффектов в измерительных цепях.

Таким образом, как показано выше, обобщенные сигнальные графы являются наиболее удобными для анализа электрических цепей благодаря большей информативности и наглядности представления взаимосвязей между параметрами электрической цепи.

Библиографический список

1. Анисимов, В. И. Топологический расчет электронных схем / В. И. Анисимов. – Л. : Энергия, 1977. – 240 с.
2. Мэзон, С. Электронные цепи, сигналы и системы / С. Мэзон, Г. Циммерман ; пер. с англ. под ред. А. А. Соколова. – М. : Изд-во иностр. лит., 1969. – 619 с.
3. Медведева, С. Н. Анализ и синтез измерительных цепей датчиков с распределенными параметрами : дис. ... канд. техн. наук / Медведева С. Н. – Пенза, 2002. – 213 с.
4. Медведева, С. Н. Применение сигнальных графов для синтеза имитационных моделей переменных сопротивлений / С. Н. Медведева, В. И. Чернецов, М. В. Чернецов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 47–50.
5. Чернецов, М. В. Анализ помехоустойчивости схем измерительных цепей с применением обобщенных сигнальных графов / М. В. Чернецов // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2011. – № 3 (31). – С. 104–109.
6. Медведева, С. Н. Анализ пассивных схем включения резистивно-емкостного датчика на основе обобщенных сигнальных графов / С. Н. Медведева, М. В. Чернецов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6 (44). – URL: <http://science-education.ru>
7. Медведева, С. Н. Исследование краевых эффектов в резистивно-емкостных датчиках / С. Н. Медведева, В. Д. Михотин, М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2002. – С. 196–197.
8. Васильев, П. В. Применение обобщенных сигнальных графов к анализу влияния неидеальных входных активных воздействий на измерительную цепь / П. В. Васильев, С. Н. Медведева, М. В. Чернецов // Теория и практика современной науки : материалы VII Междунар. дистанц. науч.-практ. конф. – М. : Науч.-информ. издат. центр «Институт Стратегических Исследований», 2012. – С. 81–85.

Конкина Мария Сергеевна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: myzochka@list.ru

Konkina Maria Sergeevna

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

Медведева Светлана Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего кафедрой прикладной
и бизнес информатики,
Пензенский филиал Московского государственного
университета технологий и управления
им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет)
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: sn-medvedeva@yandex.ru

Medvedeva Svetlana Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
acting head of sub-department of applied and business
informatics,
Penza branch of K. G. Razumovsky Moscow State
University of Technologies and Management
(First Cossack University)
(6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 519.171, 621.317.3

Конкина, М. С.

Сравнительный анализ графоаналитических методов исследования электрических цепей /
М. С. Конкина, С. Н. Медведева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. –
№ 2 (24). – С. 19–25. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-3.

М. В. Чернецов

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

M. V. Chernetsov

THE USE OF PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS FOR THE IDENTIFICATION OF EQUIVALENT CIRCUITS OF PARAMETRIC SENSORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются методы идентификации схем замещения параметрических датчиков в виде двухполюсной электрической цепи. Известные методы идентификации, основанные на анализе спектральных характеристик, в качестве промежуточных величин используют интенсивность составляющих выходного сигнала, которые зависят от напряжения, тока и других факторов, включая помехи. Более высокая точность достигается при использовании в качестве промежуточных величин частоты и фазы, которые более устойчивы к воздействию помех, а точность эталона частоты (времени) на порядок выше. Поэтому разработка методов идентификации схем замещения параметрических датчиков по их фазным характеристикам, несомненно, актуальна. Целью работы является разработка методов, условий, а также выявление характерных признаков, упрощающих идентификацию схем замещения в виде двухполюсных электрических цепей на основе исследования фазочастотных характеристик. **Материалы и методы.** Предложено при идентификации двухполюсных цепей использовать не только фазочастотные характеристики, но и дифференциальные фазочастотные характеристики, что позволяет уточнить особенности топологии электрических цепей и повысить достоверность результата. Показана возможность получения неоднозначного решения для схем цепей, содержащих параллельно соединенные конденсатор и индуктивность, изготовленную из провода, имеющего сопротивление. При анализе использованы известные положения теории электрических цепей и программное обеспечение MatLab. **Результаты.** Разработаны методы идентификации схем замещения в виде двухполюсных электрических цепей параметрических датчиков, основанные на анализе фазочастотных и дифференциальных фазочастотных характеристик. Предложены алгоритмы анализа и проведено исследование на примере схемы замещения индуктивного датчика. Выявлены условия, при которых возможно принятие неоднозначного решения при идентификации схемы замещения. **Выводы.** Развита теория идентификации схем замещения параметрических датчиков, описываемых двухполюсной электрической схемой, путем использования при принятии решения результатов анализа фазочастотных и дифференциальных фазочастотных характеристик. Исследования алгоритмов принятия решений и полученные результаты совпадают с основными положениями теории электрических цепей.

A b s t r a c t. Background. Object of research are methods for the identification of equivalent circuits of parametric sensors in the form of a bipolar electric circuit. Known methods of identification based on the analysis of the spectral characteristics, as use of intermediate values of the intensity components of the output signal, which depend on voltage, current and other factors, including noise. Higher accuracy is achieved by using intermediate values of frequency

and phase, which are more resistant to interference, and the accuracy of the frequency standard (time) is much higher. Therefore, the development of methods for the identification of equivalent circuits of parametric sensors for their phase characteristics, of course, relevant. The aim of this work is to develop methods, conditions, and identifying the characteristic features that facilitate the identification of equivalent circuits in the form of a bipolar electric chains on the basis of the study of the phase-frequency characteristics. **Materials and methods.** Proposed in the identification of bipolar circuits to use not only the phase-frequency characteristics, but also differential phase frequency characteristics, which allows to clarify the features of topology of electrical circuits and increase the reliability of the result. It is possible to obtain ambiguous solutions for circuits containing parallel connected condenser and inductance, is made of wire having a resistance. The analysis uses known principles of the theory of electrical circuits and MatLab software. **Results.** Developed methods of identifying circuits in the form of a bipolar electric circuits parametric sensors based on the analysis of the phase-frequency and differential phase-frequency characteristics. The proposed algorithms and conducted a study on the example of the equivalent circuit of the inductive sensor. The conditions under which the adoption of controversial decisions in the identification of the equivalent circuit. **Conclusions.** Developed the theory of identification of equivalent circuits of parametric sensors, the described two-pole electrical circuit, by the use of in deciding the results of the analysis of the phase-frequency and differential phase-frequency characteristics. The study of decision algorithms and the obtained results are consistent with the basic provisions of the theory of electrical circuits.

К л ю ч е в ы е с л о в а: идентификация двухполюсных электрических цепей, комплексное сопротивление, фазочастотные характеристики, дифференциальные фазочастотные характеристики, параметрический датчик, схема замещения.

Key words: identification bipolar electrical circuits, impedance, phase-frequency characteristics differential phase frequency characteristics, parametric transducer, equivalent circuit.

При идентификации схем замещения параметрических объектов исследования, представляемых схемой замещения (СЗ) в виде двухполюсной электрической цепи (ДЭЦ), широкое применение получили методы, основанные на анализе спектральных характеристик выходного сигнала, т.е. либо спектра Фурье, либо спектральной плотности. При этом в качестве промежуточной измеряемой величины используется интенсивность сигналов, которая зависит от напряжения, тока, напряженности магнитного поля и других параметров, включая помехи и наводки [1]. Повышение достоверности результата идентификации можно достичь при использовании в качестве промежуточных величин частоты и фазы, параметры которых более устойчивы к воздействию помех и наводок, а точность эталонной меры частоты (времени) на порядок выше [2]. В связи с изложенным развитие положений использования фазочастотных методов анализа ДЭЦ для целей идентификации СЗ параметрических объектов, и в частности параметрических датчиков (ПД), представляется, несомненно, актуальной задачей.

При исследованиях ограничимся рассмотрением структурных схем ДЭЦ, представленных на рис. 1. При этом учтем, что реактивные элементы L и C ДЭЦ представляют собой реальные объекты, а именно: катушку индуктивности, имеющую последовательную СЗ из индуктивности L и сопротивления потерь R_L , и конденсатор, имеющий параллельную СЗ из емкости C и сопротивления утечки R_C , по сути, аналоги индуктивного и емкостного ПД с двухэлементной схемой замещения.

Следовательно, комплексное сопротивление катушки индуктивности (индуктивного ПД) будет равно

$$Z_L(\omega) = R_L + j\omega L, \quad (1)$$

а конденсатора (емкостного ПД)

$$Z_C(\omega) = \frac{R_C}{1 + j\omega R_C C}. \quad (2)$$

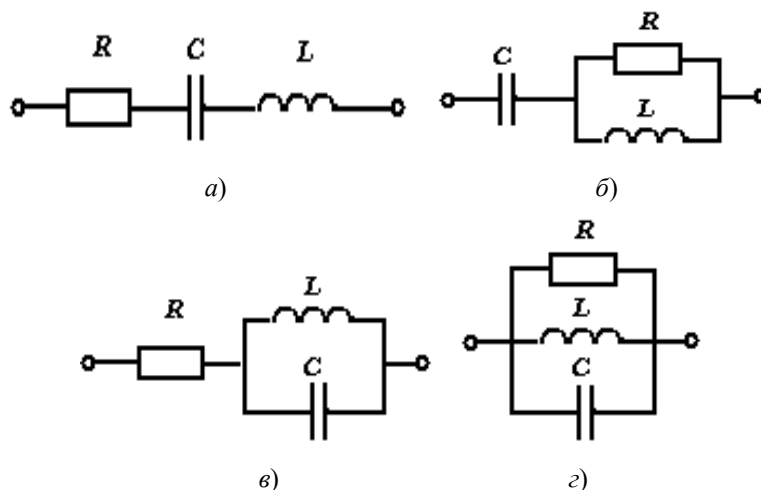


Рис. 1. Исследуемые схемы ДЭЦ

Идентификацию будем проводить по комплексному сопротивлению ДЭЦ в режиме заданного тока. Уравнения комплексного сопротивления рассматриваемых ДЭЦ запишем в удобном для анализа виде

$$Z_{LRCS}(\omega) = R + Z_L(\omega) + Z_C(\omega) \quad (\text{рис. 1, а}); \quad (3)$$

$$Z_{CSRLp}(\omega) = Z_C(\omega) + \frac{RZ_L(\omega)}{R + Z_L(\omega)} \quad (\text{рис. 1, б}); \quad (4)$$

$$Z_{RSLCp}(\omega) = R + \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)} \quad (\text{рис. 1, в}); \quad (5)$$

$$Z_{RLCp}(\omega) = \frac{R \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)}}{R + \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)}} \quad (\text{рис. 1, г}), \quad (6)$$

где s (serial) и p (parallel) в индексах комплексных сопротивлений обозначают способ соединения элементов в ДЭЦ.

Для исследований предлагается использовать фазочастотные характеристики (ФЧХ), а также первые производные от ФЧХ (назовем ее дифференциальной фазочастотной характеристикой – ДФЧХ), причем выполняется сравнение со способами анализа по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) в наиболее информативной области частот близкой к резонансной. Вычисление ФЧХ и ДФЧХ будет проводиться по формулам

$$\Phi(\omega) = \arg(Z(\omega)); \quad (6)$$

$$\Phi_d(\omega) = \frac{d}{d\omega} \Phi(\omega). \quad (7)$$

Далее для удобства анализа и сокращения промежуточных вычислений при построении графических представлений исследуемых функций используются возможности, предлагаемые средствами MatLab [3, 4].

При построении графиков для схем ДЭЦ (рис. 1) принято $R = 1000$ Ом, $L = 0,001$ Гн, $C = 10^{-7}$ Ф, сопротивление потерь катушки индуктивности равно $R_L = 10$ Ом, а сопротивление утечки конденсатора равно $R_C = 10^6$ Ом.

Соответствующие рассматриваемым комплексным сопротивлениям частотные характеристики приведены на рис. 2.

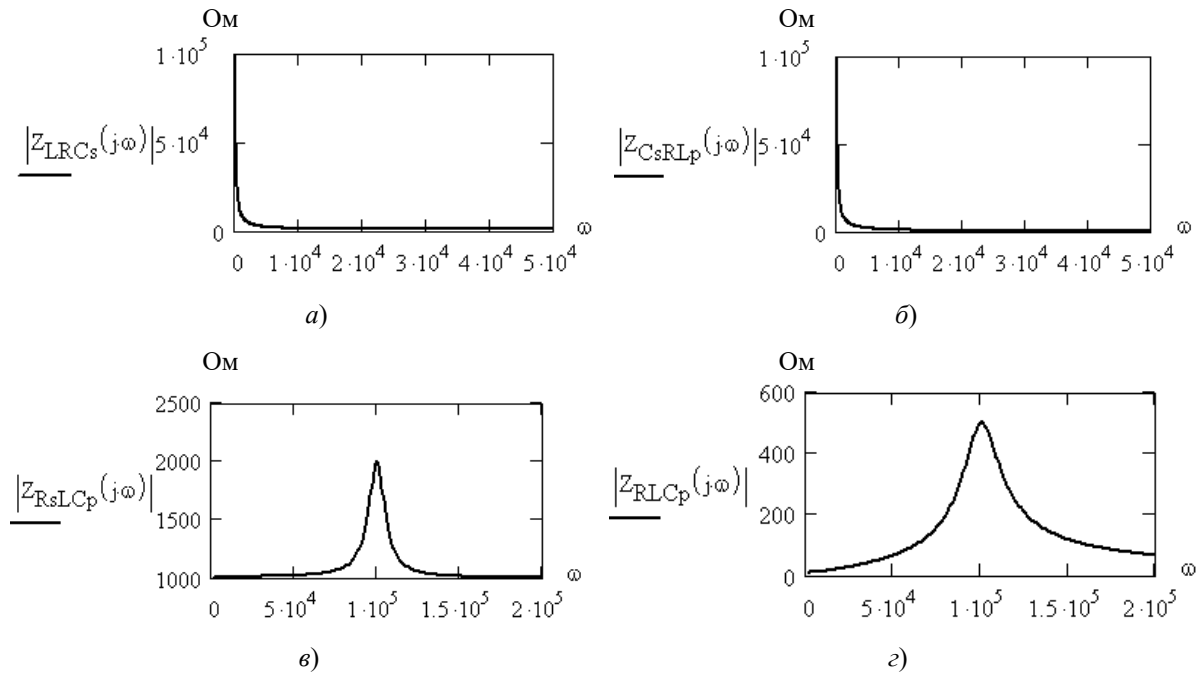


Рис. 2. Зависимости модулей комплексных сопротивлений ДЭЦ от частоты

Из анализа графиков следует, что зависимости, представленные на рис. 2, а и б, а также на рис. 2, в и г, практически идентичны, и идентификация схем ДЭЦ не может быть выполнена однозначно.

Однако при анализе ФЧХ и ДФЧХ, представленных на рис. 3 и 4, выявляются отличия, которые предоставляют возможности более четкого структурирования топологии рассмотренных ДЭЦ.

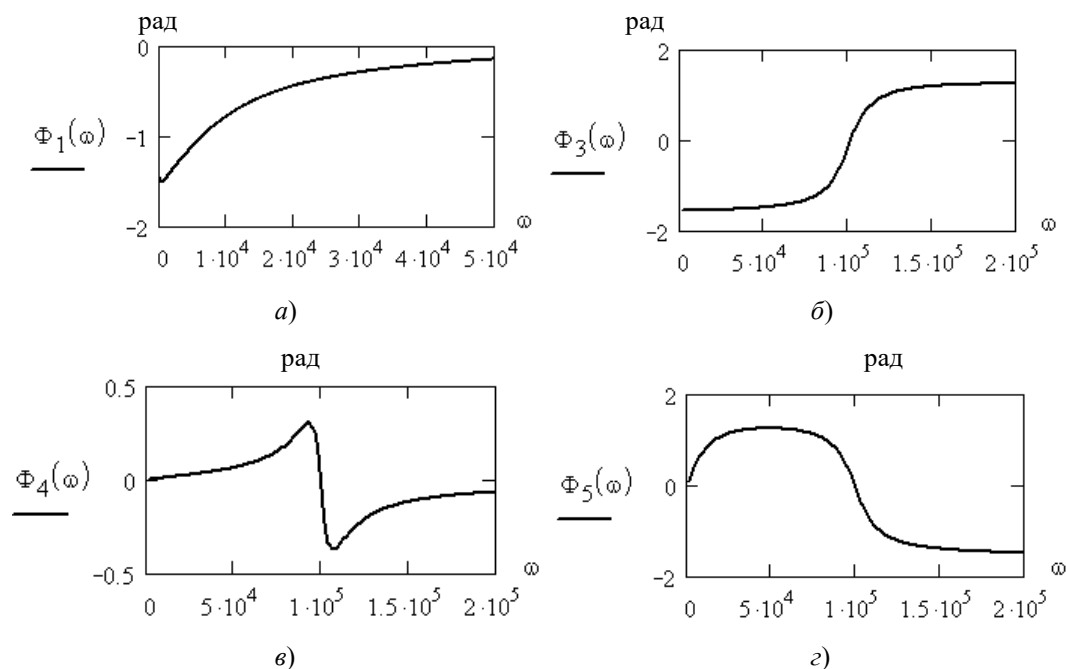


Рис. 3. ФЧХ для ДЭЦ (см. рис. 1)

Таким образом, благодаря использованию ФЧХ и ДФЧХ появляются дополнительные возможности для уточнения результатов идентификации.

Однако при проведении идентификации по фазочастотным характеристикам ДЭЦ в некоторых случаях невозможно принять однозначное решение. Поясним эту ситуацию на при-

мере решения задачи идентификации ДЭЦ (см. рис. 1,е), которая, по сути, представляет собой многоэлементную СЗ индуктивного ПД (рис. 5), где L индуктивность, R_L – сопротивление провода катушки индуктивности ПД, C – межвитковая емкость и емкость между соединительными проводами, подключающими ПД к измерительной цепи (ИЦ) и имеющих общее сопротивление R . В данной СЗ не учтено сопротивление R_C (см. рис. 1,е), так как принято бесконечно большим, потому что, по сути, характеризует сопротивление изоляции между соединительными проводами ПД и входное сопротивление нагрузки ИЦ, что соответствует реальным условиям эксплуатации ПД.

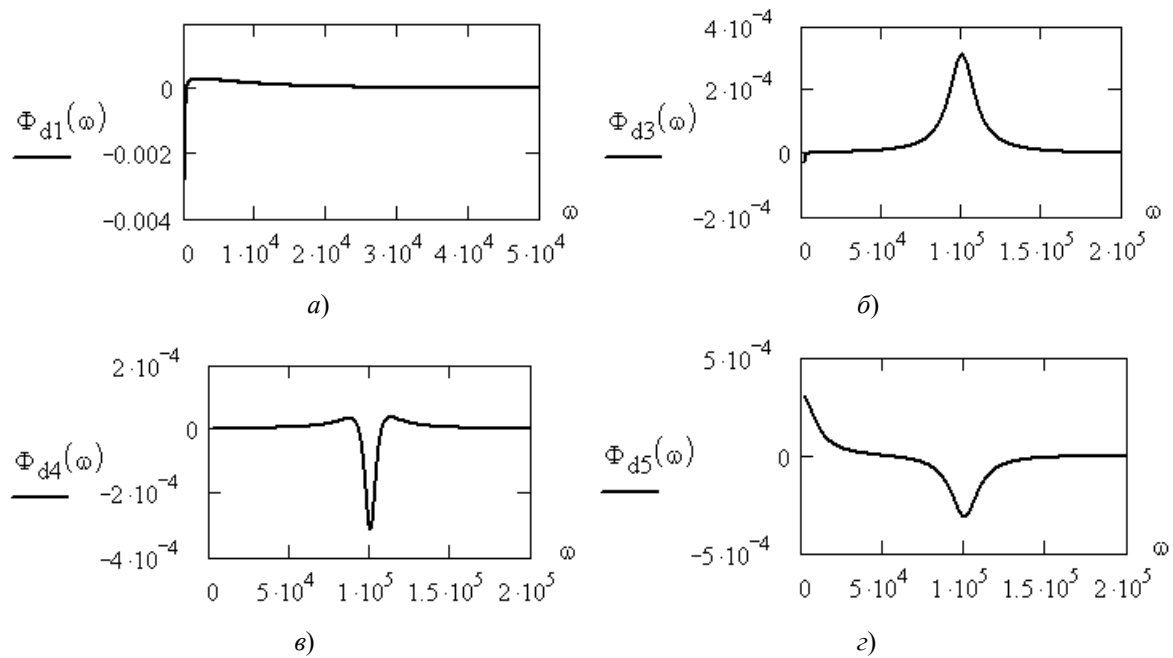


Рис. 4. ДФЧХ для ДЭЦ

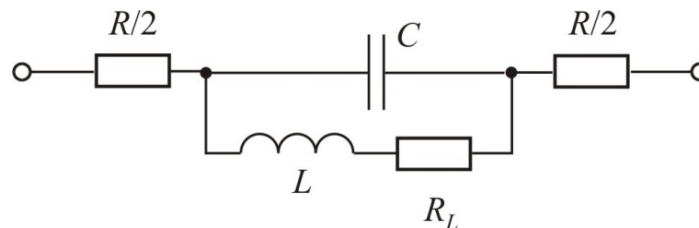


Рис. 5. Схема замещения индуктивного ПД

Комплексное сопротивление ПД (см. рис. 5) описывается уравнением

$$Z(\omega) = R + \frac{R_L + j\omega L - j\omega(\omega^2 L^2 C) - j\omega R_L^2 C}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R_L^2 C^2}, \quad (8)$$

а соответствующая ФЧХ в виде

$$\Phi(\omega) = \arctg \frac{\omega(L - R_L^2 C - \omega^2 L^2 C)}{R_L + R \left[(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R_L^2 C^2 \right]}. \quad (9)$$

Графики зависимости модуля комплексного сопротивления и ФЧХ от частоты (рис. 6 и 7) получены при следующих вполне реальных значениях элементов СЗ индуктивного ПД: $L = 10^{-3}$ [Гн], $C = 10^{-8}$ [Ф], $R_L = 10$ [Ом], $R = 20$ [Ом].

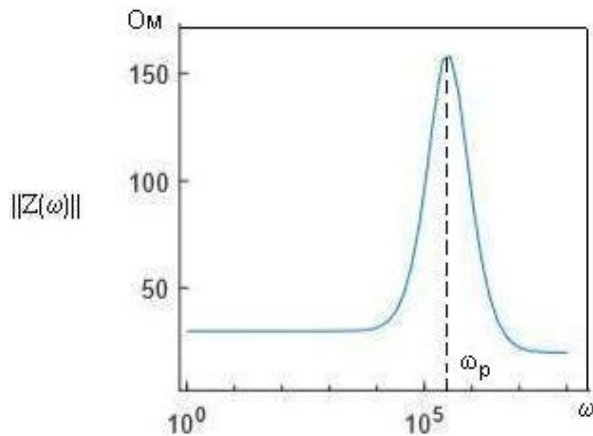


Рис. 6. Зависимость комплексного сопротивления ПД от частоты

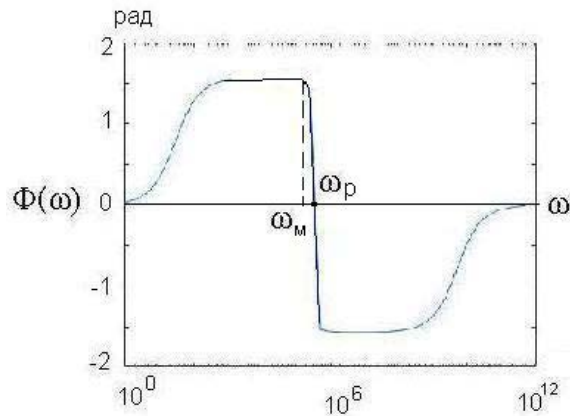


Рис. 7. ФЧХ индуктивного ПД

Для построения графика зависимости ДФЧХ, представленного на рис. 8, использованы возможности MatLab. На графике более четко выделяется резонансная частота в сравнении с графиком зависимости комплексного сопротивления от частоты.

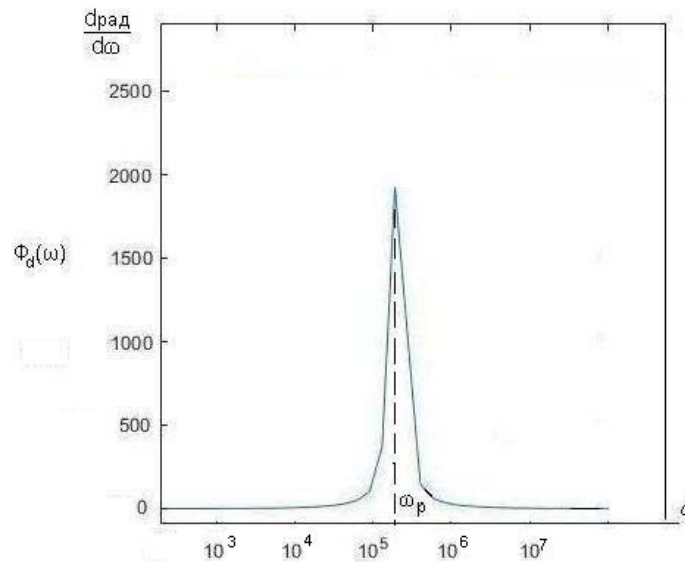


Рис. 8. ДФЧХ для индуктивного ПД

Таким образом, имея экспериментальные данные по ФЧХ или ДФЧХ легко измерить точное значение резонансной частоты.

Для выявления взаимосвязи экспериментальных данных и идентификационных признаков определим значение резонансной частоты из условия равенства нулю уравнения (9), описывающего ФЧХ, которое может быть переписано в виде

$$L - R_L^2 C - \omega_p^2 L^2 C = 0. \quad (10)$$

В результате из (10) получаем реальное значение частоты резонанса

$$\omega_p = \sqrt{\frac{L - R_L^2 C}{L^2 C}}. \quad (11)$$

На практике у параметрических датчиков индуктивного типа межвитковая емкость обычно не превышает 10^{-8} [Ф]. В этом случае, как показали расчеты, знаменатель уравнения (9) изменяется незначительно (не более 20 %) при изменении частоты в пределах до резонансной. Это дает возможность рассчитать приближенное значение частоты ω_m , при которой ФЧХ

достигнет максимального значения, из условия равенства нулю первой производной от выражения в числителе формулы (9), которое описывается уравнением

$$L - 3\omega_m^2 L^2 C - R_L^2 C \approx 0. \quad (12)$$

Соответственно, получаем

$$\omega_m \approx \sqrt{\frac{L - R_L^2 C}{3L^2 C}}. \quad (13)$$

В уравнениях (11) и (13) присутствует составляющая $R_L^2 C$, которая искажает результат идентификации, так как воспринимается как индуктивность. Эта составляющая для подавляющего большинства индуктивных ПД не превышает 0,1 % от значения L и в большинстве случаев ею можно пренебречь. В этом случае можно принять, что $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, что соответствует классическому уравнению [5], а из (13) следует, что $\omega_m \approx \sqrt{\frac{1}{3LC}}$, или $\omega_m \approx \omega_p / \sqrt{3}$.

Таким образом, по результатам эксперимента для $\Phi\chi = 0$ легко найти точное значение резонансной частоты или частоты, при которой $\Phi\chi$ достигает максимального значения в диапазоне частот от 0 до резонансной. Далее производится выбор значений элементов L и C , используя одно из ранее полученных уравнений ((11) или (13)), что упрощает идентификацию СЗ для ПД. Однако при решении задач идентификации СЗ параметрических объектов исследования, имеющих параллельно соединенные емкость и индуктивность с сопротивлением потерь, будет иметь место неточность идентификации, обусловленная наличием составляющей $R_L^2 C$, которая неотличима от индуктивности. В результате будет идентифицирована индуктивность, равная $L' = L + R_L^2 C$.

Вместе с тем следует отметить, что использование фазочастотных характеристик позволяет не только более четко фиксировать резонанс, но и выявлять топологические особенности СЗ в виде ДЭЦ для параметрических объектов исследования (включая ПД) [6]. Кроме того, благодаря использованию высокоточных и простых в применении мер частоты, измерения фазы могут быть выполнены с более высокой точностью [7, 8]. Поэтому предложенная методика идентификации СЗ объектов исследования в виде ДЭЦ по фазочастотным характеристикам обеспечивает более высокую достоверность результата, чем при использовании методов анализа, основанных на анализе спектральных характеристик выходного сигнала ИЦ, например спектра Фурье, спектральной плотности или амплитудно-частотных характеристик.

Библиографический список

1. Афонский, А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 248 с.
2. Новицкий, П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 420 с.
3. Любимов, Э. В. Mathcad. Теория и практика проведения электротехнических расчетов в среде Mathcad и Multisim (+ DVD-ROM) / Э. В. Любимов. – М.: Наука и техника, 2012. – 400 с.
4. Гуляев, А. К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows : практ. пособие / А. К. Гуляев. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 400 с.
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1996. – 578 с.
6. Михотин, П. В. Использование фазовых спектров для идентификации и измерения параметров линейных систем / П. В. Михотин, М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 354–355.
7. Варламов, Ю. В. Способ измерения фазового сдвига с использованием биспектральных представлений / Ю. В. Варламов, В. Д. Михотин, М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 329–330.
8. Чернецов, М. В. Идентификация топологии двухполюсных электрических цепей МДП-структур / М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 452–453.

Чернецов Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

Chernetsov Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of technical
quality management,
Penza State Technology University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

УДК 621.317.08

Чернецов, М. В.

Применение фазочастотных характеристик для идентификации схем замещения параметрических датчиков / М. В. Чернецов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 26–33. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-4.

А. А. Щербакова, В. А. Соловьев

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АТОМОВ ГАЗОВ ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

A. A. Shcherbakova, V. A. Solov'ev

THE IDENTIFICATION OF THE GASES ATOMS IN THE EMISSION SPECTRA USING THE PRINCIPLES OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является информационно-измерительная система для идентификации газов. Предметом исследования являются способ достоверной идентификации газов по спектрам излучения, основанный на принципах искусственных нейронных сетей. Целью работы является разработка способа достоверной идентификации атомов газов на основе анализа спектров излучения с использованием принципов искусственных нейронных сетей. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач использовались методы решения некорректных задач при спектральном анализе, методы математического моделирования, статистической обработки данных, теория искусственных нейронных сетей, метод обратного распространения ошибки, моделирование математической модели производилось в программной среде Visual Basic for Applications (VBA) Microsoft Excel. **Результаты.** На основе спектрометрической лабораторной установки разработан способ идентификации газов с использованием принципов искусственных нейронных сетей и спектральных характеристик в видимом диапазоне длин волн, разработаны структура и математическая модель искусственной нейронной сети идентификации газа по его спектральным характеристикам; определены параметры функции активации, позволяющей производить обучение искусственной нейронной сети, где в качестве учителя используются эталонные значения интенсивных длин волн различных газов. **Выводы.** Использование предлагаемой системы и способа идентификации атомов газов позволит: производить достоверную идентификацию газов с использованием искусственных нейронных сетей с обучением измерительной системы учителем; учителем выступают эталонные газы с известными длинами волн; при обучении минимизируются целевые функции, устанавливающие связь между интенсивностями и длинами волн в видимом диапазоне длин волн. Предложены рекомендации по модернизации структурной схемы и оборудования информационно-измерительной системы идентификации веществ в зависимости от решаемой задачи.

A b s t r a c t. Background. The object of the study is an information-measuring system for the identification of gases. The subject of the study is a method of reliable identification of gases by emission spectra based on the principles of artificial neural networks. The aim of the work is to develop a method for reliable identification of gas atoms based on the analysis of radiation spectra using the principles of artificial neural networks. **Materials and methods.** To solve the set tasks we used methods of solving ill-posed problems in spectral analysis, mathematical modeling, statistical data processing, the theory of artificial neural networks, back-propagation, simulation of the mathematical model were performed in the software environment of Visual Basic for Applications (VBA) in Microsoft Excel. **Results.** On the basis of spectrometric labora-

tory setup the method of gas identification using the principles of artificial neural networks and spectral characteristics in the visible wavelength range is developed, the structure and mathematical model of the artificial neural network of gas identification by its spectral characteristics are developed; the parameters of the activation function allowing to train the artificial neural network, where the reference values of the intense wavelengths of different gases are used as a teacher. **Conclusions.** The use of the proposed system and the method for gas atoms identification will allow: to make a reliable identification of gases using artificial neural networks with the training of the measuring system by the teacher; the teacher is the reference gases with known wavelengths; the training minimizes the target functions that establish a relationship between the intensities and wavelengths in the visible wavelength range. Recommendations on modernization of the structural scheme and equipment of the information and measuring system of identification of substances depending on the solved problem are offered.

К л ю ч е в ы е с л о в а: идентификация, длина волны, интенсивность излучения, спектрометр, атомы газа, целевая функция, функция активации.

Key words: identification, wavelength, intensity of radiation, spectrometer, gas atoms, objective function, the activation function.

Спектральный анализ используется для идентификации веществ в нефтеперерабатывающей, химической, фармацевтической промышленности и дает возможность произвести контроль качества веществ с достоверной идентификацией компонентного состава. Спектры излучения атомов газов, как и других веществ, отличаются друг от друга наборами спектральных линий и интенсивностью на каждой длине волны.

Проблема идентификации веществ является актуальной научно-технической задачей (идентификация отравляющих газов в воздухе, анализ качества топлива и др.), что приводит к созданию измерительных систем идентификации образцов веществ, основанных на системах технического зрения. Одним из современных научных и промышленных методов количественного и качественного анализа вещества материала является спектрометрический метод, используемый в данной работе. Наблюдение линейчатых спектров атомов позволяет понять суть и практическую направленность метода эмиссионного (спектрального) анализа [1–3].

Атомы различных химических элементов характеризуются различными наборами энергетических уровней. Поэтому спектры излучения различных атомарных газов содержат отличающиеся друг от друга наборы спектральных линий. Измерив длины волн спектральных линий излучения, можно определить химический состав излучающего газа, т.е. осуществить так называемый качественный спектральный анализ. Яркость линий в спектрах определяется частотой осуществления соответствующего квантового перехода между энергетическими уровнями излучающих атомов. Сравнивая яркости спектральных линий различных химических элементов, можно определить, в каких пропорциях в газовую смесь входят атомы тех или иных химических элементов, т.е. осуществить количественный спектральный анализ вещества. Так как атомы способны поглощать фотоны тех же частот, какие испускаются при излучении, то спектральный анализ может быть проведен не только по спектрам излучения горячих газов, но и по спектрам поглощения холодных газов.

Идентификацию атомов газа можно произвести построением градуировочного графика зависимости длины волны λ спектральных линий от градусных делений N отсчетного барабана монохроматора $\lambda = f(N)$. Для этого необходимо выявить несколько (4–6) наиболее характерных линий спектра газа, сравнить их с данными справочных таблиц и определить, какой газ находится в трубке [4]. Однако изменяются интенсивности и на других длинах волн, и эти изменения дают дополнительную информацию о составе вещества.

Применение измерительной системы (рис. 1), включающей спектрометр EnSpectr L405 с волоконно-оптическим кабелем, ПК с программным обеспечением позволяет измерять зависимость длины волны λ от интенсивности в числе счетов в секунду в 3600 точках диапазона длин волн 400–760 нм. Регистрация и обработка спектра ведется с помощью сопровождающей спектрометр программы Enhanced Spectrometry Educational. При этом идентификацию компонентов

можно произвести по значениям длин волн λ_i наиболее интенсивных линий $Y = \max [\text{счет/с}]$ и принципа искусственных нейронных сетей. Для идентификации газов предварительно создают базу данных спектральных коэффициентов поглощения эталонных компонентов.



Рис. 1. Вид измерительной спектрометрической системы

Спектрометр представляет собой прибор, состоящий из входящего через волоконно-оптический кабель излучения, дифракционной решетки, спектрометра типа Czerny-Turner, ПЗС-линейки, которая является детектором для регистрации амплитудных и спектральных характеристик рассеянного излучения и входит в систему сбора, фильтрации и анализа информации прибора. Доступ к аппаратным средствам прибора и получаемым данным осуществляется посредством встроенного микроконтроллера с USB-интерфейсом [5].

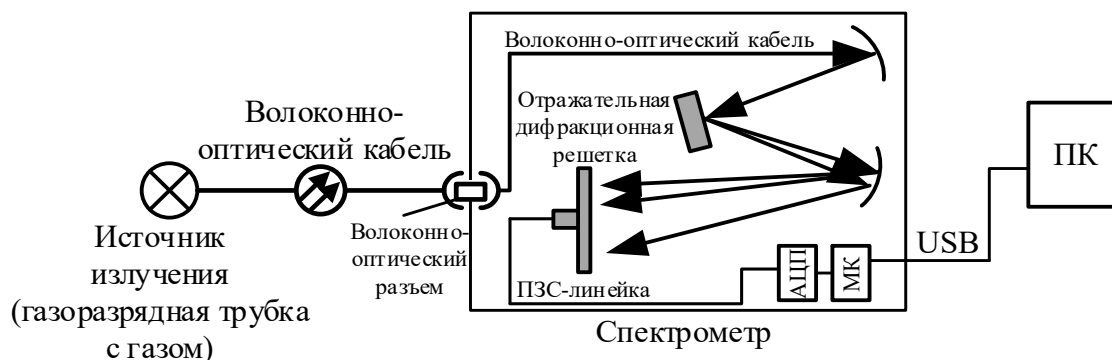


Рис. 2. Структурная схема измерительной спектрометрической системы

Настройка спектрометра для идентификации длин волн анализируемого излучения производится по спектру калиброванного источника света. Спектры электрических разрядов в одном и том же газе могут отличаться друг от друга при разном давлении. Наиболее часто для калибровки спектрометров видимого и ультрафиолетового диапазона используется газоразрядная ртутная лампа низкого давления. В данной работе предполагается проверка длин волн регистрируемых спектрометром при получении спектра ртути, парами которой заполнена одна из газоразрядных трубок.

На рис. 3 представлена структура искусственной нейронной сети идентификации атомов газа, представляющая собой: умножители $\otimes$ (коэффициенты синаптических связей ω_{ij}), сумматор $\sum_j$ (целевая функция U_j) и нелинейный преобразователь f (функция активации R нейрона).

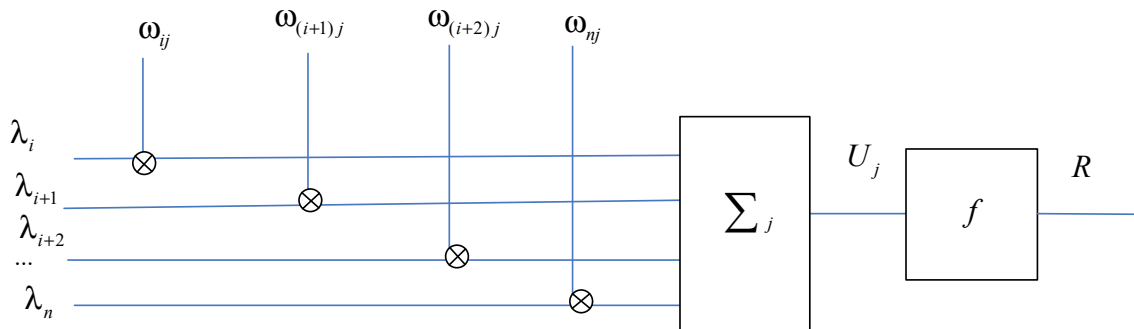


Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети идентификации газа

Идентификацию газов производят по минимуму целевой функции U_j , длинам волн с максимальными интенсивностями λ_i и значениям длин волн эталонов газов $\lambda_{\text{эт},i}$, при этом изменяются коэффициенты синаптических связей ω_{ij} , для чего используют, например, алгоритм обратного распространения ошибки [4]:

$$U_j = \sum_{i=1}^n [\lambda_i \omega_{ij} - \lambda_{\text{эт},i}]^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Значения функции активации нейронов искусственной нейронной сети идентификации R вычисляют в соответствии с функцией активации, например:

$$R = e^{-U_j \alpha \epsilon}, \quad (2)$$

где α – коэффициент, учитывающий наклон функций активации; ϵ – погрешность измерения спектрометра (0,1 нм).

График зависимости целевой функции от функции активации представлен на рис. 4. При активном состоянии нейрона идентификации исключаются газы, для которых значения функции активации $R \leq 0,9$.

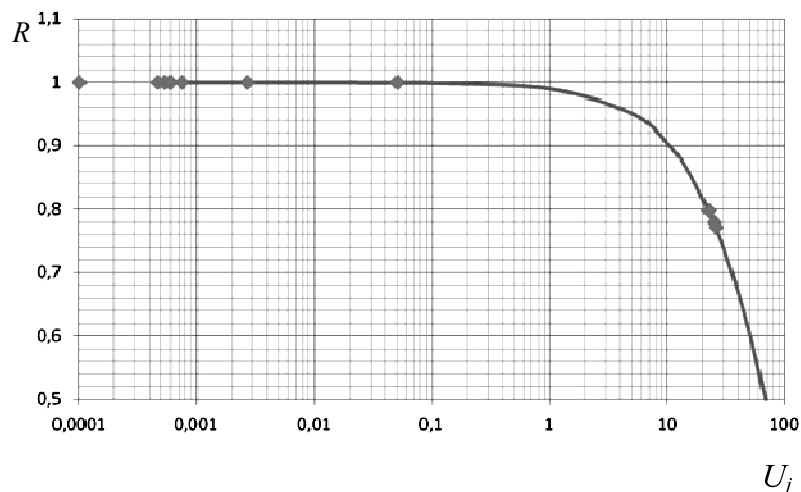


Рис. 4. График функции активации нейрона искусственной нейронной сети идентификации

Проверку адекватности математической модели произведем на примере газоразрядной трубки с названием X и идентифицируем, атомами какого газа заполнена трубка, снимая ее спектральные характеристики спектрометром в диапазоне длин волн 400–760 нм. В результате измерения получим зависимость интенсивности (счет в секунду) от длины волны (нм) $I(\lambda_i)$.

Установить в держатель источника питания трубку X , включить источник и зафиксировать спектральную характеристику лампы в программе при таком времени экспозиции, при котором интенсивность линии с максимальной интенсивностью не превышает 64 000 счетов в секунду.

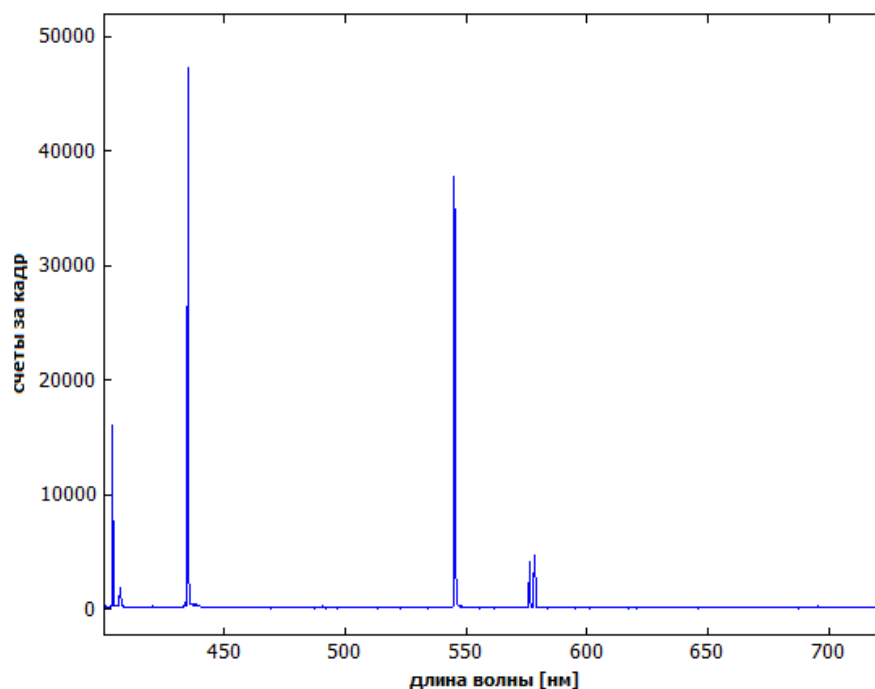


Рис. 5. Спектральная характеристика атомов ртути $I(\lambda_i)$, полученная в программе Enhanced Spectrometry Educational

Выбрав наиболее интенсивные линии в полученной спектральной характеристике лампы и используя целевую функцию (1), идентифицируем газ, который находится в трубке в соответствии с функцией активации (2). Газ, находящийся в трубке, идентифицирован, когда значение функции активации $0,9 \leq R \leq 1$. В табл. 1 представлены длины волн с наибольшими интенсивностями, характерные для атомов различных газов [5].

Таблица 1

Идентифицированные газы по спектрам излучения

Газ	λ_1 , нм	λ_2 , нм	λ_3 , нм	λ_4 , нм	λ_5 , нм	λ_6 , нм
Гелий	447,1	492,2	501,6	587,6	667,8	706,6
Аргон	420,0	696,5	706,7	738,4	750,4	751,5
Неон	585,2	607,4	614,3	640,2	650,6	703,2
Криптон	427,4	432,0	437,6	446,4	557,0	587,1
Водород	397,0	410,2	434,0	486,1	656,27	656,29
Кислород'	436,7	441,5	459,1	464,9	664,1	672,1
Азот	399,5	463,0	500,5	568,0	648,2	661,0

Для уточнения погрешности измерения спектрометра, заявленной производителем 0,1 нм, перед началом работы необходимо произвести калибровку спектрометра с помощью ртутной лампы. Для этого необходимо считать спектральные характеристики установленной лампы и сделать вывод, с какой точностью спектрометр воспроизводит и измеряет длину волны на «синем» и «красном» краях регистрируемого спектра, в середине видимого диапазона. Для этого вычислена относительная погрешность измерения, которая составила 0,037 %. Результаты экспериментальных данных представлены в табл. 2.

Технические характеристики ИИС следующие: диапазон регистрации длин волн спектрометра – 400–760 нм, разрешение спектрометра – 0,3 нм, точность спектрометра – 0,1 нм, ширина входной щели спектрометра – 30 мкм, количество пикселей в линейной ПЗС-матрице – 3600, напряжения питания спектрометра – 5 В (USB), напряжение питания источника – 220 В, напряжение питания газоразрядных трубок – не более 5 кВ, габариты установки – 450×300×410 мм.

Таблица 2

Экспериментальные данные, полученные при калибровке спектрометра
ртутной газоразрядной трубкой

Длина волны эталонное значение, $\lambda_{\text{эт.}}$, нм	Измерение 1 $\lambda_{\text{изм1}}$, нм	Измерение 2 $\lambda_{\text{изм2}}$, нм	Измерение 3 $\lambda_{\text{изм3}}$, нм	$\lambda_{\text{ср.}}$, нм	δ , %	$\delta A_{\text{ср.}}$, %
690,7	692,689	692,651	692,701	692,680	0,287	0,037
612,3	612,384	615,376	612,297	613,352	0,002	
579	584,01	584,164	582,289	583,488	0,008	
576,9	565,914	565,845	565,912	565,890	0,019	
546	545,013	548,2	546,847	546,687	0,001	
491,6	491,643	491,235	496,56	493,146	0,003	
435,8	437,8	435,815	435,798	436,471	0,002	
407,8	405,824	405,765	405,912	405,834	0,005	
404,6	402,647	402,689	402,698	402,678	0,005	

Результаты измерений спектральных характеристик соответствуют заявленной точности.

Проверка адекватности математической модели идентификации газов с помощью разработанной программы в VBA Microsoft Excel показала, что атомы газов могут быть идентифицированы при погрешности измерения спектральных характеристик до 3 %.

При отклонении спектров излучения на 3 % функция активации для азота составляет $R_{\text{азот}} = 0,900025555$, при отклонении на 4 % функция активации азота $R_{\text{азот}} < 0,9$ – азот не идентифицируется. Для остальных исследованных газов (гелий, аргон, неон, криптон, ртуть, водород, кислород) функции активации принимали значения $R < 0,9$, при отклонении спектров излучения более, чем на 6 %, а при отклонении в 16 % ни один газ не идентифицируется.

Использование данной информационно-измерительной системы для идентификации атомов газов позволит:

- 1) проводить достоверную идентификацию газов с использованием искусственных нейронных сетей с обучением измерительной системы учителем; учителем выступают эталонные газы с известными длинами волн; при обучении минимизируются целевые функции, устанавливающие связь между интенсивностями и длинами волн в видимом диапазоне длин волн;
- 2) выполнять модернизацию структуры информационно-измерительной системы для идентификации веществ в зависимости от решаемой задачи, например, для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости товарного бензина в процессе производства в режиме реального времени [6, 7] (рис. 6);
- 3) проводить автоматическую калибровку и переобучение информационно-измерительной системы идентификации веществ, работающей на принципах искусственных нейронных сетей.

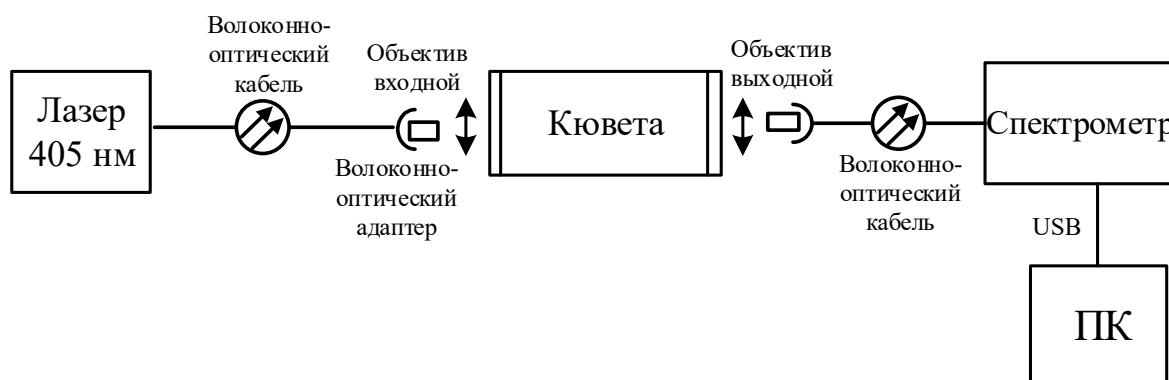


Рис. 6. Структурная схема ИИС для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости товарного бензина в процессе производства в режиме реального времени

Библиографический список

1. Шмидт, В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов / В. Шмидт. – М. : Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Chabot, P. A spectrum of applications Process Analysis using FT-NIR Spectroscopy / P. Chabot, M. Simpson, F. De Melas // Special Report Instrumentation & Analytics. ABB Review. – 2006. – P. 54–60.
3. Bakeev, K. A. Process Analytical Technology. – Blackwell Publishing Ltd, 2005. – 445 p.
4. Никифоров, И. К. Нейросетевой импедансный метод и устройства идентификации и определения параметров жидких нефтепродуктов : дисс. ... канд. техн. наук / Никифоров И. К. – Чебоксары : ЧГУ им. И. Н. Ульянова, 2005. – 172 с.
5. Андреев, В. В. Физика. Лабораторный практикум : учеб. пособие / В. В. Андреев, В. Я. Савицкий. – Пенза : ПАИИ, 2009. – С. 134–139.
6. Щербакова, А. А. Искусственная нейронная сеть для идентификации компонентов, определения состава топлива по спектральным коэффициентам поглощения / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев, Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3 (35). – С. 36–45.
7. Щербакова, А. А. Информационно-измерительная система определения состава и октанового числа бензинов в промышленных условиях на основе параметрического квантового генератора / А. А. Щербакова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 38–42.

Щербакова Анна Алексеевна

программист,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: anutka7790@mail.ru

Shcherbakova Anna Alekseevna

programmer,
sub-department of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Соловьев Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
Пензенский филиал Военной Академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок)
E-mail: v.soloviev@bk.ru

Solov'ev Vladimir Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of general professional disciplines
Penza branch of Military academy
of material-support logistics
named after army general A. V. Khrulev
(Military town, Penza-5, Russia)

УДК 004.942

Щербакова, А. А.

Идентификация атомов газов по спектрам излучения с использованием принципов искусственных нейронных сетей / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 34–40. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-5.

К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, А. В. Хосhev

УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

K. E. Utkin, S. I. Torgashin, A. V. Khoshev

CONTROLLED SYNTHESIS OF THIN FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В настоящее время интенсивно развивается метод магнетронного распыления, обеспечивающий контролируемое распыление тонких слоев с требуемыми параметрами. При многократном использовании мишени на ней образуется зона эрозии (канавка), непосредственно влияющая на скорость распыления материала (толщину пленки). Уменьшение толщины тонкой пленки приводит к увеличению удельного электрического сопротивления, т.е. к невоспроизводимости требуемых характеристик и параметров. Цель работы – напыление тонких пленок требуемых параметров и характеристик с использованием мишени длительного и многократного использования. **Материалы и методы.** Проведено определение зависимости толщины и сопротивления пленки от глубины эрозии мишени. Определена зависимость толщины пленки от времени распыления, исходя из глубины эрозии мишени. **Результаты.** Возможно производить управляемый синтез тонких пленок с заданными электрофизическими параметрами методом магнетронного распыления, улучшить воспроизводимость требуемых параметров при длительном и многократном использовании мишени. **Выводы.** Управляемый синтез тонких пленок, полученных методом магнетронного напыления, позволит получить заданные параметры и характеристики с использованием мишени длительного и многократного использования.

A b s t r a c t. Background. Recently the magnetron sputtering technique providing controlled thin-layers sputtering with the required parameters has been rapidly developing. When a target is used multiple times a zone of erosion (groove) is formed on it having a direct impact on material sputtering rate (film thickness). Reduction of thin film thickness causes the electrical resistivity increase, i.e. non-repeatability of the required response and parameters. The work objective is sputtering of thin films with the required parameters and response by means of long-term or multiple use target. **Materials and methods.** Relation between film thickness and resistance and target erosion depth has been defined. Dependence of film thickness on sputtering time on the basis of target erosion depth has been defined as well. **Results.** It is possible to perform controlled synthesis of thin films with the given physical parameters by magnetron sputtering technique, to improve the required parameters repeatability under long-term and multiple use of a target. **Conclusions.** The controlled synthesis of thin films obtained by magnetron sputtering technique will provide the given parameters and characteristics by means of long-term or multiple use target.

К л ю ч е в ы е с л о в а: металлопленочные датчики давления, синтез тонких пленок, образование канавки при напылении тонких пленок, метод магнетронного распыления, время напыления тонких пленок.

Key words: metal-film pressure sensors, thin film synthesis, grooving while thin-film sputtering, magnetron sputtering technique, groove (erosion), target, film thickness, time of thin-film sputtering.

Повышение качества и надежности ракетно-космической, авиационной и другой специальной техники неразрывно связано с совершенствованием датчиков различных физических величин. Рассмотрим чувствительные элементы тонкопленочных датчиков механических величин, которые представляют собой сложные гетерогенные структуры, состоящие из тонких пленок защитных, проводящих, диэлектрических и резистивных материалов. Параметры и характеристики тонких пленок во многом определяют технические характеристики датчиков.

Для напыления тонких пленок проводящих, резистивных и диэлектрических материалов широко используется магнетронное распыление. Данный метод позволяет проводить контролируемое распыление тонких слоев с требуемыми параметрами. В АО «НИИФИ» метод магнетронного распыления применяется для формирования контактных слоев из никеля (Ni) на акселерометрах АЛЕ – 048, АЛЕ – 037, АЛЕ – 055, создания защитного покрытия из ванадия (V) на акселерометрах АЛЕ – 057, напыления диэлектрических и резистивных пленок на чувствительные элементы (ЧЭ) ряда поставочных изделий (Вт 212 А1, Вт 206 Б, ДАВ-084, ДАВ-085, ДАВ-088, ДАВ-089).

Важной характеристикой магнетронной системы является скорость распыления материалов. Она больше там, где линии магнитной индукции параллельны мишени, а линии напряженности электрического поля перпендикулярны мишени. В этом месте происходит наиболее интенсивная бомбардировка мишени ионами аргона, что вызывает образование V-образной канавки. Форма канавки характеризует коэффициент использования материала мишени. При малом коэффициенте использования мишени канавка узкая, увеличивающаяся в глубину после каждого процесса распыления. При достижении глубины канавки, равной толщине мишени, требуется замена мишени. Образование глубокой канавки характерно для мишени никеля [1] (рис. 1).

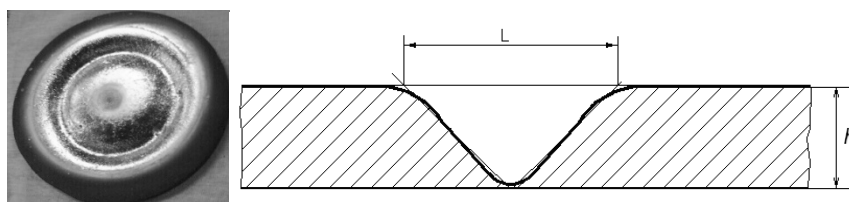


Рис. 1. Вид зоны эрозии мишени никеля:
 L – ширина зоны эрозии; h – глубина эрозии

Как показала практика, при многократном использовании мишени глубина эрозии оказывает непосредственное влияние на скорость распыления материала. На рис. 2, а представлена зависимость толщины тонких пленок Ni, полученных с использованием одной и той же мишени за 180 технологических циклов магнетронного распыления, от глубины эрозии мишени. Толщина тонких пленок Ni определялась кварцевыми микровесами (методом пьезоэлектрического микровзвешивания) с погрешностью 0,5 %.

Время распыления материала мишени в каждом цикле составляло 10 мин при токе 1 А.

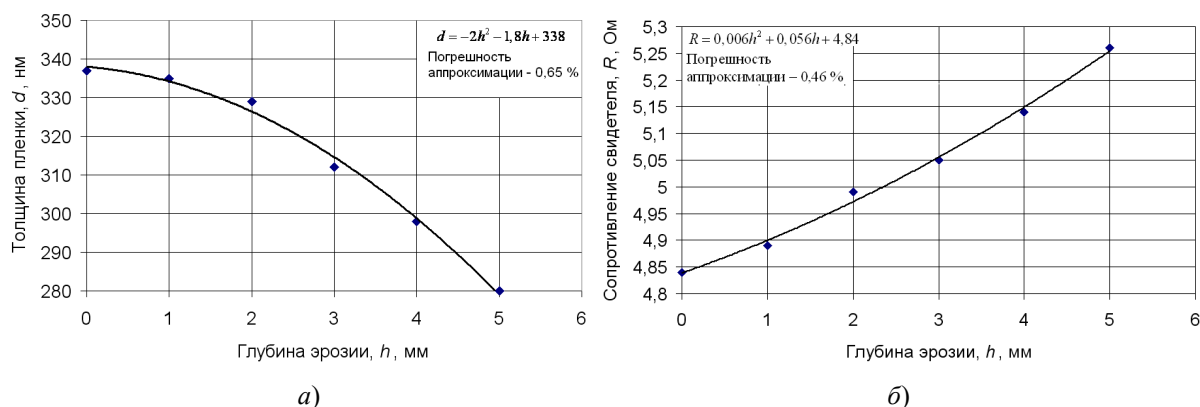


Рис. 2. Зависимость: а – толщины пленки Ni от глубины эрозии мишени;
б – зависимости сопротивления пленки Ni от глубины эрозии мишени;
♦ – эксперимент; — – аппроксимация

Из рис. 2 следует, что с увеличением глубины эрозии на мишени Ni толщина тонких пленок, полученных при одинаковых режимах распыления, уменьшается. Изменение толщины приводит к изменению удельного электрического сопротивления пленок [2, 3]. На рис. 2,б представлена зависимость сопротивлений тонких пленок Ni от глубины эрозии на мишени. Замер сопротивлений проводился по «свидетелям» – ситалловым пластинам, которые крепились на карусель установки магнетронного распыления рядом с подложкой (упругим элементом), на который происходит осаждение материалов. Замер электрического сопротивления свидетеля проводился после процесса напыления с помощью омметра Ф-30. Уменьшение толщины тонкой пленки приводит к увеличению удельного электрического сопротивления.

Из зависимостей, представленных на рис. 2, видно, что увеличение глубины зоны эрозии ведет к изменению параметров тонких пленок. При использовании одной мишени из резистивного материала наблюдается уменьшение толщины пленки, что влияет на изменение электрических параметров тензорезисторов. В случае совместного распыления материалов, входящих в состав тензорезистора, из двух отдельных источников наблюдается избыток одного из материалов и недостаток другого вследствие разных коэффициентов распыления материалов мишеней и, следовательно, разной скорости заглабления канавки.

Изменения параметров тонких пленок объясняются следующим образом: с увеличением глубины эрозии напряженность электрического потенциала плазмы уменьшается. В заглабленных зонах мишени ток магнетронного разряда меньше, так как границы плазмы находятся на уровне самой высокой вдоль магнитной силовой линии точки мишени. В направлении углубления плотность плазмы n быстро убывает, поскольку электроны плазмы замагничены и могут отклоняться от границы на величину ларморовского радиуса [4]:

$$r_L = \frac{m_e V_e}{eB},$$

где m_e – масса электрона; V_e – скорость электрона; e – заряд электрона; B – индукция магнитного поля.

Ионы могут отклоняться на величину радиуса Дебая:

$$r_d = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n e^2}},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура плазмы.

Расстояние убывания плотности плазмы может быть оценено как

$$r_0 = r_L + r_d.$$

При достижении глубины эрозии равной r_0 распыление прекращается.

Вследствие ослабления плотности плазмы в заглабленной зоне скорость распыления снижается, что приводит к уменьшению толщины и увеличению сопротивления тонкой пленки. При формировании тонких наноразмерных резистивных пленок с использованием мишени или совместного распыления материалов мишеней из двух отдельных источников изменение скорости распыления ведет к невоспроизводимости параметров тонких пленок.

В табл. 1 показаны изменения (в %) толщин и сопротивлений пленок, полученных при времени напыления 10 мин, при токе 1 А, путем распыления мишени никеля с разным значением глубины эрозии.

Таблица 1

Изменения параметров пленок Ni в зависимости от глубины эрозии

Номер «свидетеля»	1	2	3	4	5	6
Время напыления, сек	600					
Глубина зоны эрозии, мм	0	1	2	3	4	5
Толщина пленок, нм	337	335	329	312	298	280
Сопротивление свидетеля, Ом	4,84	4,95	5,03	5,11	5,2	5,26
Разброс толщины на свидетелях	16,9 %					
Разброс сопротивления на свидетелях	8,68 %					

На рис. 3 представлены зависимости толщины и сопротивлений тонких пленок Ni от глубины эрозии в относительных единицах (%).

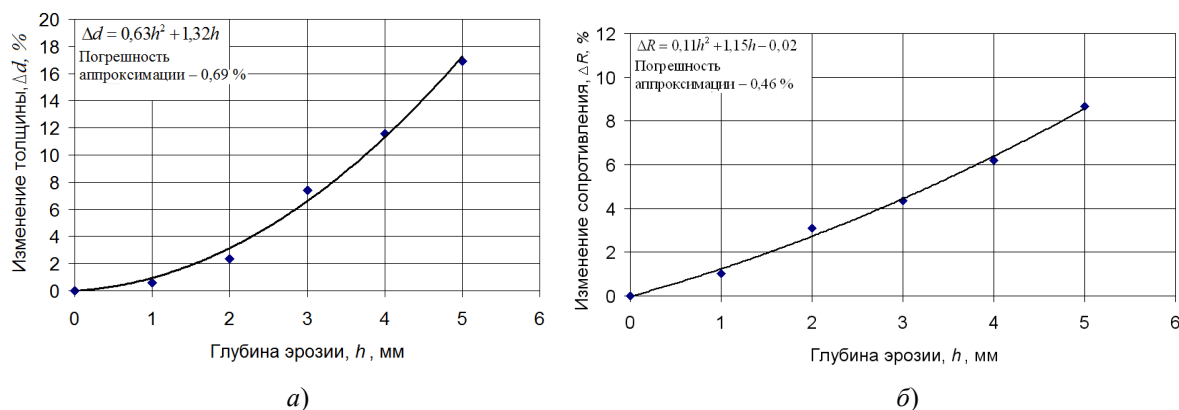


Рис. 3. Изменение толщины (а) и сопротивления (б) пленки Ni от глубины эрозии мишени:

♦ – рассчитанные значения; — аппроксимация

Для получения заданных параметров и улучшения воспроизводимости резистивных слоев необходимо при задании режимов распыления учитывать влияние убывания плотности плазмы в зоне эрозии – $n(h)$, где h – глубина эрозии мишени. Замер плотности плазмы в зоне эрозии – трудоемкая задача, связанная с использованием дополнительных приборов, однако, зная функцию зависимости толщины пленки от времени распыления, можно определить приращение времени Δt , необходимое для получения требуемых параметров. Полученная экспериментальным путем зависимость толщины пленки Ni от времени распыления t при токе магнетронного разряда 1 А представлена на рис. 4,а. Она имеет линейный вид и описывается функцией

$$d = 3,03t. \quad (1)$$

Из выражения (1) легко вычислить t_0 (время, необходимое для напыления 1 нм материала) = 1,75 с. Изменение толщины Δd при различных значениях глубины эрозии можно определить из выражений

$$\begin{cases} \Delta d_1 = d - d_1 = 2 \text{ нм} \\ \Delta d_2 = d - d_2 = 8 \text{ нм} \\ \Delta d_3 = d - d_3 = 25 \text{ нм} \\ \Delta d_4 = d - d_4 = 39 \text{ нм} \\ \Delta d_5 = d - d_5 = 57 \text{ нм} \end{cases}$$

где d – требуемое значение, получаемое при глубине эрозии $h = 0$; d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 – толщины пленок, получаемые при глубине эрозии $h = 1, 2, 3, 4, 5$ мм соответственно.

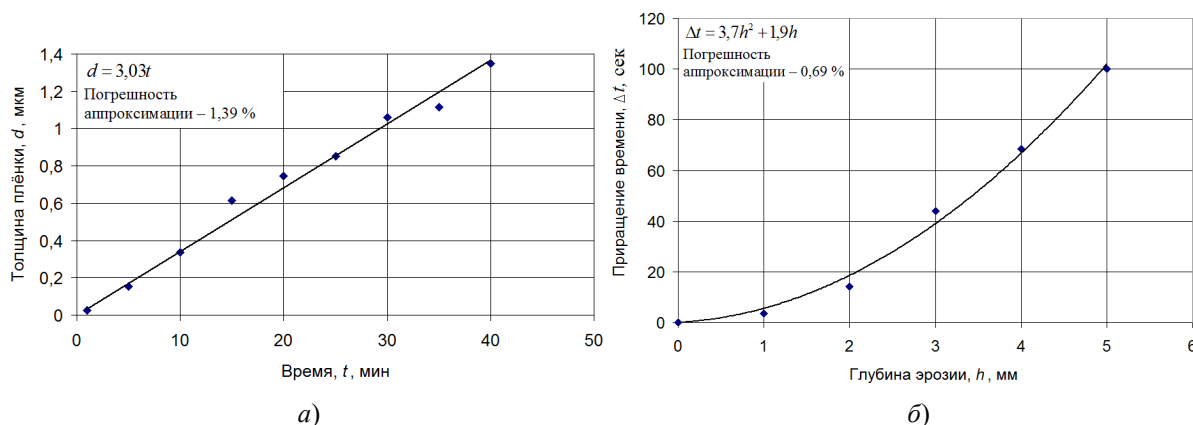


Рис. 4. Зависимость толщины пленки Ni от времени распыления t :

♦ – эксперимент; — аппроксимация

Таким образом, умножив время, необходимое для получения 1 нм на изменение толщины, определим приращение времени Δt для каждого значения глубины эрозии (рис. 4,б):

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \Delta d_1 t_0 = 3,5 \text{ с} \\ \Delta t_2 = \Delta d_2 t_0 = 14 \text{ с} \\ \Delta t_3 = \Delta d_3 t_0 = 43,9 \text{ с} \\ \Delta t_4 = \Delta d_4 t_0 = 68,4 \text{ с} \\ \Delta t_5 = \Delta d_5 t_0 = 100 \text{ с} \end{cases}$$

Приращение времени Δt показывает, насколько нужно увеличить время распыления, исходя из глубины эрозии, для получения требуемых воспроизводимых параметров тонких резистивных пленок. Например, для того чтобы получить требуемое значение толщины и сопротивления тонкой пленки Ni при глубине эрозии на мишени 5 мм, необходимо увеличить время распыления на 100 с. При любом другом значении глубины эрозии приращение времени можно определить из выражения

$$\Delta t = 3,7h^2 + 1,9h.$$

Еще один способ получения заданных значений параметров пленок при различных значениях заглабления канавки на мишени заключается в увеличении тока магнетронного разряда. Функции зависимости толщины пленки от тока магнетронного разряда описываются более сложными и нелинейными выражениями.

Результаты расчета позволяют производить управляемый синтез тонких пленок с заданными электрофизическими параметрами методом магнетронного распыления с улучшением воспроизводимости требуемых параметров при длительном и многократном использовании мишени.

Библиографический список

1. Хошев, А. В. Экспериментальное исследование характеристик магнетронного распыления / А. В. Хошев, С. В. Тимаков // Датчики и системы : сб. докл. 29 науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2010. – С. 148–159.
2. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга ; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. – Нью-Йорк, 1970. – М. : Сов. радио, 1977. – Т. 1. – 664 с.
3. Смирнова, К. И. Тонкие пленки в микроэлектронике : учеб. пособие / К. И. Смирнова. – Томск : ТУСУР, 2007. – 91 с.
4. Получение и свойства композиционных покрытий на основе металл – углерод с нанокристаллической структурой / С. А. Ширяев, М. В. Атаманов, М. И. Гусева, Ю. В. Мартыненко, А. В. Митин, В. С. Митин, П. Г. Московкин // Журнал технической физики. – 2002. – Вып. 2, т. 72. – С. 99–104.

Уткин Кирилл Эдуардович

заместитель начальника цеха микроэлектроники,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Utkin Kirill Eduardovich

deputy chief of the microelectronics department,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Торгашин Сергей Иванович

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по производству и технологиям,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences,
depute general director for production
and technologies,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Хошев Александр Вячеславович

кандидат технических наук, инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Khoshev Aleksandr Vyacheslavovich

candidate of technical sciences, engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.793.7

Уткин, К. Э.

Управляемый синтез тонких пленок, полученных методом магнетронного распыления /
К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, А. В. Хошев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. –
№ 2 (24). – С. 41–46. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-6.

*С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова,
С. А. Бростилов, Ю. А. Шатова*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

S. A. Mihailov, V. Ya. Gorjachev, T. Yu. Brosttilova, S. A. Brosttilov, Yu. A. Shatova

APPLICATION OF THE METHOD OF DISTRIBUTED POWER DENSITY TO OPTIMIZE THE LOCATIONS OF THE SUBSTATIONS IN THE PLANT ENGINEERING

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются системы электроснабжения цехов машиностроительных предприятий. Предметом исследования являются цеховые потребители и источники электроэнергии. Целью работы является задача определения оптимального размещения цеховых подстанций для снижения энергопотерь и металлоемкости линий энергоснабжения. **Материалы и методы.** В работе применен метод распределенных удельных мощностей. Критериями оптимизации являются величины потерь электроэнергии, связанные с ее передачей, а также металлоемкость системы энергоснабжения. **Результаты.** Предложен метод, основанный на том, что все нагрузки, распределенные на поверхности, представлены фигурами в виде тел вращения. Поверхность, ограничивающая эти тела, образована и определяется произведением базовой функции на величину мощности нагрузки. Анализ результатов проводится путем замены группы потребителей электроэнергии на эквивалентный потребитель с определением радиуса рассеяния. **Выводы.** Предлагаемый метод позволяет проектировать системы электроснабжения, обладающие лучшими параметрами и характеристиками по признаку минимальных потерь электроэнергии при ее передаче, а также с минимальной металлоемкостью. Метод обладает универсальностью и может быть использован как для определения оптимального размещения объектов системы электроснабжения населенных пунктов, так и для оптимального размещения компенсаторов реактивной мощности. При установке компенсаторов, кроме того, появляется дополнительное снижение потерь в энергосети, повышается качество электроэнергии, подводимой потребителю.

A b s t r a c t. Background. The object of the study is the power supply system of machine-building enterprises. The subject of the study are shop consumers and sources of electricity. The aim of the work is to determine the optimal placement of shop substations to reduce energy losses and metal consumption of power supply lines. **Materials and methods.** The method of the distributed specific capacities is applied in the work. The optimization criteria are the amount of energy losses associated with its transmission, as well as the metal content of the power supply system. **Results.** The method based on the fact that all loads distributed on the surface are represented by figures in the form of rotation bodies is proposed. The surface limiting these bodies is formed and determined by the product of the basic function on the amount of load power. The analysis of the results is carried out by replacing the group of electricity con-

sumers with an equivalent consumer with the determination of the scattering radius. **Conclusions.** The proposed method allows to design power supply systems with the best parameters and characteristics on the basis of minimum power losses during its transmission, as well as with minimum metal content. The method has versatility and can be used to determine the optimal location of the objects of the power supply system of settlements, and for the optimal placement of reactive power compensators. When installing compensators, in addition, there is an additional reduction in losses in the power grid, increases the quality of electricity supplied to the consumer.

Ключевые слова: система электроснабжения, оптимизация, электроподстанция, потребитель электроэнергии, металлоемкость, ненаправленный граф.

Key words: power system, optimization, substation, consumer of electricity, metal, undirected graph.

Введение

Проектирование систем электроснабжения машиностроительных предприятий является сложной задачей, потому что проектировщики этих систем, как правило, имеют дело с большим количеством исходной информации, объем которой на каждом этапе проектирования увеличивается и одновременно меняется сам характер данных. Происходит это, как правило, из-за увеличения количества потребителей электроэнергии.

Обработка и анализ больших массивов информации и высокая динамика их параметров привели к широкому применению вычислительной техники и, как следствие, к необходимости разработки новых подходов и методов проектирования систем электроснабжения. Особая потребность имеется в специальном подходе, позволяющем проводить анализ и описание структуры распределения нагрузок с учетом их взаимного геометрического расположения источников и потребителей.

О том, как распределяется нагрузка на промышленной территории, судят по картограммам нагрузок, которыми называют специальный план, визуализирующий распределение нагрузок потребителей электроэнергии.

Построение картограммы производят и на планах размещения потребителей энергии в каждом цехе и на генеральном плане предприятия. Анализ картограмм проводят на основе различных методов.

Метод центра масс

К наиболее простому из них относят метод, изображающий степень интенсивности распределения нагрузок потребителей в виде равновысоких цилиндров [1–3]. Для центров цилиндров координатами служат координаты мест размещения потребителей электроэнергии, а величина радиуса сечения цилиндра характеризует расчетную мощность потребителя электроэнергии. Оптимальное размещение подстанций зависит от координат центра масс полученного «тела».

Формирование системы электроснабжения предполагает также и определение мест размещения компенсаторов, и, как следствие, предполагает построение двух картограмм: отдельно для активных нагрузок и отдельно для реактивных.

Метод эквипотенциальных контуров

Применение этого метода предполагает проведение аналогии между значениями мощности потребителей и величинами потенциалов в тех же точках. Каждому месту (или точке) размещения потребителя присваивают потенциалы, которые равны значениям мощности потребителей. При перемещении в другую точку значения их потенциалов уменьшаются и в некоторых особо удаленных от мест размещения потребителей приближаются к нулю. Таким образом, образуется поверхность, имеющая линии равного потенциала, которые характеризуются значениями функции, определяемой суммой величин потенциалов всех источников энергии [1, 4–6].

Для построения результирующей поверхности, как правило, применяется показательная форма потенциальной функции

$$\Pi(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i e^{-\alpha[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]},$$

где α – параметр, характеризующий контрастность рельефа графика потенциальной функции, заранее задаваемый проектировщиком.

Описанные выше методы не обладают свойством универсальности и используются только для вычисления координат оптимального размещения одной подстанции, снабжающей электроэнергией заданных потребителей. Метод распределенных удельных мощностей, с одной стороны, имеет более широкую область применения, а с другой – предлагаемый метод обладает большей универсальностью.

Метод распределенных удельных мощностей

В основе дальнейшего анализа нагрузок использован метод распределенных удельных мощностей, суть которого заключается в следующем. В качестве базовой в этом методе используется функция следующего вида [2]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}}.$$

График функции представляет собой колоколообразную поверхность.

На плане цеха, населенного пункта или района каждый потребитель представляется поверхностью, описываемой уравнением

$$s_{уд}(x, y) = S_{при} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}},$$

где $s_{уд}(x, y)$ – это удельная мощность в точке x, y , кВА/м²; $S_{при}$ – мощность электрического приемника, приведенная к длительному режиму; (a, b) – координаты места подключения потребителя; σ – величина, определяющая степень рассеяния и названная «радиусом рассеяния» удельной мощности, м.

Пример поверхности представлен на рис. 1.

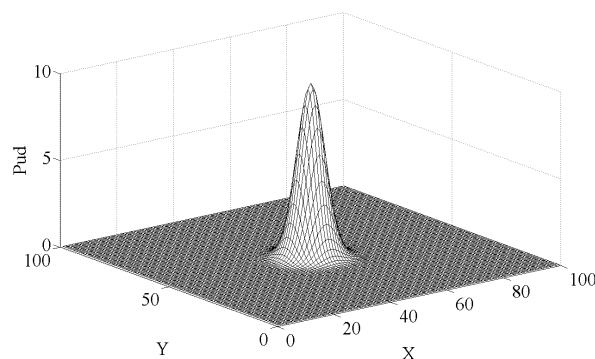


Рис. 1. Пример поверхности

Удельная мощность каждого ЭП распределяется по поверхности. Однако при изменении радиуса рассеяния σ объем фигуры, ограниченный этой поверхностью и плоскостью x, y , будет оставаться равным величине мощности энергопотребителя.

Технология метода удельных мощностей

При вычислении координат рекомендуемого места размещения цеховых подстанций на основе метода удельных мощностей исходными данными являются:

- система координат, привязанная к плану цеха;
- координаты мест размещения потребителей;
- величина полной мощности потребителя;
- значение коэффициента мощности потребителя (или значение активной и реактивной мощности потребителя);
- категория потребителя;
- так называемый суточный график нагрузки потребителя.

Применение метода позволяет производить:

- вычисление координат оптимальных мест размещения подстанций по критерию минимальных потерь при передаче электроэнергии, т.е. потерь в линиях электропередач;
- вычисление наиболее эффективных мест размещения компенсаторов для увеличения КПД систем электроснабжения;
- исследование и анализ системы электроснабжения проводится в среде MatLAB.

Основные этапы расчета:

- сбор информации о потребителях;
- подготовка mat – файла потребителей уровня напряжений 380 и 660 В для определения координат подстанций 6, 10, 20 кВ;
- вычисление координат вершин поверхности при различных значениях радиуса рассеяния;
- определение границ «зоны действия» для каждой подстанции;
- уточнение мест оптимального размещения подстанций;
- вычисление значения мощности подстанции;
- определение категории подстанций;
- выбор рекомендуемого типа трансформаторов.

Сравним метод удельных мощностей и метод центра масс. С целью упрощения и сокращения вычислений будем считать, что три нагрузки, мощностью по 1 кВт каждая, расположены на равном расстоянии в 10 м от центра плоскости, имеющей размеры 100×100 м на равном расстоянии друг от друга по окружности радиусом, равным 10 м.

Сумма удельных мощностей дает результирующую поверхность

$$P_{ud}(x, y) = P_{ud1}(x, y) + P_{ud2}(x, y) + P_{ud3}(x, y),$$

где P_{ud} – результирующая удельная мощность в точке с координатами x, y ; $P_{ud1}, P_{ud2}, P_{ud3}$ – составляющие удельной мощности от первого, второго и третьего потребителя.

Рассмотрим динамику изменения поверхности при изменении радиуса рассеяния.

График, представленный на рис. 2, соответствует распределению удельной мощности по поверхности при $\sigma = 3$.

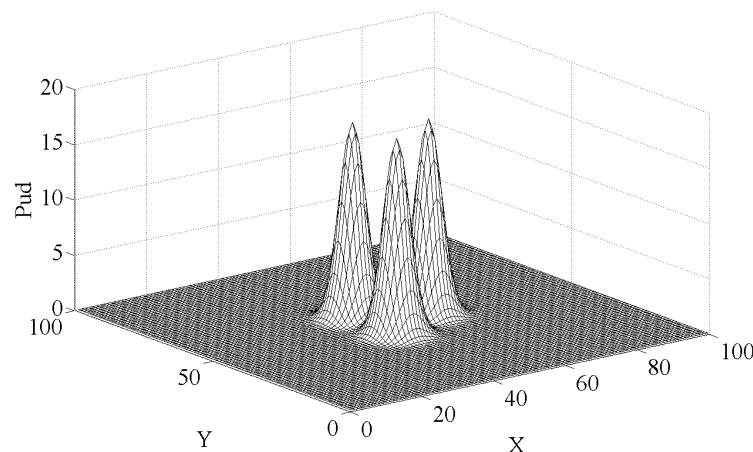


Рис. 2. Распределение удельной мощности по поверхности

Координаты вершин были равными

$$y_1 = 42, y_2 = 50, y_3 = 58, x_1 = 45, x_2 = 60, x_3 = 45.$$

При изменении радиуса рассеивания суммарный объем фигуры не изменяется. При увеличении коэффициента растекания до 15 получаем результирующую поверхность с формой, представленной на рис. 3, похожей на одиночную нагрузку.

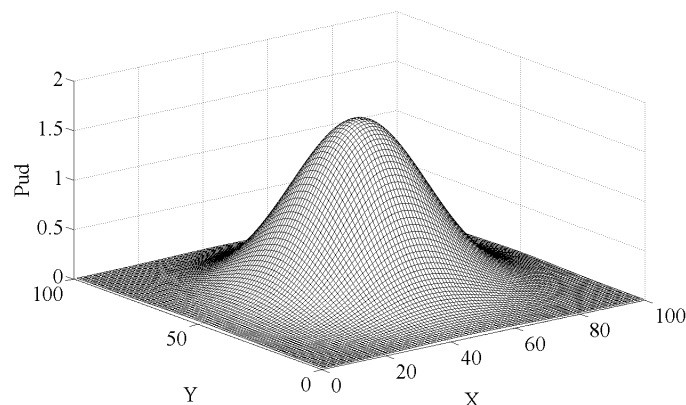


Рис. 3. Поверхность при увеличении коэффициента растекания до 15

Объем, ограниченный сверху поверхностью, не изменился и остался равным 3000 единицам, высота вершины составила $1,7 \text{ Вт/м}^2$. Вершина имеет координаты $x = 50$, $y = 50$.

Итак, найден центр масс трех нагрузок, равных по величине. Это доказывает справедливость метода удельных мощностей.

Применение метода удельных мощностей для определения оптимальных мест расположения нескольких подстанций

Исследуем эффективность нового метода на примере частично симметричных девяти нагрузок. Значения мощностей для каждой нагрузки и координаты их размещения на поверхности размером $200 \times 200 \text{ м}$ представлены на рис. 4.

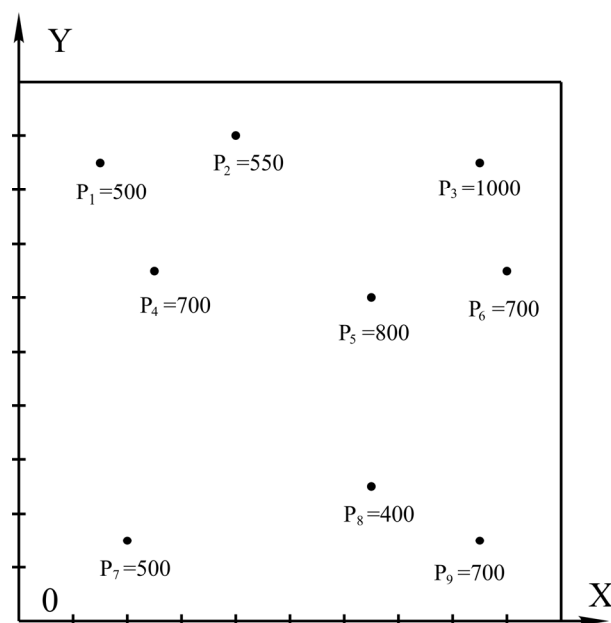


Рис. 4. Значения мощностей для каждой нагрузки и координаты их размещения

Параметры потребителей:

$$P_1 = 500, \quad x_1 = 30, \quad y_1 = 170,$$

$$P_2 = 550, \quad x_2 = 80, \quad y_2 = 180,$$

$$P_3 = 1000, \quad x_3 = 170, \quad y_3 = 170,$$

$$P_4 = 700, \quad x_4 = 50, \quad y_4 = 130,$$

$$P_5 = 800, \quad x_5 = 130, \quad y_5 = 120,$$

$$P_6 = 700, \quad x_6 = 180, \quad y_6 = 130,$$

$$P_7 = 500, \quad x_7 = 40, \quad y_7 = 30,$$

$$P_8 = 400, \quad x_8 = 130, \quad y_8 = 50,$$

$$P_9 = 700, \quad x_9 = 170, \quad y_9 = 30.$$

При значении радиуса рассеяния равным $\sigma = 6$ получаем значения координат центров нагрузок, совпадающие с координатами нагрузок.

График распределения удельных мощностей при данном значении радиуса рассеяния показан на рис. 5.

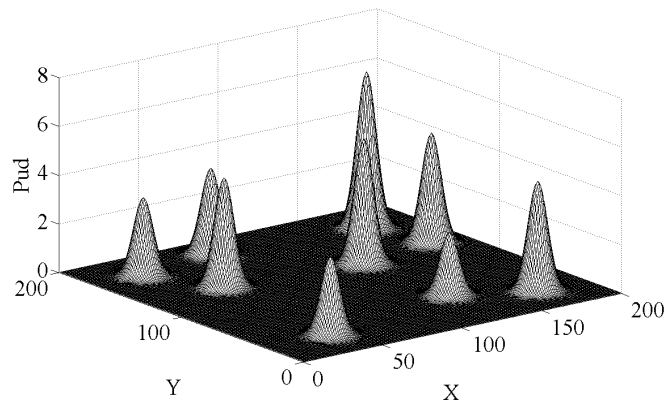


Рис. 5. График распределения удельных мощностей

Если значение радиуса рассеяния равно 25, количество характерных вершин, а следовательно, и мест размещения подстанций становится равным четырем (рис. 6).

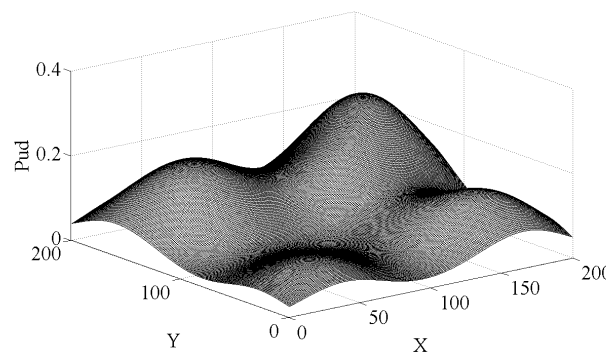


Рис. 6. Количество вершин и мест размещения подстанций

Изменив значение радиуса рассеяния, получаем три центра масс, соответствующие расчетным значениям соответствующих групп. Центры нагрузок, определяющие места размещения подстанций для питания трех групп потребителей, будут иметь координаты $P_{11}(40,100)$, $P_{12}(130,150)$ и $P_{13}(130,48)$.

Очевидно то, что предлагаемый метод определения мест размещения подстанций упрощает вычислительные процедуры на основе применения вычислительной техники, особенно, если имеется произвольное количество потребителей.

**Определение зон подключения потребителей к подстанциям,
расположенным в центрах электрических нагрузок**

Определение центров электрических нагрузок не решает полностью проблем проектирования схемы электроснабжения района, так как нет ясности в том, к какой из подстанций, расположенных в центрах нагрузок, подключить потребитель электроэнергии. Для этого предлагается использовать линии «водораздела» поверхности удельных мощностей. Именно эти линии соответствуют минимальным удельным мощностям.

При значении радиуса рассеяния равном 5 м график распределения удельной мощности по площади представлен на рис. 5.

Для заданного радиуса рассеяния границами зон подключения потребителей, очевидно, будут границы между потребителями. В программной среде MatLAB получена картина размещения разделительных стен, представленная на рис. 7.

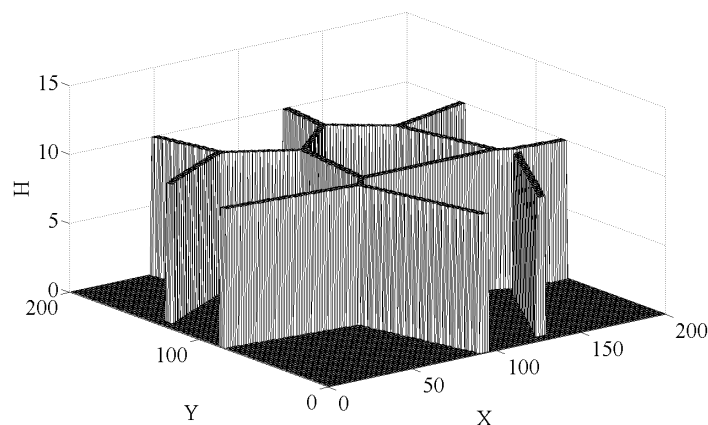


Рис. 7. Разделительные стены

Разделительные стены разделили поверхность на девять зон, которые соответствуют девяти потребителям. Более наглядным является рис. 8, на котором представлены зоны питания с местами размещения потребителей.

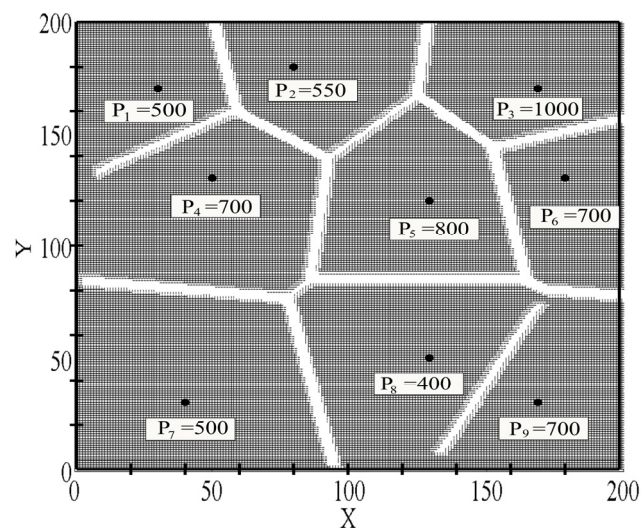


Рис. 8. Разделение поверхности на девять зон

На рисунке светлые полосы являются границами раздела зон. При увеличении радиуса рассеяния распределение удельных мощностей по поверхности в значительной степени изменяется.

При значении радиуса рассеяния равным 25 количество характерных вершин, а следовательно, и мест размещения подстанций становится равным четырем (см. рис. 6).

При данном значении радиуса рассеяния на поверхности четко выражены четыре зоны. Разделительные стены, представленные на рис. 9, четко выделяют зоны действия каждой из возможных подстанций.

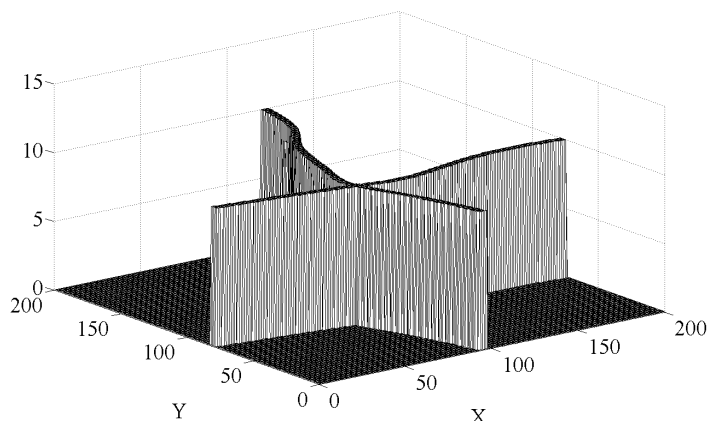


Рис. 9. Зоны действия четырех подстанций

Распределение потребителей по зонам подключения представлено на рис. 10.

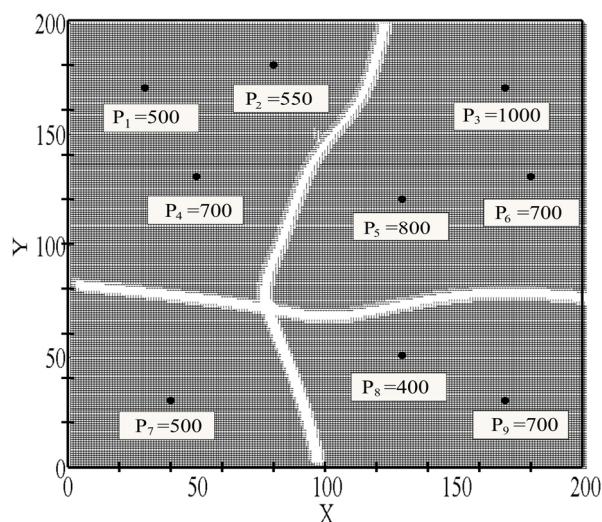


Рис. 10. Распределение потребителей по зонам подключения

Координаты вершин или координаты центров электрических нагрузок при радиусе рассеяния равном 25 м имеют следующие значения:

G_1 имеет координаты $x_{g1} = 48$ и $y_{g1} = 150$; G_2 имеет координаты $x_{g2} = 169$ и $y_{g2} = 152$; G_3 имеет координаты $x_{g3} = 40$ и $y_{g3} = 30$; G_4 имеет координаты $x_{g4} = 162$ и $y_{g4} = 34$.

Программа определения зон подключения нагрузок рекомендует подключить к первой подстанции первый, второй и четвертый потребителей. Ко второй подстанции следует подключить третьего, шестого и пятого потребителя. Седьмой потребитель рекомендуется обеспечивать электрической энергией от индивидуальной подстанции. Восьмой и девятый потребители рекомендуется питать от отдельной подстанции G_4 .

После разбиения всех потребителей по зонам подключения следует проверить значения координат центров электрических нагрузок для каждой зоны без учета влияния потребителей других зон.

На рис. 11 представлен график распределения удельной мощности первой подстанции, расположенной в центре G_1 , при значении радиуса рассеяния равным 25.

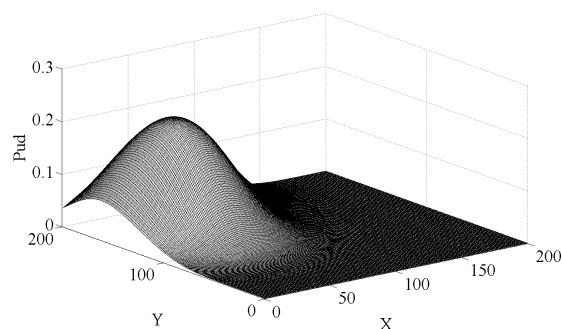


Рис. 11. График распределения удельной мощности первой подстанции

Для третьей зоны значения координат центра электрических нагрузок совпадают со значениями координат размещения самой нагрузки. Вычисления показали для рассматриваемого случая то, что уточненные значения координат центров электрических нагрузок практически совпадают со значениями координат вершин, вычисленных ранее с ошибкой в 1...3 м. Поэтому особой необходимости в уточнении мест размещения подстанций нет.

Пример применения метода распределенных удельных мощностей для определения оптимальных мест размещения подстанций цеха машиностроительного предприятия

На рис. 12 представлено распределение потребителей цеха. Применение метода определило оптимальные места размещения подстанций с соответствующими координатами вершин поверхности, представленными на рис. 13.

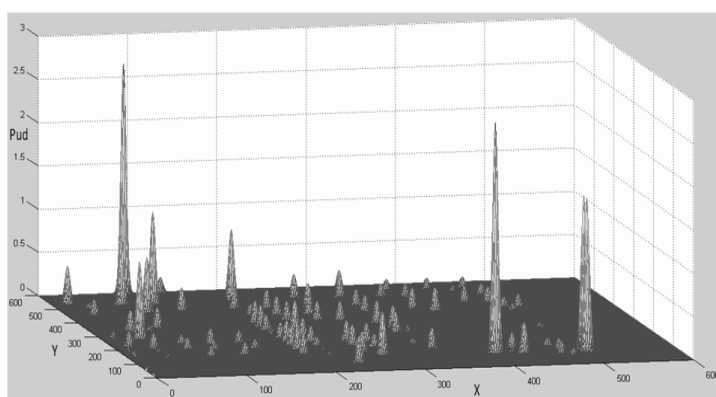


Рис. 12. Распределение потребителей цеха

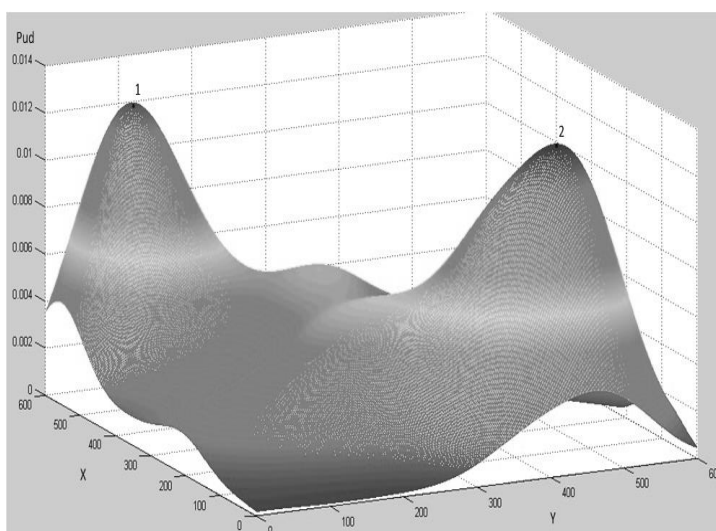


Рис. 13. Места размещения подстанций

В соответствии с рекомендациями использования метода определены зоны действия подстанций. Граница зон действия подстанций представлена на рис. 14 белой линией. Все потребители, расположенные выше границы зон влияния, рекомендуется подключить к подстанции, расположенной в первом центре электрических нагрузок (ЦЭН 1). Все потребители цеха, расположенные ниже границы, рекомендуется подключить к подстанции, расположенной во втором центре электрических нагрузок (ЦЭН 2).

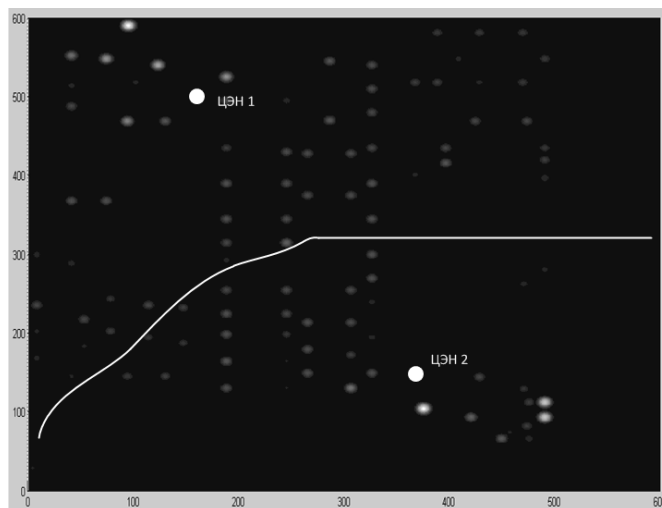


Рис. 14. Граница зон действия подстанций

Заключение

Применение метода распределенных удельных мощностей наиболее эффективно при определении оптимальных мест размещения цеховых подстанций различных предприятий. Метод обладает универсальностью и может быть использован как для определения оптимального размещения объектов системы электроснабжения населенных пунктов 6, 10 кВ по признаку минимальных потерь при передаче электроэнергии с минимальной металлоемкостью, так и для оптимального размещения компенсаторов реактивной мощности в цехе машиностроительного предприятия.

Библиографический список

1. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 466 с.
2. Каменева, В. В. К вопросу определения местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий / В. В. Каменева, Э. А. Киреева. – Электричество, 1972. – 73 с.
3. Generalized structural models of complex distributed objects / M. Yu. Mikheev, T. V. Zhashkova, A. B. Shcherban, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) (Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016). – Yerevan, 2016. – P. 1–4. – DOI 10.1109/EWDTS.2016.7807742.
4. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
5. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
6. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). – Lviv-Slavsko, 2016. – P. 214–218. – DOI 10.1109/TCSET.2016.7452017.
7. Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4-2. – С. 276–280.

8. *Grishko, A.* Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016). – Novosibirsk, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806423.
9. *Михайлов, С. А.* Использование метода распределенных удельных мощностей для определения мест установки источников питания в цехе машиностроительного предприятия / С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 85–90.
10. *Grishko, A.* Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, May 24–26, 2017). – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. – DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
11. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions / P. Andreev, N. Yurkov, I. Kochegarov, A. Grishko, A. Yakimov // 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016). – Saratov, 2016. – Vol. 1. – P. 1–7. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7878895.
12. *Бростилов, С. А.* Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, В. А. Трусков, В. Я. Баннов, А. О. Бекбаулиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
13. *Гришко, А. К.* Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
14. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. Ostreikovskiy, Ye. Shevchenko, N. Yurkov, I. Kochegarov, A. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 944, № 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
15. *Grishko, A.* Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters / A. Grishko, N. Yurkov, N. Goryachev // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (Polyana, Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017). – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 179–182. – DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
16. *Бростилова, Т. Ю.* Система контроля температуры энергетических объектов на базе волоконно-оптических датчиков / Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 139.

Михайлов Сергей Алексеевич

главный специалист,
 Московский узел связи энергетики
 (Россия, г. Москва, ул. Академика Челомея, 5а)
 E-mail: mihailov989@gmail.com

Mikhaylov Sergey Alekseevich

main specialist,
 Moscow communication node energy
 (5a Academician Chelomey street, Moscow, Russia)

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
 кафедра электроэнергетики и электротехники,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of power engineering
 and electrical engineering,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
 кафедра электроэнергетики и электротехники,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Brosttilova Tat'yana Yur'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
 sub-department of power engineering
 and electrical engineering,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бростилов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: brostilov@yandex.ru

Brostilov Sergey Aleksandrovich

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

Шатова Юлия Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yulia-shatova@yandex.ru

Shatova Yuliya Anatol'evna

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

УДК 621.311

Применение метода распределенной удельной мощности для оптимизации размещения подстанций в цехе машиностроительного предприятия / С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов, Ю. А. Шатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 47–58. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-7.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586.326.773.001.63

DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-8

*Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, К. И. Бастрыгин,
П. Н. Ефимов, А. Э. Шуртин, А. А. Тугускин*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

*R. Sh. Musaev, A. A. Trofimov, K. I. Bastrygin,
P. N. Efimov, A. E. Shurtin, A. A. Tuguskin*

SIMULATION OF HIGH TEMPERATURE PIEZOELECTRIC SENSOR OF RAPIDLY VARYING PRESSURES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование является неотъемлемой частью процесса разработки всех датчиков, работающих в жестких условиях эксплуатации. Методы имитационного моделирования позволяют получать необходимую информацию о процессах, протекающих в датчиках на предварительном дорогостоящем этапе макетирования, не прибегая к натурным испытаниям. Целью представленного имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления, разработку которого проводит АО «НИИФИ», для подтверждения правильности выбранных конструктивных решений. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый объект (датчик) заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование–изготовление–испытания». *Результаты.* В результате моделирования влияния внешних факторов на работоспособность датчика определены максимальные напряжения, возникающие при воздействии статических давлений на мембрану датчика; максимальные напряжения при воздействии синусоидальной вибрации и механического удара; построены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с. *Выводы.* Заложенные конструктивные решения датчика быстропеременных давлений обеспечивают стойкость датчика к влияющим величинам, температуре, статическому давлению, высоким уровням вибрационных и ударных нагрузок.

A b s t r a c t. *Background.* The simulation modeling is an integral part of process of development of all sensors working in rigid conditions of operation. Methods of a simulation modeling allow to obtain necessary information on the processes proceeding in sensors at a preliminary expensive stage of prototyping without resorting to field tests. The purpose of the presented simulation modeling is definition of influence of impact of external factors on operability of a high-temperature piezoelectric transducer of pressure which JSC «NIIFI», for confirmation of a regularity of the chosen design decisions develops. *Materials and methods.* As a research technique the simulation modeling at which the studied object (sensor) is replaced with its

model with which experiments for the purpose of obtaining information on this object are made was used. In an experiment the specialized software of Solidworks allowing to avoid the expensive and long-lived cycles «projection–manufacture–test» was applied. **Results.** As a result of model operation of influence of external factors on operability of the sensor the maximal tension arising at impact of static pressures on a sensor membrane is determined; the maximal tension at impact of sinusoidal vibration and mechanical blow; epyura of distribution of temperature profiles at influence of temperature of 3000 °C within 6 seconds are constructed. **Conclusions.** The put design solutions of the sensor of fast-live pressure provide resistance of the sensor to destabilizing factors, temperature, static pressure, high levels of vibration and shock loads.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитационное моделирование, пьезоэлектрический датчик, давление, внешние воздействующие факторы, температурное поле, вибрация.

Key words: simulation modeling, piezoelectric transducer, pressure, the external influencing factors, a temperature profile, vibration.

Введение

В большинстве случаев при измерении давлений на датчик воздействуют нестационарные температурные процессы вследствие существенного различия температуры датчика и измеряемой среды, синусоидальная вибрация, механические удары, статические давления. Отличительной особенностью защиты от нестационарного воздействия температуры (от минус 196 до 800 °C) являются серьезные затруднения как по защите от его воздействия, так и определению напряжений, возникающих в элементах конструкций. В этой связи актуальными задачами построения и исследования математических моделей датчиков давления и приборов на их основе является достоверное определение температурного поля датчика и оценка его влияния на работоспособность и метрологические характеристики.

В общем случае при расчетах и анализе нестационарного трехмерного температурного поля датчиков давления невозможно применение традиционных аналитических методов, принятых в задачах теплофизики, и приближенных численно-аналитических методов [1].

Задача расчета температурного поля рассматриваемых приборов решена путем применения метода конечных элементов с использованием имитационного моделирования [2–4] в программном комплексе «Solid Works» [5].

Целью проведения имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления, предназначенного для преобразования в электрический сигнал быстропеременных давлений с амплитудой от 0,12 до 5,6 МПа, статического давления от 22,4 до 125 МПа и давления перегрузки 156,3 МПа, температуры минус 196 °C и 800 °C, синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения до 500 g, механических ударов однократного действия с амплитудой ускорения 400 g.

Для проведения имитационного моделирования была построена трехмерная твердотельная модель датчика (рис. 1). Граничные условия были приняты исходя из реальных условий работы датчика и крепления его на объекте в зависимости от решаемой задачи (рис. 2–4).

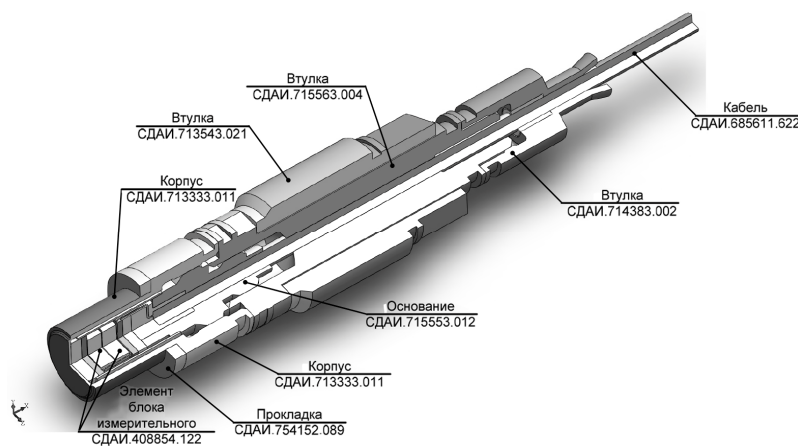


Рис. 1. Расчетная модель датчика

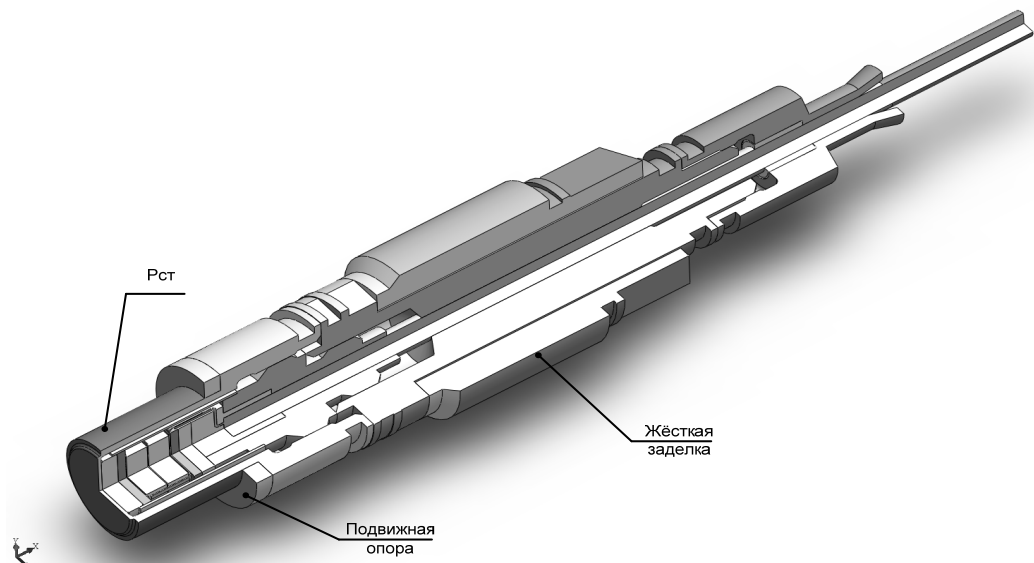


Рис. 2. Схема граничных условий для определения максимальных напряжений, возникающих при воздействии на датчик статических давлений, синусоидальной вибрации и механических ударов

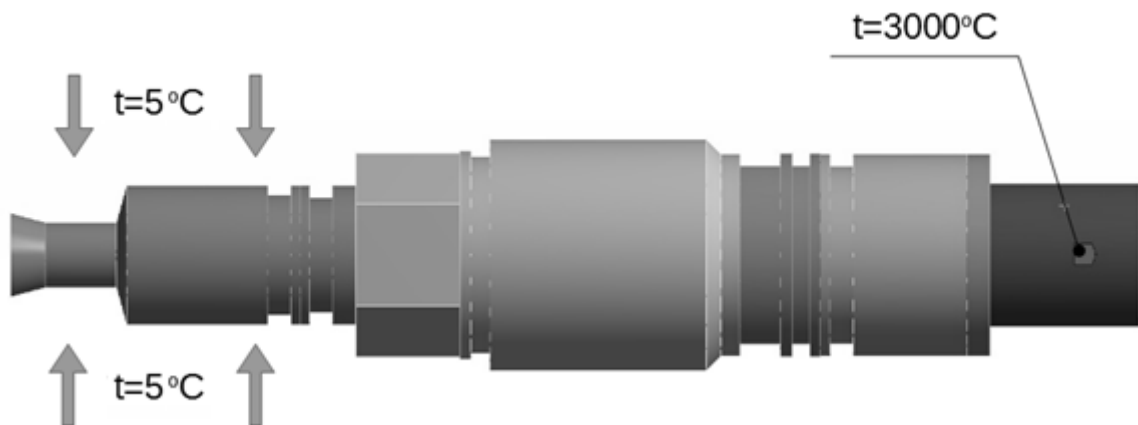


Рис. 3. Схема граничных условий для определения влияния на датчик температуры 3000 °С

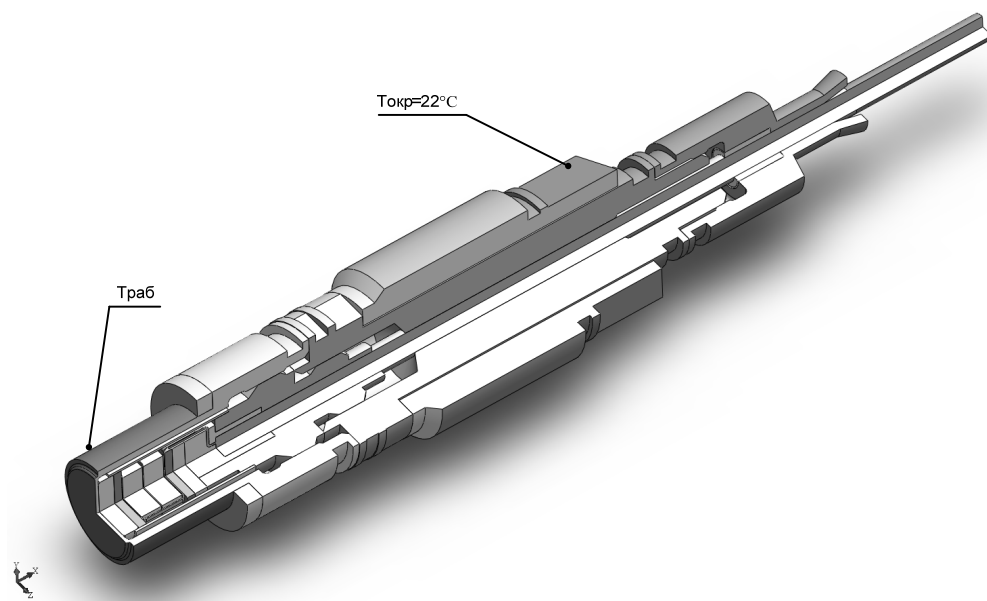


Рис. 4. Схема граничных условий для определения влияния на датчик рабочих температур (T_p) минус 196 и 800 °С

Основная часть

В результате имитационного моделирования воздействия статического давления 22,4, 125 МПа и давления перегрузки 156,3 МПа на мембрану датчика были получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 5–7 соответственно.



Рис. 5. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 22,4 МПа



Рис. 6. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 125 МПа

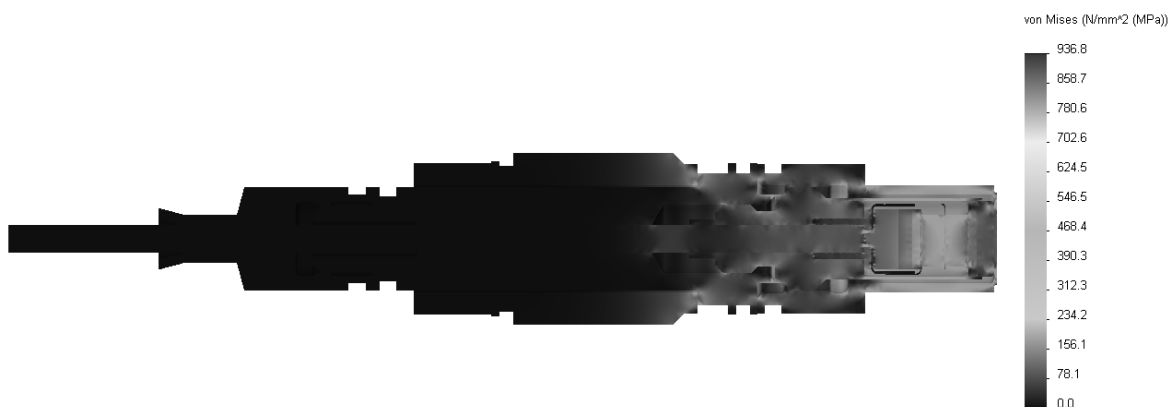


Рис. 7. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 156,3 МПа

При воздействии на датчик давления перегрузки 156,3 МПа максимальные напряжения, возникающие в конструкции, составляют 937 МПа (см. рис. 7). Представленные значения максимальных напряжений на рис. 7 носят локальный характер (находятся в одной точке на цилиндрической грани) и поэтому исключены. Значения напряжения, возникающего на деталях, изготовленных из данного сплава, составляют 700 МПа (см. рис. 7). Предел текучести сплава ХН67МВТЮ-ВД составляет 1070 МПа [6]. При воздействии статического давления перегрузки 156,3 МПа коэффициент запаса прочности составляет 1,53.

В результате определения влияния воздействия рабочих температур при имитационном моделировании были получены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры минус 196 °С (рис. 8) и 800 °С (рис. 9) в течение времени 3600 с.

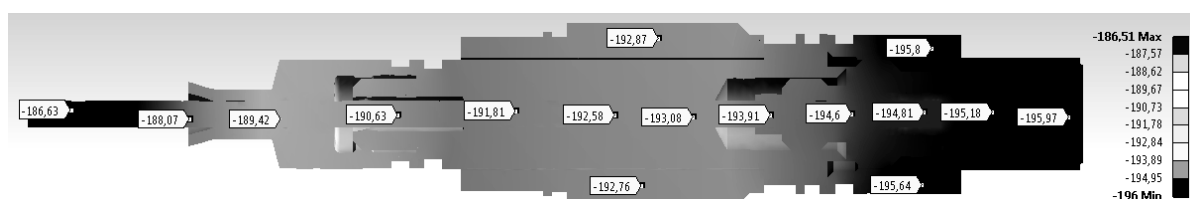


Рис. 8. Эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры минус 196 °С

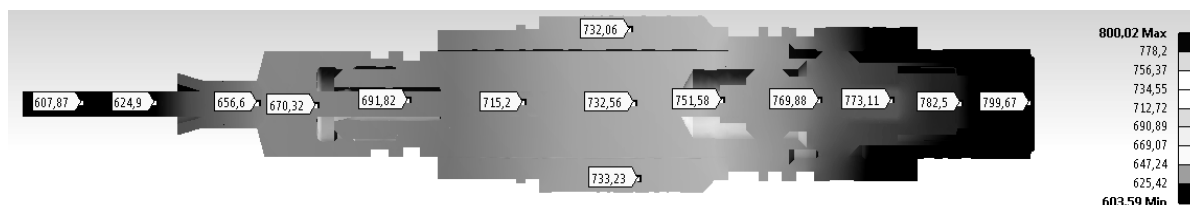


Рис. 9. Эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры 800 °С

Для определения момента времени, в который происходит выравнивание температурных полей и наблюдается тепловое равновесие между датчиком и окружающей средой, были получены зависимости распределения максимальных и минимальных температур в датчике от времени (рис. 10 и 11).

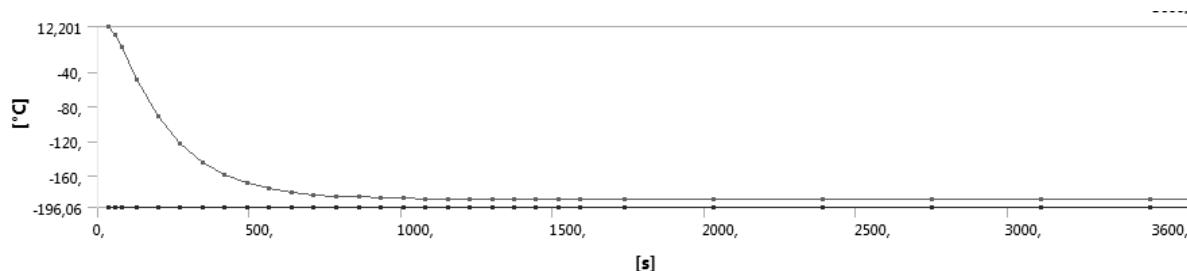


Рис. 10. Зависимость распределения температур, возникающих в датчике, при воздействии рабочей температуры минус 196 °С

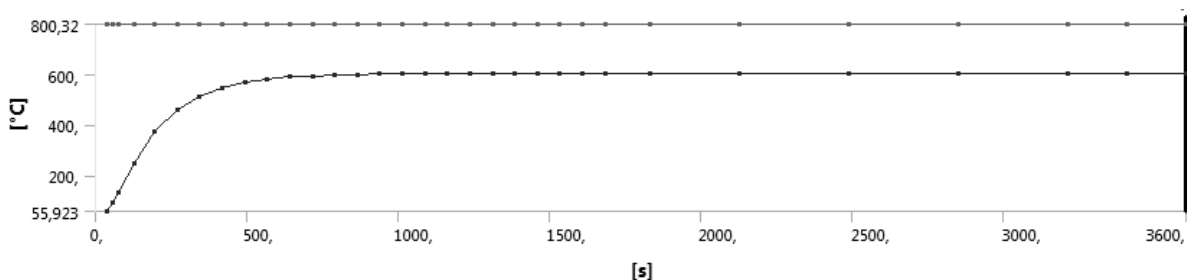


Рис. 11. Зависимость распределения температур, возникающих в датчике, при воздействии рабочей температуры 800 °С

Как видно из рис. 10 и 11, выравнивание температурных полей происходит в промежутках времени между 1500 и 2000 с. С данного временного интервала температуры остаются постоянными и не меняются с течением времени.

На рис. 12 изображена эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с на мембрану датчика.

На основании данных рис. 12 можно сделать вывод, что мембрана за временной интервал 6 с нагревается до температуры 300 °С. Температура на пьезоэлементах меняется в зависимости от их расположения относительно мембраны от 285 до 112 °С.

На рис. 13 изображена эпюра распределения температурных полей в датчике в интервале времени от 1 до 6 с (вдоль линии 1–2, проходящей через ось вращения).

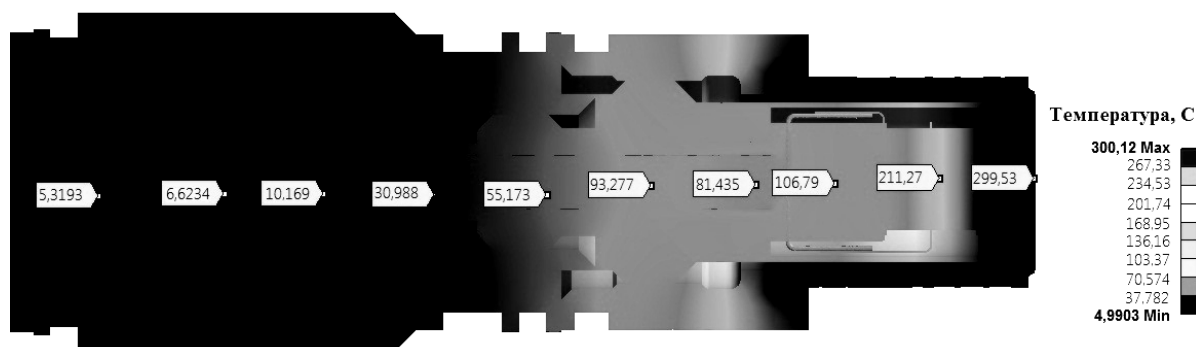


Рис. 12. Эпюра распределения температурных полей датчика при воздействии температуры 3000 °C в течение 6 с

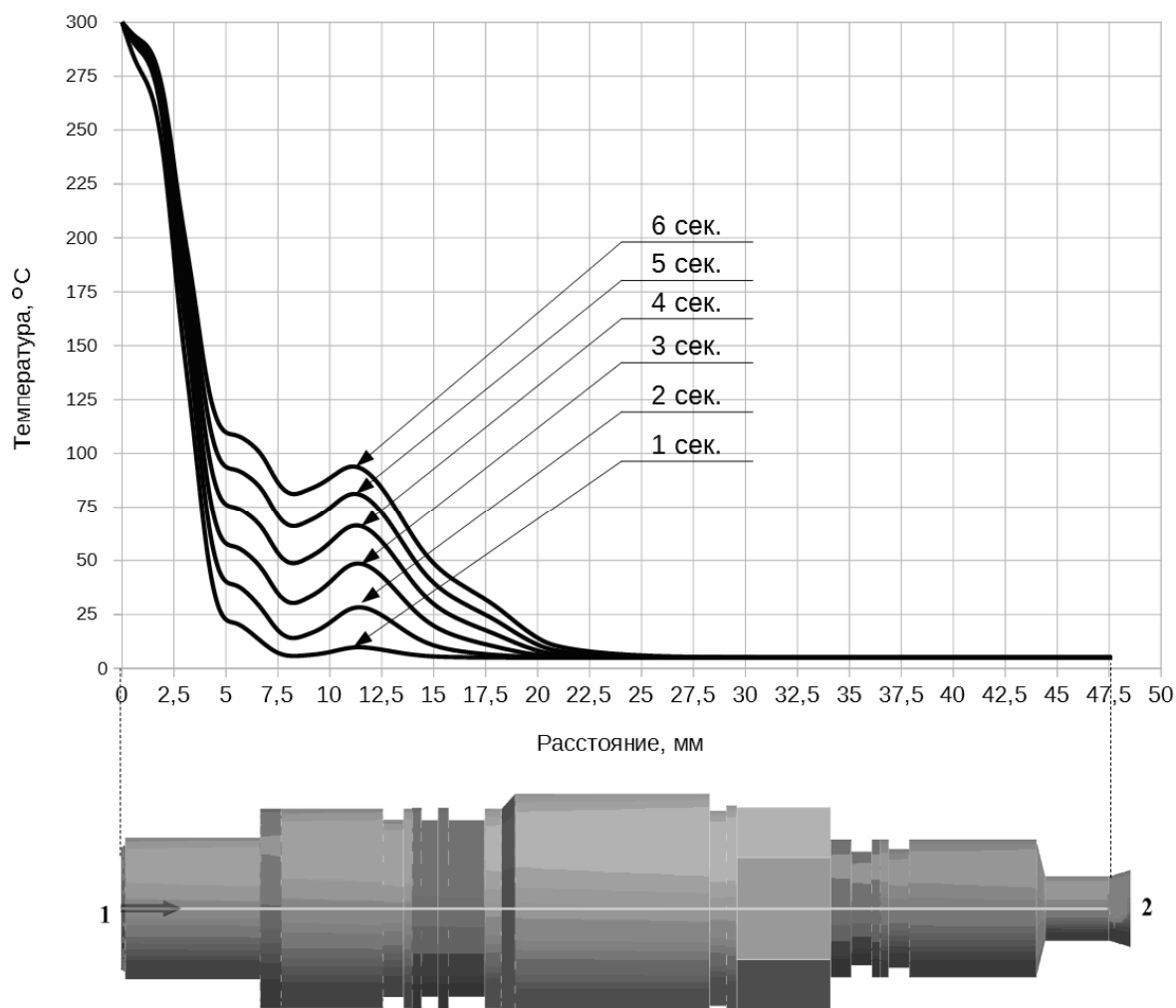


Рис. 13. Эпюра распределения температурных полей в датчике в различные промежутки времени

Проведено имитационное моделирование влияния синусоидальной вибрации 500g, результаты которого представлены в виде эпюр распределения напряжений в зависимости от плоскости воздействия.

Проведено имитационное моделирование влияния механического удара 400 g, результаты которого представлены в виде эпюр распределения напряжений в зависимости от плоскости воздействия.

Под действием механического удара 400 g длительностью 3 мс возникают напряжения, величина которых незначительна и намного меньше напряжений, возникающих под действием синусоидальной вибрации с амплитудой 500 g.

Заключение

В результате имитационного моделирования было определено влияние внешних воздействующих факторов на датчик давления, в частности:

- определены максимальные напряжения (700 МПа), возникающие при воздействии статических давлений на ПИП датчика. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа);

- определено влияние рабочих температур -196 и 800 °С. При воздействии температуры -196 °С минимальная температура в датчике в момент времени 3600 с составляет минус 186 °С; при воздействии температуры 800 °С максимальная температура составляет 603 °С. Выравнивание температурных полей происходит в промежуток времени с $1000 \div 1500$ с;

- получены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с. Максимальная температура на пьезоэлементах составляет 285 °С (минимальное значение 112 °С), температура на поверхности мембраны 300 °С;

- определены максимальные напряжения при воздействии синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения 500 g. Максимальные напряжения возникают при воздействии вибрации в направлении оси Z и составляют 140 МПа. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа);

- определены максимальные напряжения при воздействии механического удара 400 g длительностью 3 мс. Максимальные напряжения возникают при ударе в направлении оси Z и составляют 7 МПа. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа).

Проведенное имитационное моделирование подтверждает правильность заложенных конструктивных решений высокотемпературного датчика быстропеременных давлений при воздействии на него дестабилизирующих факторов, таких как резкий перепад температур, перепады давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок.

Библиографический список

1. Богущ, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богущ. – М. : Техносфера, 2014. – 316 с.
2. Мусаев, Р. Ш. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 51–55.
3. Фролов, М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа / М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2014. – № 7. – С. 22–25.
4. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
5. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
6. Керамические материалы / под ред. Г. Н. Масленниковой. – М. : Стройиздат, 1991. – 320 с.

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук, главный конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: polim@mail.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences, chief designer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук,
заместитель начальника УНЦ-37,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: umc37@mail.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences,
deputy chief of UNC-37,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Бастрыгин Кирилл Игоревич

начальник лаборатории конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

head of laboratory of design bureau,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ефимов Павел Николаевич

начальник лаборатории конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Efimov Pavel Nikolaevich

head of laboratory of design bureau,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Шуртин Андрей Эдуардович

инженер-регулирующий,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: shurikandrey@yandex.ru

Shurtin Andrey Eduardovich

engineer-adjuster,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тугускин Александр Андреевич

инженер-регулирующий,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: mr.marcel@rambler.ru

Tuguskin Aleksandr Andreevich

engineer-adjuster,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.326.773.001.63

**Имитационное моделирование высокотемпературного пьезоэлектрического датчика
быстропеременных давлений** / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, К. И. Бастрыгин, П. Н. Ефимов,
А. Э. Шуртин, А. А. Тугускин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). –
С. 59–66. DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-8.

А. Н. Миронов, Е. С. Дементьева, Э. В. Карпукхин

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ SDN-СЕТЕЙ

A. N. Mironov, E. S. Dementeva, E. V. Karpukhin

NUMERICAL CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS OF MAGNETOSTRICTIVE CONVERTERS OF LEVEL USING SDN-NETWORKS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрена задача расчета магнитных полей магнитоотрикционных уровнемеров (МУ), в частности МУ накладного или погружного типа, основанных на применении ультразвуковых волн (УЗВ) кручения, численными методами. Выявлены наиболее распространенные недостатки при проектировании МУ – невысокая точность и значительная сложность вычислений. Показан способ устранения этих недостатков путем применения SDN-сетей. **Материалы и методы.** Для этого предлагается получение математической модели магнитных полей МУ накладного или погружного типа на УЗВ кручения с помощью численного решения интегральных уравнений. Это обобщает решение задачи для любой расчетной области и обеспечивает минимальную погрешность аппроксимации. Также приводится способ повышения эффективности расчета за счет использования более сложных схем разностной аппроксимации. **Результаты.** На основании данных, представленных в статье, было проведено моделирование выходных параметров магнитного поля МУ накладного или погружного типа на УЗВ кручения с помощью ЭВМ, объединенных в SDN-сеть. **Выводы.** По результатам этого эксперимента сделаны выводы об увеличении точности расчетов и скорости сходимости численных методов. Показано, что подобный подход к расчету магнитных полей МУ позволяет снизить число необходимых итераций более чем в 1000 раз.

A b s t r a c t. Background. In this paper, we consider the problem of calculating the magnetic fields of magnetostrictive level gauges (MUs), in particular MUs of invoiced or submerged type on ultrasonic waves (TWS) of torsion, by numerical methods, and the most common and common complications – low tonalities and significant computational complexity. The way to eliminate these shortcomings of existing methods through the use of SDN-networks. **Materials and methods.** For this purpose, it is proposed to obtain a mathematical model of magnetic fields MU of an overhead or submerged type on a TWS of torsion by means of a numerical solution of integral equations. This generalizes the solution of the problem for any computational domain and provides a minimal approximation error. A method is also given to increase the efficiency of the calculation by using more complex schemes of difference approximation. **Results.** Based on the data presented in the article, the output parameters of the magnetic field MU of the invoiced or submerged type were simulated on the ultrasound torsion using a computer integrated into an SDN network. **Conclusions.** Based on the results of this experiment, conclusions are drawn about increasing the accuracy of calculations and the convergence rate of numerical methods. It is shown that such an approach to the calculation of magnetic fields of MU allows to reduce the number of necessary iterations by more than 1000 times.

К л ю ч е в ы е с л о в а: SDN-сети, магнитные поля, численные методы, математическое моделирование.

К e y w o r d s: SDN-networks, magnetic fields, numerical methods, mathematical modeling.

Введение

Задача расчета магнитных полей магнитострикционных уронемеров (МУ) часто возникает в различных отраслях производства при внедрении систем автоматизации с использованием магнитострикционных преобразователей [3–10]. Существуют известные решения [2, 5], где подобные расчеты проводятся численными методами с применением ЭВМ, но в то же время для повышения точности выходных данных и сокращения времени расчета мощности отдельных ЭВМ часто оказывается недостаточно.

Для устранения этого недостатка вычисления дальнейшего моделирования можно проводить на предприятиях, где ЭВМ объединены в вычислительные сети, в частности программно-определяемые (SDN) сети как наиболее перспективные и простые для развертывания и настройки.

Концепция SDN-сетей основательно меняет принципы функционирования сетей и их управления. В быстроменяющемся современном мире именно сети передачи данных были названы «тонким звеном», которое ограничивает рост производительности приложений по мере роста количества мобильных пользователей, масштабирования виртуальных сред, формирования кластеров для Больших Данных. В SDN-сетях задачи коммутации трафика и задачи управления строго разделены. Вся логика управления централизуется и передается **контроллеру. Коммутатор** в концепции SDN – довольно примитивное устройство, которое отвечает только за переключение пакетов на основании очень простых правил [1]. Для проведения вычислительного эксперимента может быть использована SDN-сеть, построенная на основе сети ЭВМ малой мощности. Технология SDN при этом позволит уменьшить затраты на покупку дополнительного оборудования и предельно упростить его настройку.

В данной статье будет рассмотрен способ численного расчета магнитных полей МУ с помощью метода интегральных уравнений, реализованный на основе SDN-сети, а также оценена его эффективность.

Постановка задачи

Пусть в части пространства, ограниченной замкнутой поверхностью s , магнитная проницаемость определяется функцией $\mu_i(x, y, z)$. Тогда методом введения в расчетную область вторичных источников поля можно свести среду к однородной с магнитной проницаемостью μ_e . Плотность вторичных источников магнитного поля при этом будет равна [2]

$$\rho_m = -\frac{\mu_e}{\mu_i} \overline{H_i} \operatorname{grad} \mu_i, \quad \sigma_m = 2\mu_e \lambda H_n, \quad (1)$$

где H_n – нормальная к поверхности s составляющая напряженности $\overline{H_i}$ магнитного поля, $\lambda = \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e}$.

Далее в соответствии с известными рассуждениями [2] составляется интегральное уравнение относительно размещенных на поверхности s (рис. 1) магнитных зарядов плотностью σ_m вида

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_s \frac{\sigma_m \cos(\bar{r}, \bar{n})}{r^2} ds = 2\mu_e \lambda H_{0n}, \quad (2)$$

где H_{0n} – напряженность магнитного поля вторичных источников.

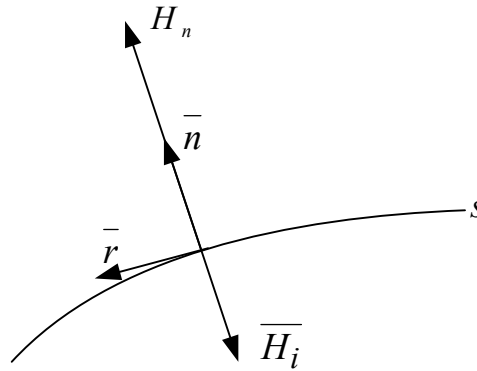


Рис. 1. Вектора напряженности магнитного поля

В рамках решаемой задачи расчета магнитного поля МУ аналитическое решение этого уравнения является нецелесообразным из-за высокой сложности, однако для этого может быть применен один из известных численных методов решения таких уравнений [2, 3], реализованный в виде программы, выполняемой в SDN-сети.

Методы испытаний

Для расчета магнитного поля, распространяемого в области V со средой, имеющей магнитную проницаемость μ_e , можно применить метод интегральных уравнений, известный своей эффективностью при решении подобных задач [3–5]. Так, в случае использования плоскопараллельного поля, подынтегральная функция в (2) примет упрощенный вид и (2) можно переписать [2]

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{\pi} \oint_l \frac{\sigma_m \cos(\bar{r}, \bar{n})}{r} dl = \frac{\lambda}{\pi} \int_s \frac{\rho_{mb} \cos(\bar{r}, \bar{n})}{r} ds, \quad (3)$$

где l – длина контура, ограниченного поверхностью s ; ρ_{mb} – объемная плотность магнитных зарядов, определяющих внешнее поле.

Для численного решения уравнения (3) можно воспользоваться, например, методом последовательных приближений [5], являющимся наиболее эффективным при реализации на ЭВМ.

В соответствии с этим методом, предполагается построение рекуррентной последовательности. Пусть имеется интегральное уравнение вида

$$y(x) - \lambda \int_a^b K(x, t) y(t) dt = f(x). \quad (4)$$

Будем искать его решение в виде ряда по степеням параметра λ [2]:

$$y(x) = f(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^n \psi_n(x). \quad (5)$$

Подставим ряд (5) в уравнение (4) и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях λ , получив тем самым рекуррентные соотношения для определения функций $\psi_n(x)$:

$$\begin{cases} \psi_1(x) = \int_a^b K(x, t) f(t) dt, \\ \psi_2(x) = \int_a^b K(x, t) \psi_1(t) dt = \int_a^b K_2(x, t) f(t) dt, \\ \psi_3(x) = \int_a^b K(x, t) \psi_2(t) dt = \int_a^b K_3(x, t) f(t) dt, \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $K_n(x, t)$ – интегрированные ядра уравнения (4), вычисляемые по формуле

$$K_n(x, t) = \int_a^b K(x, z) K_{n-1}(z, t) dz, \quad (7)$$

где $n = 2, 3, \dots$, а $K_1(x, t) \equiv K(x, t)$.

Таким образом, использование выражения (6) с коэффициентами, вычисленными по формуле (7), позволяет со сколь угодно высокой точностью получить численное решение интегрального уравнения вида (4). При реализации на ЭВМ вычисление интегралов в выражениях (6) и (7) также может осуществляться численно, например, с помощью формулы Симпсона [11].

Описанная методика была реализована в виде программ для ЭВМ, объединенных в SDN-сеть, и проведен вычислительный эксперимент расчета параметров магнитного поля МУ. Обсудим его результаты.

Рассматривая магнитное поле в пространстве объемом V , разобьем его на совокупность одинаковых кубов с длиной ребра h (рис. 2).

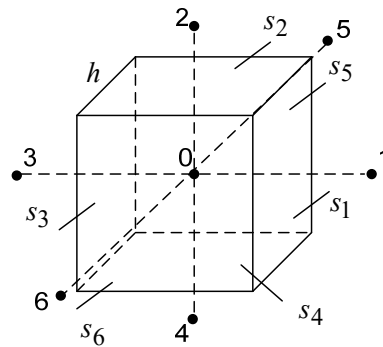


Рис. 2. Разностная аппроксимация магнитного поля в пространстве

Для формирования конечно-разностных уравнений в этом случае проинтегрируем (1) [2]:

$$\oint_s \mu \operatorname{grad} u d\bar{s} = \oint_s \mu \frac{\partial u}{\partial n} ds = -m, \quad (8)$$

где m – магнитный заряд.

Пусть магнитный заряд m размещен в центре куба (точка 0 в центре рассматриваемого куба), тогда интеграл (8) по всей поверхности куба может быть заменен суммой интегралов по всем его сторонам (поверхностям $s_1, s_2, \dots, s_6$ на рис. 2), которые имеют вид

$$\begin{cases} \oint_{s_1} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_x u ds \equiv (\mu_{1cp} h^2 + \mu_{0cp} h^2) \frac{u_1 - u_0}{h} = k_1 (u_1 - u_0), \\ \oint_{s_2} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_y u ds \equiv (\mu_{2cp} h^2 + \mu_{0cp} h^2) \frac{u_2 - u_0}{h} = k_2 (u_2 - u_0), \\ \dots \\ \oint_{s_6} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_z u ds \equiv (\mu_{6cp} h^2 + \mu_{0cp} h^2) \frac{u_6 - u_0}{h} = k_6 (u_6 - u_0). \end{cases} \quad (9)$$

Здесь величины $\mu_{0cp}, \mu_{1cp}, \dots, \mu_{6cp}$ – средние значения функции $\mu(x, y, z)$ в соответствующих кубах.

Складывая приближенные значения интегралов в (9), приходим к конечно-разностному уравнению

$$\sum_{i=1}^6 k_i u_i - u_0 \sum_{i=1}^6 k_i = -\rho_{cp} h^3, \quad (10)$$

где $\rho_{cp} = m / h^3$.

Уравнение (10) связывает потенциал u_0 узла 0 с потенциалами соседних шести узлов. Совокупность таких уравнений образует систему, которая может быть разрешена относительно неизвестных потенциалов описанной ранее методикой.

Результаты вычислительного эксперимента и их обсуждение

В ходе вычислительного эксперимента по расчету магнитных полей МУ предложенным методом был осуществлен подсчет общего числа итераций n_2 по формуле (7) для различных начальных приближений $y_0(x)$, вычисленных в соответствии с (4)–(7) при $n_1 = 1 \dots 5$. Полученная зависимость общего числа итераций n_2 от числа слагаемых n_1 начального приближения имеет вид, показанный на рис. 3.

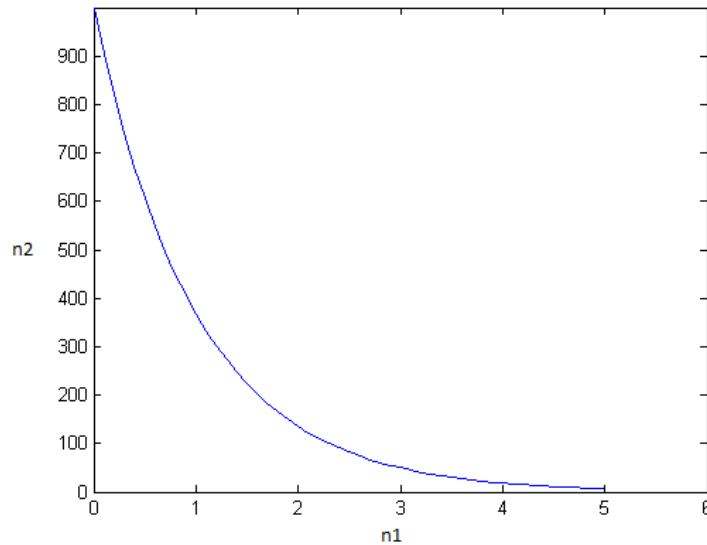


Рис. 3. Зависимость общего числа итераций n_2 от числа слагаемых n_1 начального приближения

Как видно, выбор начального приближения, содержащего всего пять слагаемых, определенных в соответствии с (4)–(7), сокращает общее число итераций почти в 1000 раз, что подтверждает эффективность метода.

При этом получены картины распределения напряженности H_x вдоль магнитоотрицательного стержня МУ (рис. 4) (здесь x – отклонение от рабочей точки на оси магнитоотрицательного стержня МУ).

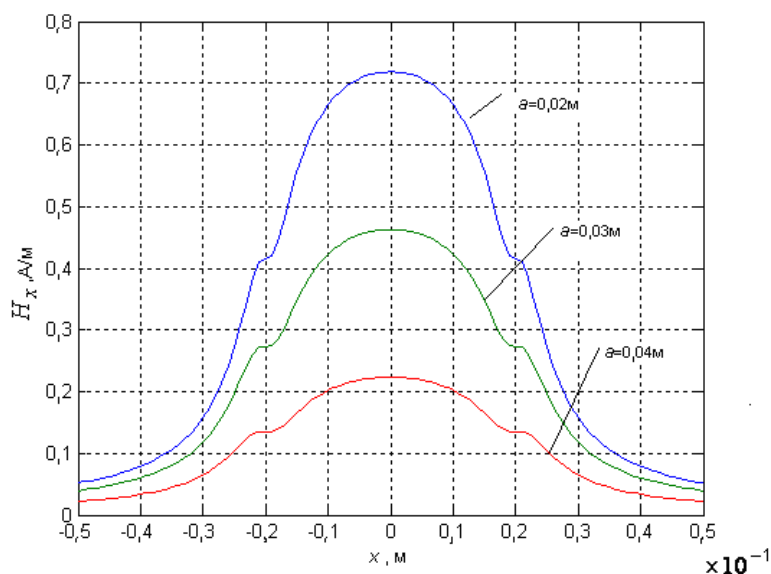


Рис. 4. Напряженность магнитного поля МУ

При расчете магнитных полей МУ с помощью SDN-сети возможно задействование разностной аппроксимации с учетом производных более высокого порядка и многоточечных разностных схем. Кроме того, этот подход позволит расширить рамки решаемой задачи и проводить моделирование магнитных полей в пространстве. На рис. 5 показаны результаты моделирования магнитного поля МУ на всем пространстве его рабочей области.

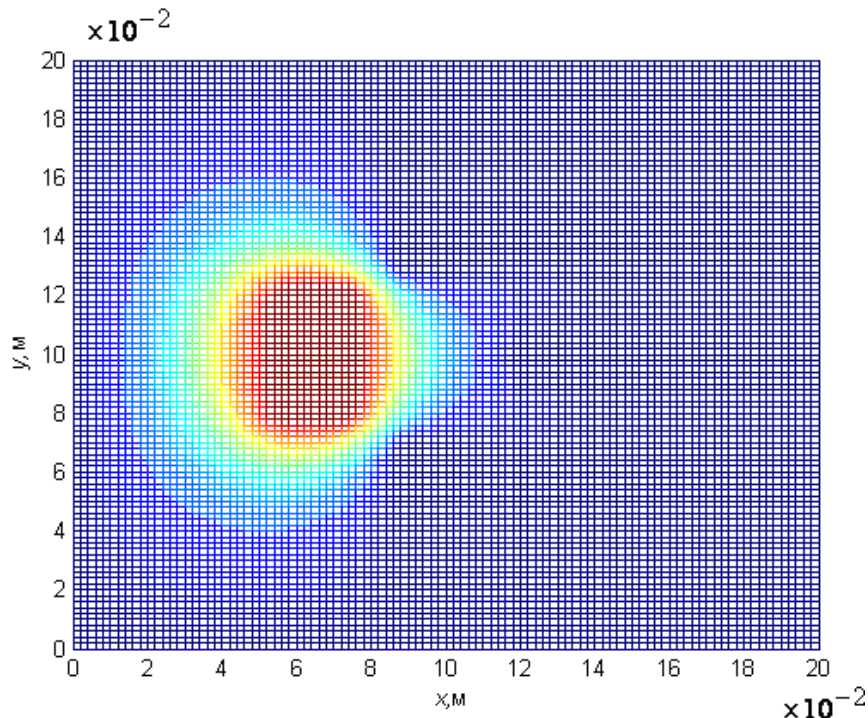


Рис. 5. Напряженность магнитного поля МУ в пространстве расчетной области

Последние результаты позволяют оценить адекватность полученных моделей магнитных полей предложенной методикой. Для этого можно воспользоваться существующими программными продуктами, предназначенными для исследования магнитных полей, например ELCUT, достоверность получаемых данных которыми доказана.

Так, для аналогичной расчетной области МУ (рис. 6), заданной в среде ELCUT, было найдено решение, графическое представление которого изображено на рис. 7.

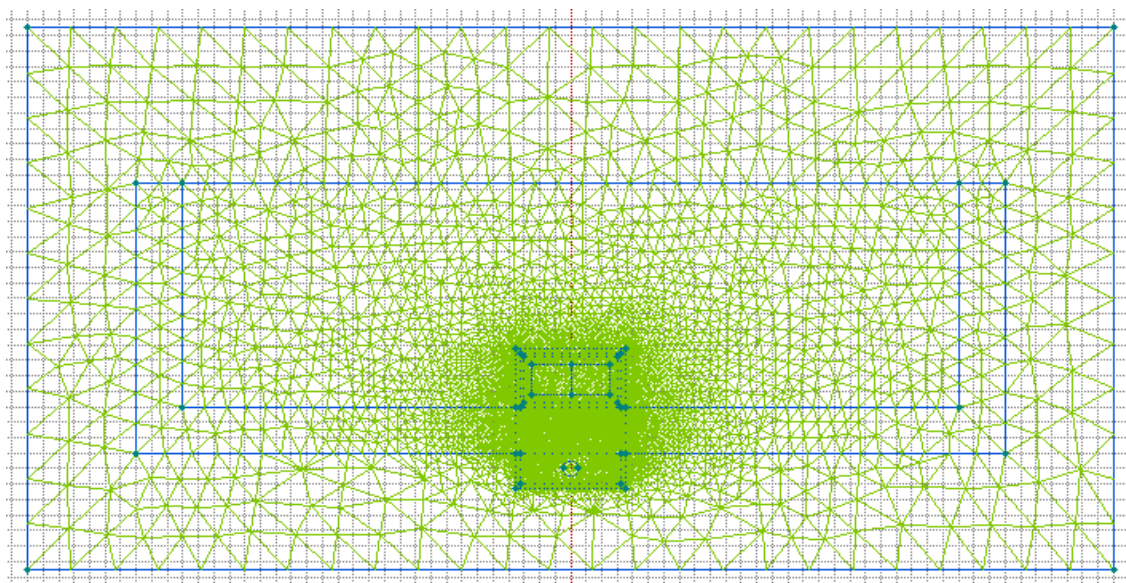


Рис. 6. Расчетная область МУ в системе ELCUT

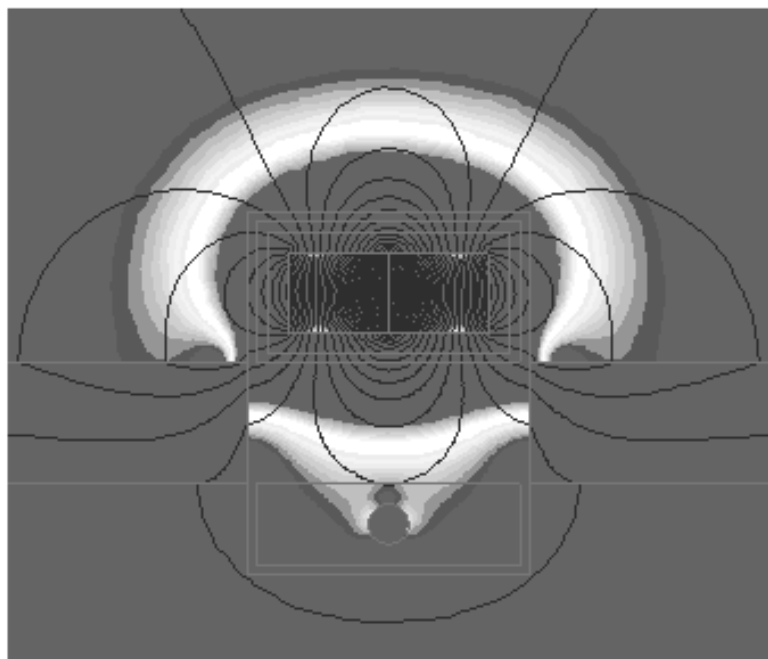


Рис. 7. Результаты моделирования магнитного поля МУ в системе ELCUT

Важным также является возможность учитывать влияние краевого и поверхностного эффекта при моделировании с помощью введения соответствующих коэффициентов при обработке полученных данных. Зависимости напряженности $H_{o,n}$ магнитного поля МУ в рабочей области с учетом влияния краевого эффекта приведены на рис. 8.

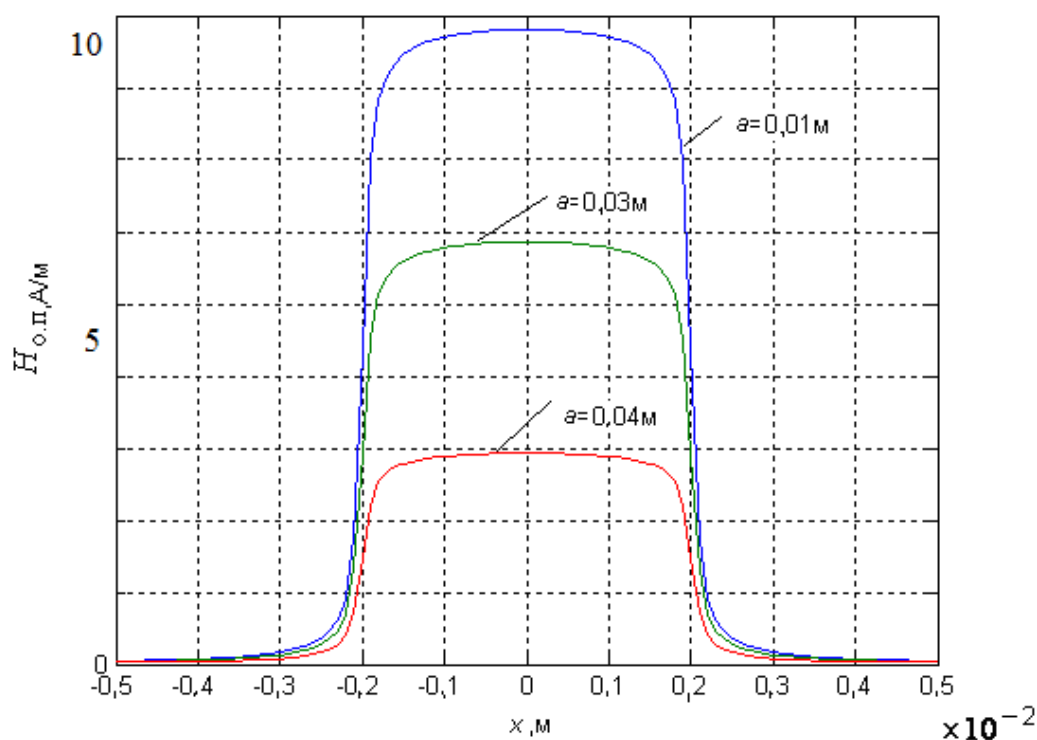


Рис. 8. Влияние краевого эффекта на напряженность магнитного поля МУ

Поверхностный эффект проявляется при формировании в среде магнитоstrictionного стержня токовых импульсов чтения или записи и также способен оказывать значительное влияние на работу МУ. Уменьшение амплитуды напряженности $H_{x,k}$ магнитного поля вследствие поверхностного эффекта показано на рис. 9.

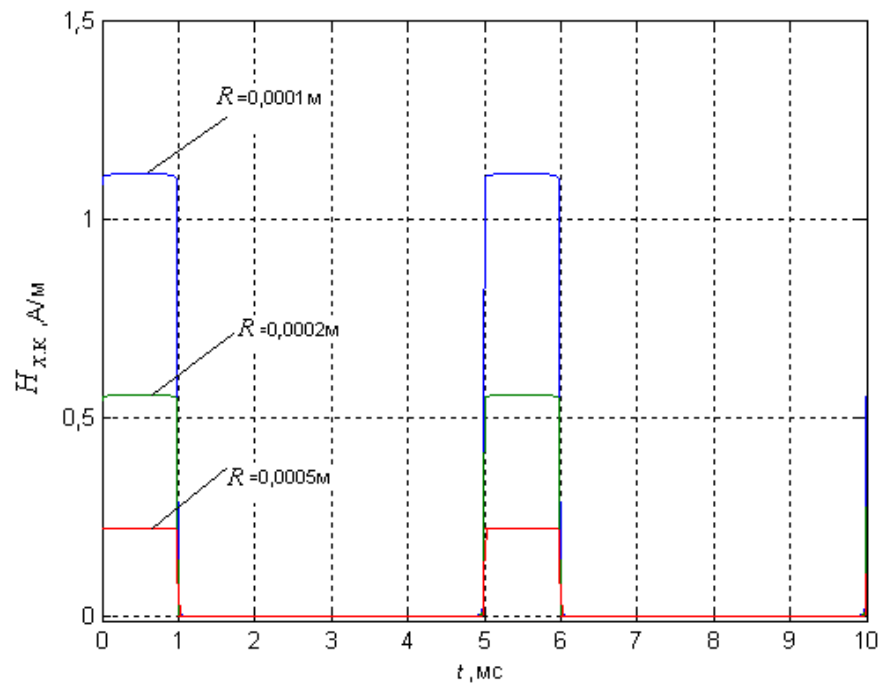


Рис. 9. Моделирование проявления поверхностного эффекта при формировании магнитного поля МУ

В результате с учетом всех полученных в ходе численного моделирования предложенной методикой данных получена пространственная картина распределения магнитного поля МУ в расчетной области, показанная на рис. 10. Анализ картины магнитного поля на рис. 5, рассчитанной ранее с помощью среды ELCUT, позволяет сделать вывод об адекватности полученных данных посредством предложенной методики.

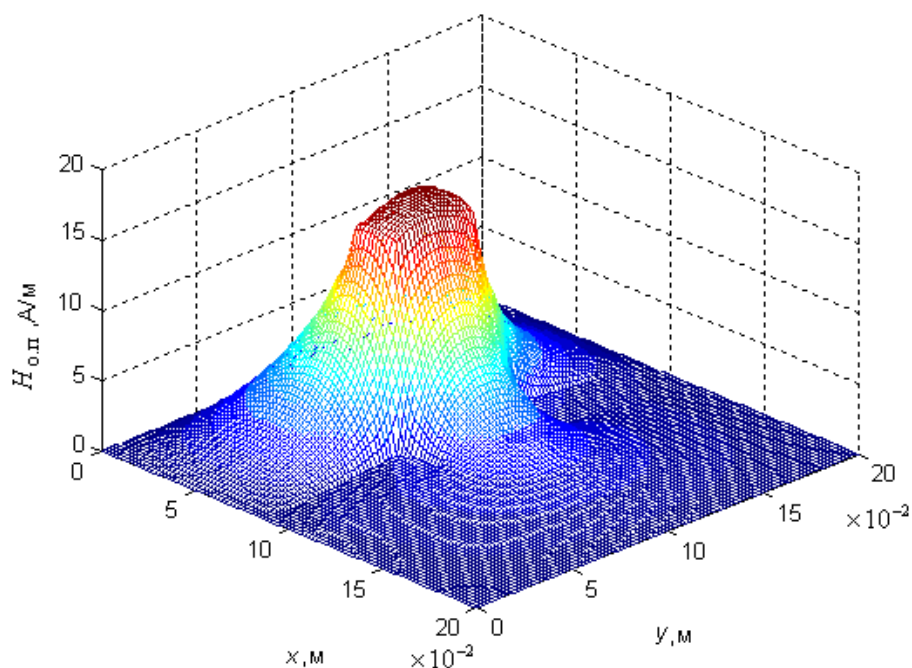


Рис. 10. Пространственная картина магнитного поля МУ

Из различных источников [3–10] известно, что исследуемые устройства обладают схожей картиной магнитного поля, однако применение вышеизложенной методики в составе SDN-сети позволяет получить ее более эффективно за счет снижения временных и вычислительных затрат.

Заключение

Таким образом, использование предложенной методики позволяет эффективно и с высокой степенью точности получить значения параметров магнитного поля МУ.

Применение SDN-сетей для проведения численных расчетов и моделирования позволит существенно повысить точность и информативность расчета магнитного поля МУ даже при том, что использование более сложных схем разностной аппроксимации усложнит вид конечно-разностных уравнений.

Библиографический список

1. Демирчян, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К. С. Демирчян, В. Л. Чечурин. – М. : Высш. шк., 1986. – 240 с.
2. Захаров, А. А. Аспекты информационной безопасности архитектуры SDN / А. А. Захаров, Е. Ф. Попов, М. М. Фучко // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 1. – С. 83–92.
3. Карпухин, Э. В. Способ повышения эффективности расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня с использованием программных комплексов / Э. В. Карпухин, Е. С. Дементьева, Ю. С. Кулькова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12, ч. 5. – С. 902–906.
4. Карпухин, Э. В. Комплекс программ для расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин, В. С. Дятков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: www.science-education.ru/117-13707 (дата обращения: 09.02.2018).
5. Карпухин, Э. В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоотрицательных уровней : монография / Э. В. Карпухин, С. Б. Демин. – Пенза : ПензГТУ, 2014. – 116 с.
6. Манжиров, А. В. Методы решения интегральных уравнений : справочник / А. В. Манжиров, А. Д. Полянин. – М. : Факториал, 1999. – 272 с.
7. Мокроусов, Д. А. К вопросу повышения точности моделирования магнитных полей магнитоотрицательных уровней накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Е. С. Демин, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин // Актуальные научные достижения – 2014 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (27–30 июня 2014 г.). – Чехия, Прага : Образование и наука, 2014. – С. 17–21.
8. Мокроусов, Д. А. Комплекс программ для расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин, В. С. Дятков // Современные проблемы науки и образования. Технические науки. – 2014. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13707> (дата обращения – 09.02.2018).
9. Мокроусов, Д. А. Повышение эффективности численных методов моделирования магнитоотрицательных уровней накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Е. С. Демин, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин // Актуальные научные достижения – 2014 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (27–30 июня 2014 г.). – Чехия, Прага : Образование и наука, 2014. – С. 13–16.
10. Мокроусов, Д. А. Применение численных методов для расчета магнитных полей в магнитоотрицательных уровнях / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, В. С. Дятков, С. Б. Демин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 102–104.
11. Немыцкий, В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений / В. В. Немыцкий, В. В. Степанов. – М.-Л. : ОГИЗ, 1947. – 448 с.

Миронов Андрей Николаевич

инженер,

Научно производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: mironovmir@yandex.ru

Mironov Andrey Nikolaevich

engineer,

Research and production enterprise "Rubin"
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Дементьева Елена Сергеевна

кандидат педагогических наук,
заведующий кафедрой физики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: demeles2013@yandex.ru

Dement'eva Elena Sergeevna

candidate of pedagogical sciences,
head of sub-department of physics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Карпухин Эдуард Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: edvar1@rambler.ru

Karpukhin Eduard Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

УДК 621.618

Миронов, А. Н.

Численный расчет магнитных полей магнитоотрицательных уровнемеров с применением SDN-сетей / А. Н. Миронов, Е. С. Дементьева, Э. В. Карпухин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 67–76. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-9.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 004.9

DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-10

А. Ю. Тычков

АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОД ЭКГ СИГНАЛОВ ПРИ ПОГРАНИЧНЫХ ПСИХИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВАХ

A. Yu. Tychkov

ANALYSIS OF EMPIRICAL MODES OF ECG SIGNAL WITH BORDER MENTAL DISORDERS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объект исследования: больные с пограничными психическими расстройствами (ППР) медицинского центра «Здоровье», у которых наблюдаются изменения функционирования сердечно-сосудистой системы. Предмет исследования: способ анализа эмпирических мод (ЭМ) электрокардиографических (ЭКГ) сигналов для диагностики ППР. Целью представленной работы является разработка способа определения конечного числа ЭМ ЭКГ сигналов при диагностировании пациентов с ППР для повышения достоверности диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. **Материалы и методы.** В качестве материалов использовались информативные параметры ЭКГ сигналов – амплитудно-временные составляющие. Для эффективной обработки ЭКГ сигналов использовался метод декомпозиции на эмпирические моды теории Гильберта – Хуанга. **Результаты.** Разработан способ определения конечного числа ЭМ ЭКГ сигналов у пациентов с ППР, использующий адаптивную обработку ЭКГ сигналов с помощью метода ДЭМ; определение конечного числа ЭМ и сравнение его с пороговым значением. Представлена блок-схема и подробное математическое описание разработанного способа. Проведено исследование способа с использованием верифицированной базы сигналов условно здоровых пациентов и пациентов с ППР. **Выводы.** Результаты исследования показали, что разработанный способ определения конечного числа ЭМ обеспечивает повышение точности определения состояния больных ППР с коэффициентом чувствительности 6,3 % и специфичности 3,1 %.

A b s t r a c t. Background. The subject of the study: patients with borderline mental disorders (BMD) of the Health Center, who experience changes in the functioning of the cardiovascular system. The subject of the study: a method for analyzing empirical modes (EM) of electrocardiographic (ECG) signals for the diagnosis of BMD. The purpose of the presented work is the development of a method for determining the final number of EM ECG signals in diagnosing patients with BMD to increase the reliability of diagnosis of cardiovascular diseases. **Materials and methods.** As the materials, the informative parameters of the ECG signals were used – the amplitude-time components. For effective processing of ECG signals, the decomposition method into empirical modes of the Hilbert-Huang theory was used. **Results.** A method for determining the final number of EM ECG signals in patients with BMD, using adaptive ECG signal processing using the Hilbert-Huang theory, has been developed; the determination of a finite number of EM and its comparison with the threshold value. A block diagram and a

detailed mathematical description of the developed method are presented. The study of the method using the formed verified signal base of conditionally healthy patients and patients with BMD was carried out. **Conclusions.** The results of the research showed that the developed method for determining the final number of EM provides an increase in the accuracy of the determination of the condition of patients with BMD with a sensitivity factor of 6.3 % and a specificity of 3.1 %.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрокардиографический сигнал, декомпозиция на эмпирические моды, пограничные психические расстройства.

Key words: ECG signal, decomposition of empirical modes, borderline mental disorders.

Введение

В России и мире сложилась крайне тревожная ситуация из-за того, что практически каждый пациент с сердечно-сосудистыми заболеваниями либо уже перенес, либо подвержен развитию психических расстройств в реабилитационный и постреабилитационный период [1]. Изменение работы сердца, в том числе в период психических расстройств, может быть зарегистрировано с использованием биологической сигнальной системы, носителем полезной информации которой является электрокардиографический сигнал (ЭКГ). Ранняя диагностика пограничных психических расстройств способна предотвратить развитие заболеваний сердца и принять меры для профилактики и лечения.

ЭКГ является сложноструктурированным сигналом, состоящим из набора информативно-значимых параметров и участков, представляющих собой *QRS* комплекс, *P*, *T* зубцы (рис. 1).

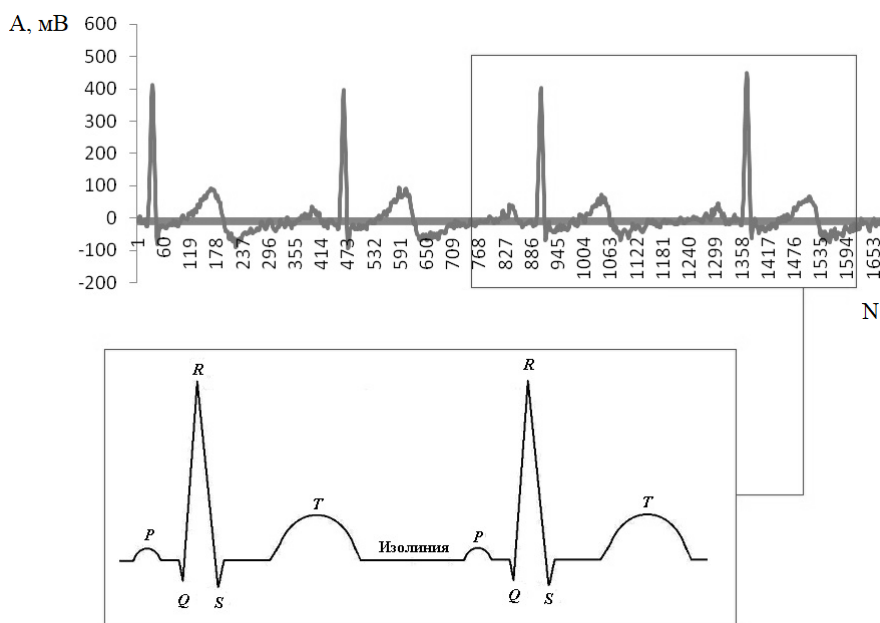


Рис. 1. Графическое изображение ЭКГ сигнала

Проблемам эффективной обработки ЭКГ сигналов для целей функциональной диагностики посвящено большое количество работ, касающихся вопросов предварительной обработки [2, 3] и анализа информативно-значимых параметров [4, 5]. От результатов обработки и анализа исследуемых сигналов зависит точность постановки диагностического заключения, в том числе в условиях наличия внешних помех и свободной двигательной активности пациента.

Применение современных методов обработки сигналов позволит вывести медицину на новый уровень развития диагностических систем [6], являющихся незаменимыми помощниками для длительного, неинвазивного и беспроводного мониторинга за состоянием здоровья человека при наличии различных психотравмирующих ситуаций.

Основной задачей исследования является разработка нового способа анализа ЭКГ сигналов с пограничными психическими расстройствами (ППР) с использованием современных

методов математической обработки и анализа медицинских сигналов для целей своевременной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Формирование базы сигналов пациентов

Для проведения исследований ЭКГ сигналов пациентов с ППР совместно с врачами на базе медицинского центра «Здоровье» (г. Пенза) сформирована база данных медицинских сигналов.

База данных ЭКГ сигналов сформирована из числа пациентов различных по гендерным (мужчина, женщина) и возрастным (у подростков, трудоспособного населения с высокой психоэмоциональной нагрузкой (военнослужащие, учителя, врачи), пожилых людей) признакам. Для формирования базы ЭКГ сигналов с ППР отобрано 95 человек, обратившихся в первый день госпитализации без медикаментозного воздействия на них.

По клиническим признакам состав отобранной группы пациентов представлен преимущественно четырьмя диагностическими категориями: F48.0 – неврастения; F45.3 – соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы; F43.2 – расстройство приспособительных реакций; F41.2 – смешанное тревожное и депрессивное расстройство.

Регистрация ЭКГ сигналов осуществлялась посредством электрокардиографа-энцефалографа-анализатора ЭЭГА-21/26 – «Энцефалон-131-03» в трех стандартных и трех усиленных отведениях и частотой дискретизации 500 Гц. Таким образом, для проведения исследований с отобранной группой пациентов зарегистрировано 580 ЭКГ сигналов.

Амплитудно-временной анализ ЭКГ сигналов

На основании проведенного обзора [7, 8] и собственных исследований [9, 10] выявлено, что у пациентов в период психотравмирующих ситуаций на ЭКГ сигнале регистрируется потеря способности стабилизации артериального давления и частоты сердечных сокращений, синусовая аритмия, бради- и тахикардия, увеличение сегмента *ST* и изменения зубца *T*. Изменения на ЭКГ сигналах могут различаться в зависимости от клинической картины и генеза заболевания каждого отдельного пациента. Варианты ЭКГ сигналов различных пациентов (пациент 1–3) с визуально выделяемыми периодами возникновения ППР в амплитудно-временной области приведены на рис. 2.

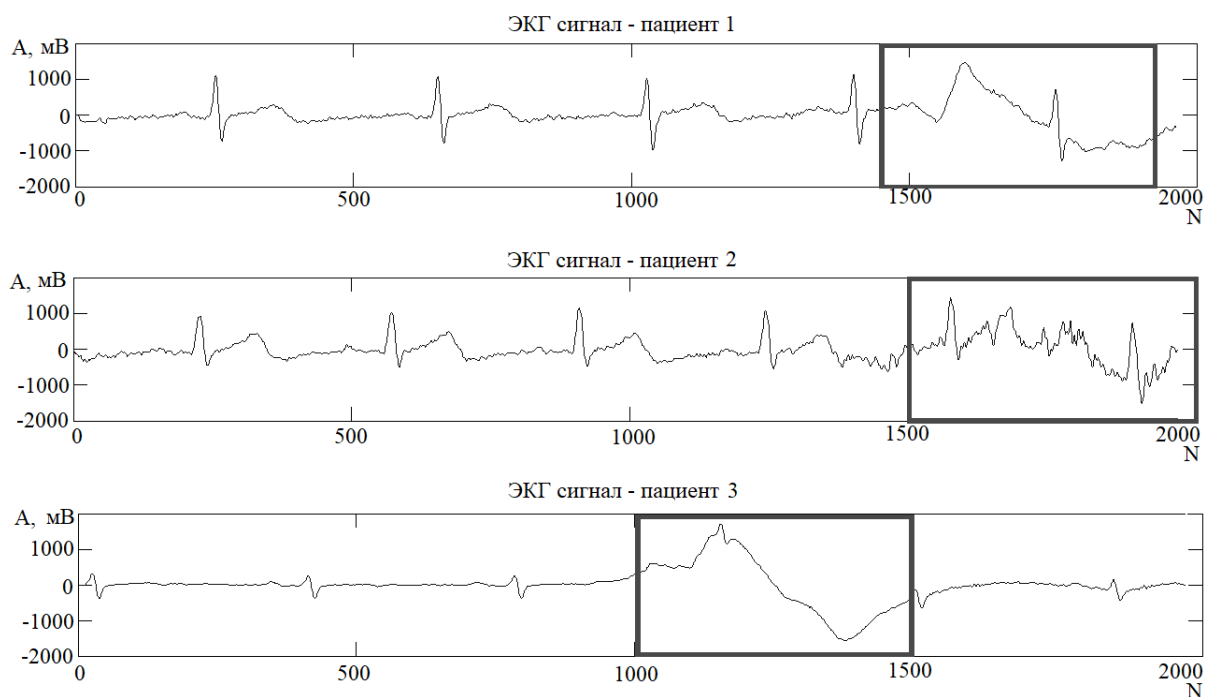


Рис. 2. ЭКГ с визуально выделяемыми периодами ППР

Проведенные исследования ЭКГ сигналов показали, что в амплитудно-временной области визуально не всегда врач способен обнаружить изменения ЭКГ сигнала с ППР (рис. 3). Это связано прежде всего с индивидуальными особенностями функционирования сердечно-сосудистой системы (пациент 4, рис. 3) и влиянием различных высокочастотных помех (пациент 5, рис. 3).

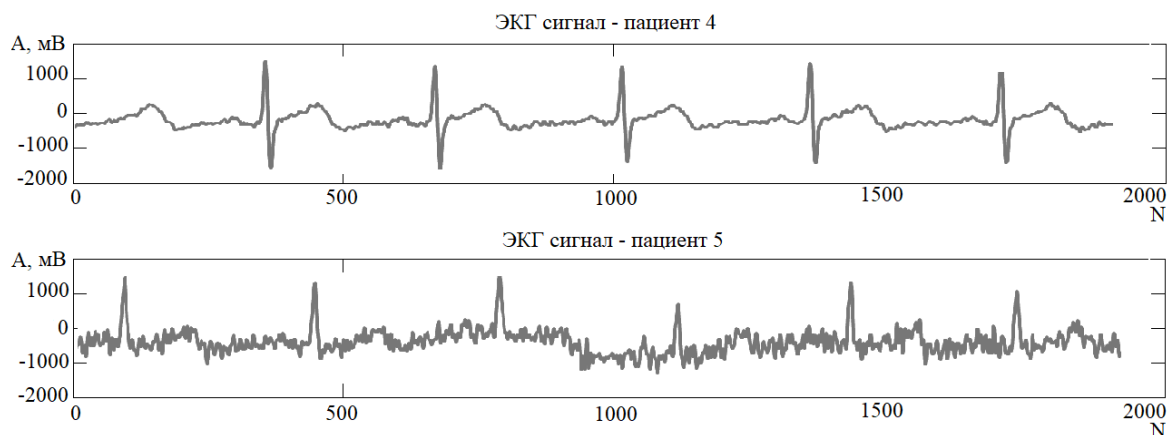


Рис. 3. ЭКГ сигналы пациентов с ППР без различимых изменений

В работах многих авторов [11, 12] подтверждается, что анализ ЭКГ сигналов в амплитудно-временной области является слабо информативным. На пациента и исследуемый сигнал могут оказывать влияние различные внешние помехи (от движения, смещения электродов, сетевая наводка и другие), которые способны исказить сигнал до неузнаваемости. Отмечается, что при обработке ЭКГ сигналов в частотно-временной области, в особенности в условиях длительного мониторингирования и автоматического анализа, можно добиться снижения уровня помех и выявить на ЭКГ сигналах новые признаки ППР, тем самым повысить достоверность диагностических заключений.

Обоснование метода обработки

Анализ известных работ [13, 14] показал, что большинство способов и алгоритмов, используемых для определения различных информативных параметров ЭКГ сигналов в частотно-временной области, основано на Фурье и вейвлет-преобразованиях.

Вейвлет-преобразование позволяет построить спектральную характеристику ЭКГ сигнала в амплитудно-временной области с заданной частотой среза. Однако в известных работах [13, 14] для ЭКГ сигналов данное решение используется в условиях наличия априорной информации об исследуемом сигнале (диагноз конкретного пациента) и присутствующих на нем помехах. Кроме того, вейвлет-преобразование по своей природе имеет определенные недостатки, в основном связанные с невозможностью построить адаптивный базис исследуемого ЭКГ сигнала и обратным восстановлением сигнала без потери его качества. Погрешность восстановления ЭКГ сигнала при использовании вейвлет-преобразования [15] может достигать 5 % и более, что является недопустимым для функциональной диагностики.

Необходимое условие эффективного определения информативных параметров ППР на ЭКГ сигналах состоит в возможности формирования адаптивного базиса, функционально зависящего от содержания самого сигнала. Данный подход реализуется теорией Гильберта – Хуанга, которая представляет собой совокупность метода декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) и спектрального анализа Гильберта. Первые работы по обработке ЭКГ сигналов опубликованы в 2002 г. [16, 17].

Суть метода ДЭМ заключается в выполнении следующих действий:

1. Определение локальных экстремумов (максимумов и минимумов) сигнала $ATC(n_i)$:
– значение i -го отсчета $x(n_i)$ является локальным максимумом, если выполняется условие $ATC(n_{i-1}) < ATC(n_i) \geq ATC(n_{i+1})$;

– значение i -го отсчета $f(t_i)$ является локальным минимумом, если выполняется условие $ATC(n_{i-1}) > ATC(n_i) \leq ATC(n_{i+1})$; где n_i – дискретные отсчеты сигнала.

2. Определение верхней $e(n_i)$ и нижней $g(n_i)$ огибающих сигнала с помощью кубической сплайн-интерполяции по найденным локальным экстремумам $ATC_j(n_i)$:

$$e(n_i) = a_{\text{в}} n_i^3 + b_{\text{в}} n_i^2 + c_{\text{в}} n_i + d_{\text{в}}; \quad (1)$$

$$g(n_i) = a_{\text{н}} n_i^3 + b_{\text{н}} n_i^2 + c_{\text{н}} n_i + d_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $a_{\text{в}}, b_{\text{в}}, c_{\text{в}}, d_{\text{в}}$ – коэффициенты для каждого значения i -го отсчета верхней огибающей сигнала; $a_{\text{н}}, b_{\text{н}}, c_{\text{н}}, d_{\text{н}}$ – коэффициенты для каждого значения i -го отсчета нижних огибающих сигнала.

3. Вычисление среднего значения огибающих сигнала в соответствии с выражением

$$h(n_i) = \frac{e(n_i) + g(n_i)}{2}, \quad (3)$$

где $h(n_i)$ – среднее значение огибающих сигнала; $e(n_i)$ и $g(n_i)$ – верхняя и нижняя огибающая исходных сигнала соответственно.

4. Вычисление конечной огибающей сигнала по формуле

$$r(n_i) = ATC(n_i) - h(n_i), \quad (4)$$

где $r(n_i)$ – конечная огибающая сигнала.

5. Вычисление значения критерия останова. В качестве критерия останова декомпозиции используется значение нормализованной квадратичной разности, определяемое как

$$SD = \sum_{i=1}^m \left[\frac{(|ATC_j(n_i) - r(n_i)|)^2}{ATC_j(n_i)^2} \right]. \quad (5)$$

6. Проверка условия останова. На этом этапе осуществляется сравнение значения конечной огибающей сигнала со значением нормализованной квадратичной разности. Если:

- $SD > r(n_i)$, то переходят к выполнению действия 1;
- $SD < r(n_i)$ и $h(n_i) > r(n_i)$, то переходят к завершению работы метода.

По результатам разложения ЭКГ сигнал может быть представлен как сумма амплитудно-временных составляющих $ATC(n)$ и конечной огибающей сигнала $r(n)$:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I ATC_i(n) + r(n), \quad (6)$$

где $ATC_i(n)$ – эмпирические моды ЭКГ сигнала (ЭМ); $r(n)$ – конечная огибающая сигнала; n – дискретный отсчет ($0 < n \leq N$, N – число дискретных отсчетов в ЭКГ сигнале); $i = 1, 2, \dots, I$ – номер ATC сигнала.

Проведенный анализ известных работ по обработке и анализу ЭКГ сигналов с использованием теории Гальберта – Хуанга и собственных исследований [18–20] показал, что ДЭМ является перспективным методом, нашедшем свое применение в решении различных задач подавления помех и обнаружения информативно-значимых параметров ЭКГ сигналов с целью повышения достоверности диагностических заключений сердечно-сосудистых заболеваний.

Разработка и исследование способа анализа ЭКГ сигналов

С использованием метода ДЭМ разработан новый способ анализа эмпирических мод ЭКГ сигнала при диагностировании больных ППР. Блок-схема способа приведена на рис. 4.

Ввод ЭКГ сигнала (блок 1, 2, рис. 4) осуществлялся путем регистрации сигналов пациентов с ППР. Для проведения адекватных исследований дополнительно зарегистрирована база данных эталонных ЭКГ сигналов условно здоровых пациентов в количестве 95 человек.

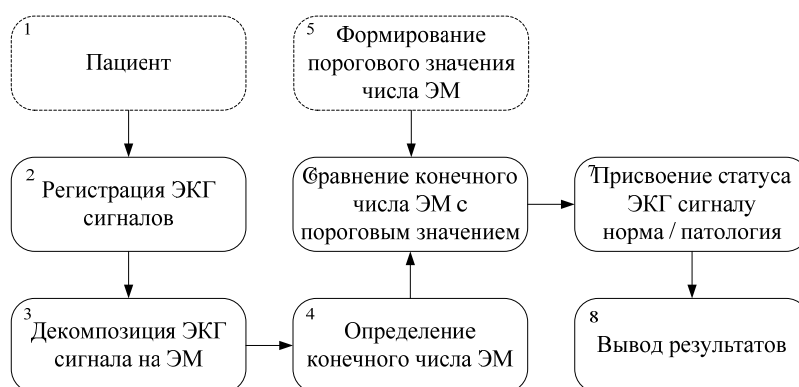


Рис. 4. Блок-схема способа анализа эмпирических мод ЭКГ сигналов

Реализация и исследование способа осуществлялись в среде программирования *R* и математического моделирования *Matlab* с поддержкой *RStudio Desktop* и пакетом программ *decomposedPSF*.

Декомпозиция ЭКГ сигнала (рис. 4, блок 3) на ЭМ осуществлялась согласно выражениям 1–6. По результатам декомпозиции формируется набор эмпирических мод – амплитудно-временных составляющих сигнала с различной частотой среза. На рис. 5 приведены примеры декомпозиции ЭКГ сигналов пациентов с ППР (рис. 5,а) и условно здоровых пациентов (рис. 5,б).

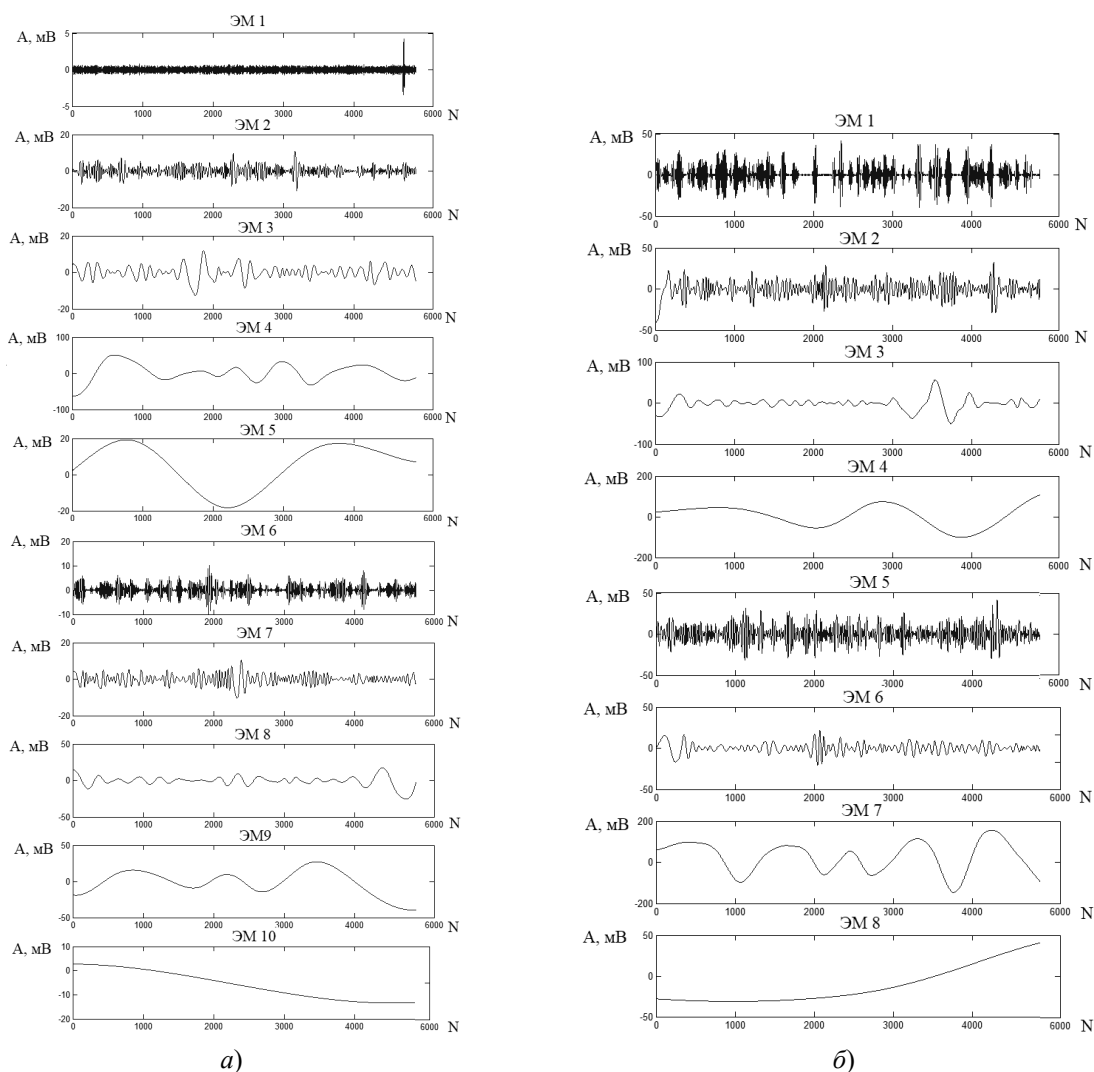


Рис. 5. Декомпозиция ЭКГ сигнала на ЭМ: а – ЭМ ЭКГ сигнала пациента с ППР; б – ЭМ ЭКГ сигнала условно здорового пациента

Исследование ЭМ ЭКГ сигналов выявили корреляционную зависимость количества ЭМ ЭКГ сигналов пациентов с ППР и условно здоровых пациентов.

В табл. 1 приведены результаты вычисления количества ЭМ ЭКГ сигналов обеих групп пациентов в трех стандартных и трех усиленных отведениях.

Таблица 1

Зависимость количества ЭМ ЭКГ сигналов различных пациентов

Номер	Число ЭМ ЭКГ сигналов пациентов с ППР в различных отведениях						Число ЭМ ЭКГ сигналов условно здоровых пациентов в различных отведениях					
	1 ст.	2 ст.	3 ст.	1 усил.	2 усил.	3 усил.	1 ст.	2 ст.	3 ст.	1 усил.	2 усил.	3 усил.
1	10	11	9	13	12	13	8	9	7	10	9	8
2	12	13	11	11	10	9	7	8	9	9	8	9
3	11	12	10	12	12	11	8	9	9	8	9	8
...												
94	11	10	13	9	11	12	8	7	9	10	8	7
95	10	12	11	12	9	10	10	9	8	8	9	7

Проведенные исследования показали, что в 89 случаях из 95 на ЭКГ сигналах пациентов с ППР во всех отведениях (три стандартных и три усиленных) количество мод варьируется от 10 до 12 ЭМ и только в четырех случаях количество мод равняется 9 и в трех случаях – 13 ЭМ. Для ЭКГ сигналов условно здоровых пациентов в 92 случаях из 95 количество мод варьируется от 7 до 9 ЭМ и только в трех случаях количество мод равно 10.

На рис. 6 приведена гистограмма распределения числа ЭМ у пациентов разных групп: черным цветом – ЭКГ сигналы условно здоровых пациентов; белым цветом – ЭКГ сигналы пациентов с ППР.

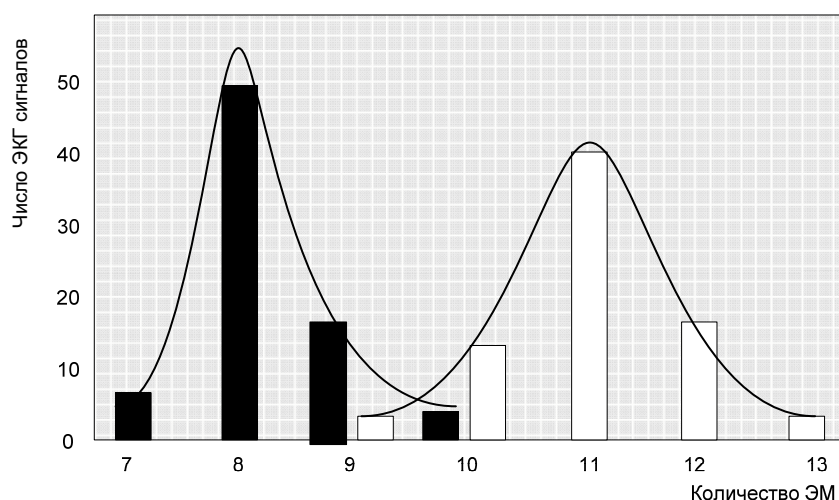


Рис. 6. Гистограмма распределения числа ЭМ у пациентов разных групп

Как видно из рис. 6, закон распределения числа ЭМ у пациентов обеих групп – нормальный. Некоторые выбросы ЭМ у пациентов обеих групп могут быть связаны с помехами, регистрируемыми на ЭКГ сигналах в результате смещения электродов и помех от движения. В предыдущих исследованиях автора [20] показано, что количество ЭМ полученных в результате разложения ЭКГ сигнала находится в линейной зависимости от длительности времени или количества отсчетов самого сигнала, наличия помех различного вида и их интенсивности. Следовательно, чем интенсивнее помеха на ЭКГ сигнале, тем количество ЭМ сигнала будет больше.

Для подтверждения результатов исследования предложено использовать критерии:

– чувствительность (%) – доля ЭКГ сигналов с ППР, от общего количества исследуемых сигналов, рассчитанная с помощью выражения

$$Se = (a/(a-b)) \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где a – общее число ЭКГ сигналов; b – число правильно обнаруженных сигналов с ППР;

– специфичность (%) – доля ЭКГ сигналов условно здоровых пациентов, от общего количества исследуемых сигналов, рассчитанная с помощью выражения

$$Sp = (a / (c - d)) \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где c – общее число ЭКГ сигналов условно здоровых пациентов; d – число правильно обнаруженных сигналов условно здоровых пациентов.

В табл. 2 приведены результаты исследований определения признаков ППР на ЭКГ сигналах.

Таблица 2

Результаты исследований

Состояние	Результат определения		Коэффициенты Se и Sp , %	
	Наличие признаков	Отсутствие признаков		
Здоровая группа	95 чел.	6 чел.	Se	6,3
Группа с ППР	3 чел.	95 чел.	Sp	3,1

Таким образом, результаты исследования предложенного способа анализа ЭМ ЭКГ сигналов при ППР показали, что чувствительность способа составляет 6,3 %, а чувствительность 3,1 %.

Разработанный способ может быть успешно использован в диагностических системах обнаружения пограничных психических расстройств и внедрен в клиническую практику врачей.

Заключение

В статье предложен способ анализа ЭМ ЭКГ сигналов с целью определения у пациентов наличия ППР путем применения современного математического метода – декомпозиция на эмпирические моды. Суть способа заключалась в адаптивной обработке ЭКГ сигналов с помощью метода ДЭМ; определении конечного числа ЭМ и сравнении его с пороговым значением. В соответствии с результатами исследования разработанный способ обеспечивает повышение точности определения ППР с коэффициентом чувствительности 6,3 % и специфичности 3,1 %.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (мероприятие «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными, номер проекта 17-71-20029).

Библиографический список

1. Ушаков, Г. К. Пограничные нервно-психические расстройства / Г. К. Ушаков. – М. : Медицина, 1987. – 304 с.
2. Sornmo, L. Time-Varying Digital Filtering of ECG Baseline Wander / L. Sornmo // Medical and Biological Engineering and Computing. – 1993. – № 31. – P. 503–508.
3. Бодин, О. Н. Новая технология подавления помех в электрокардосигналах / О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, Л. Ю. Кривоногов // Вестник кибернетики. – 2017. – № 4 (28). – С. 122–130.
4. Agrafioti, F. ECG in Biometric Recognition: Time Dependency and Application Challenges / F. Agrafioti ; Ph.D. Dissertation. – University of Toronto, 2011. – 172 p.
5. Каплан, А. Я. Вариабельность ритма сердца и характер обратной связи по результату операторской деятельности у человека / А. Я. Каплан // Журнал высшей нервной деятельности. – 1999. – № 48. – С. 345–350.
6. Kuzmin, A. Device and software for mobile heart monitoring / A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin // Proceedings of the 19th Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2017. – С. 121–127.
7. Purushothaman, S. Study of ECG changes and its relation to mortality in cases of cerebrovascular accidents / S. Purushothaman, D. Salmani // SciBiol Med. – 2014. – № 5. – P. 434–436.
8. Olbrish, S. EEG biomarkers in major depressive disorder: Discriminative power and prediction of treatment response / S. Olbrish // International Review of Psychiatry. – 2013. – Vol. 25 (5). – P. 604–618.
9. Тычков, А. Ю. Анализ и оценка сигнальных систем диагностики / А. Ю. Тычков, А. В. Агейкин, А. К. Алимуратов // Биотехносфера. – 2017. – № 1. – С. 24–28.

10. *Агейкин, А. В.* Патофизиологические особенности механизмов развития дисбаланса системы мозг-сердце при пограничных психических расстройствах / А. В. Агейкин, Е. В. Колесова // Психическое здоровье. – 2017. – № 12. – С. 40–44.
11. *Zhuang, X.* Evaluation of Human Sense by Biological Information Analysis / X. Zhuang, K. Sekiyama, T. Fukuda // International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science. – Nagoya, Japan, 2009. – P. 74–80.
12. US Patent 11/376603. Automated analysis of a cardiac signal based on dynamical characteristics of the cardiac signal / Korzinov L. – 06.01.2010.
13. US Patent 10/984200. Method and apparatus for electro-biometric identity recognition / Lange D. – 30.03.2010.
14. *Тычков, А. Ю.* Перспективы применения преобразования Гильберта – Хуанга для автоматизированной обработки электрокардиосигналов / А. Ю. Тычков, Л. Ю. Кривоногов // Биотехносфера. – 2011. – № 1. – С. 73–81.
15. *Huang, N.* The Hilbert – Huang transform and its applications / N. Huang // World scientific publishing. – 2005. – № 5. – P. 526.
16. *Huang, N.* An Introduction to Hilbert – Huang transform: a plea for adaptive data analysis / N. Huang // Research center for adaptive data analysis. – 2007. – Vol. 1, № 1. – P. 257.
17. *Benitez, D.* The use of Hilbert Transform in ECG Signal Analysis / D. Benitez // Computers in Biology and Medicine. – 2002. – № 31 (5). – P. 399–406.
18. *Blanco-Velasco, M.* ECG signal denoising and baseline wander correction based on the empirical mode decomposition / M. Blanco-Velasco, B. Weng // Computers in Biology and Medicine. – 2008. – № 38 (1). – P. 272–277.
19. *Тычков, А. Ю.* Применение теории Гильберта-Хуанга в задачах обработки кардиографической информации : монография / А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, А. В. Кузьмин ; под общ. ред. Чуракова П. П. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 150 с.
20. *Kuzmin, A. V.* Development of effective noise biomedical signals processing method / A. V. Kuzmin, A. Y. Tychkov, A. K. Alimuradov // International journal of applied engineering research. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 8527–8531.

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук,
заместитель директора научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Alexander Yuryevich

candidate of technical sciences,
deputy director of the research institute
for basic and applied studies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.9

Тычков, А. Ю.

Анализ эмпирических мод экг сигналов при пограничных психических расстройствах /
А. Ю. Тычков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 77–85. –
DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-10.

Г. К. Бердибаева, О. Н. Бодин, Д. С. Фирсов

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВУКОВ АСТМАТИЧЕСКОГО ДЫХАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

G. K. Berdibaeva, O. N. Bodin, D. S. Firsov

CLASSIFICATION OF SOUNDS OF ASTHMATIC BREATHING USING NEURAL NETWORKS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются респираторные звуки астматических пациентов и здоровых лиц. Предметом исследования является анализ звуковых сегментов респираторных звуков с использованием дискретного вейвлет-преобразования (DWT) и вейвлет-пакетного преобразования (WPT). Целью работы является классификация звуковых сигналов дыхания нормального и астматического состояний с помощью использования искусственной нейронной сети (ANN). **Материалы и методы.** Изложены алгоритм последовательной обработки сигнала через банк фильтров с учетом психоакустической природы слуха и результаты классификации полученных векторов-признаков с помощью аппарата искусственных нейронных сетей. **Результаты.** Нормальные и астматические звуковые сигналы дыхания делятся на сегменты, которые включают в себя один цикл дыхания как вдох и выдох. Анализ этих звуковых сегментов осуществляется с использованием как дискретного вейвлет-преобразования (DWT), так и вейвлет-пакетного преобразования (WPT). Каждый сегмент звука разбивается на частотные поддиапазоны с использованием DWT и WPT. Функциональные векторы создаются путем извлечения статистических признаков из поддиапазонов. Результаты классификации DWT и WPT сравниваются друг с другом с точки зрения точности классификации. **Выводы.** Дыхательный анализ звука с использованием методов обработки сигналов имеет важное значение для диагностики заболеваний легких, таких как астма. Существует много исследований по анализу дыхательных звуков. В этих исследованиях показано, что нейронные сети дают высокий коэффициент успеха. Таким образом, мы используем методы анализа DWT, WPT и классификатор ANN для анализа наших звуков дыхания. Мы сравниваем эти методы анализа с точки зрения точности классификации. Как видно из итогов, DWT немного лучше, чем WPT в нашем исследовании. Полученные результаты весьма перспективны для выявления болезни астмы.

A b s t r a c t. Background. The subject of the study are the respiratory sounds of asthmatic patients and healthy individuals. The subject of the study is the analysis of sound segments of respiratory sounds using discrete wavelet transform (DWT) and wavelet-packet transformation (WPT). The aim of the work is to classify the sound signals of normal breathing and, correspondingly, to the level of asthmatic diseases (mild asthma, moderate asthma and severe asthma) using an artificial neural network (ANN). **Materials and methods.** The algorithm of sequential processing of a signal through a filter bank is described, taking into account the psychoacoustic nature of the hearing and the results of classification of the derived attribute vectors using the apparatus of artificial neural networks. **Results.** Normal and asthmatic sound signals of respiration are divided into segments, which include one cycle of breathing as inhalation and exhalation. Analysis of these sound segments is carried out using both a discrete wavelet transform (DWT) and wavelet-packet transformation (WPT). Each audio segment is divided into frequency subbands using DWT and WPT. Functional vectors are created by extracting statistical characteristics from subbands. The results of the classification of DWT and WPT are

compared with each other in terms of classification accuracy. **Conclusions.** Respiratory sound analysis using signal processing techniques is important for the diagnosis of lung diseases such as asthma. There are many studies on the analysis of respiratory sounds. In these studies, it is shown that neural networks give a high success rate. Thus, we use DWT analysis methods, WPT and ANN classifier to analyze our breathing sounds. We compare these methods of analysis in terms of the accuracy of classification. As a result, as can be seen from the results, the DWT is slightly better than the WPT in our study. The results obtained are very promising for the detection of asthma.

К л ю ч е в ы е с л о в а: респираторные звуки, сегменты, дискретное вейвлет-преобразование, вейвлет-пакетное преобразование, искусственная нейронная сеть.

Key words: terms-respiratory sounds, discrete wavelet transform, wavelet packet transform, artificial neural network.

Введение

При рассмотрении классической схемы «наука–технологии–практические системы» [1] важно определить условия работы практической системы автоматического распознавания звуков. На данный момент время в среде «речевиков» (и «неречевиков» также) сложилось четкое мнение, что конечной целью является создание именно «фонетической печатающей машинки», а глобально-универсальные методы решения всех речевых проблем есть скрытые Марковские модели (НММ), практически решаемые методами нейронных сетей.

Нелинейные свойства слуха

Человеческая слуховая система не интерпретирует звук линейным образом. Человеческая интерпретация высоты тона с частотой в некоторых случаях может быть нежелательной особенностью. Чтобы это компенсировать, была создана меловая шкала в процессе экспериментов с интерпретацией звука для ушей человека в 1940-х гг. Единственная цель экспериментов заключалась в том, чтобы описать человеческую слуховую систему в линейном масштабе. Эксперимент показал, что высота тона линейно воспринимается в диапазоне частот 0–1000 Гц. Выше 1000 Гц масштаб становится логарифмическим. Примерная формула, широко используемая для мел-масштаба, показано ниже:

$$F_{mel} = \frac{1000}{\log 2} \left[1 + \frac{F_{Hz}}{1000} \right], \quad (1)$$

где F_{mel} – результирующая частота на меловой шкале, измеренной в мелах, а F_{Hz} – нормальная частота, измеренная в Гц. Это показано на рис. 1.

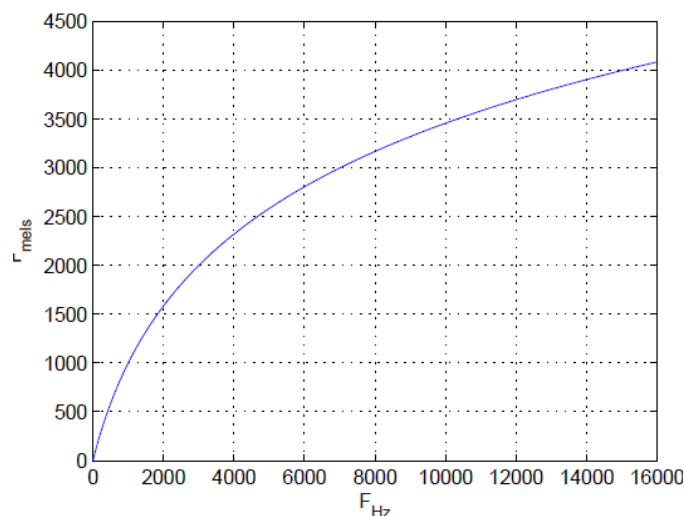


Рис. 1. Связь между шкалой частоты и мелом

Значения высоты отложены в специальных единицах – мелах. Один мел равен ощущаемой высоте звука частотой 1000 Гц при уровне 40 дБ (иногда для оценки высоты тона используется другая единица, барк = 100 мел). Как видно из рис. 1, эта связь нелинейна – при увеличении частоты, например в три раза (от 1000 до 3000 Гц), высота повышается только в два раза (от 1000 до 2000 мел) [2]. Если высоту тона в мелах обозначить m , то на основе многих экспериментов зависимость тона от частоты f в герцах можно представить в виде [3]

$$m = 1127,01048 \log \left(1 + \frac{f}{700} \right). \quad (2)$$

При применении меловой шкалы коэффициенты сосредоточены на более низких частотах.

Нейронные сети как слуховые рецепторы

Аппарат искусственных нейронных сетей есть очень удобный инструмент для создания модели рецепторов распознавания акустических волн нейронами-рецепторами, располагающимися в слуховом органе [4]. Резко возросшие возможности компьютерной вычислительной техники дают расширенные возможности для таких моделирований [5].

Исходная модель слуховой системы представлена из линейки 24 критических полосок (частотных групп) и нейронной сети для классифицирования отдельных сегментов человеческой речи. Для реализации способности нейронной сети к классифицированию нужно дать формулировку классификации языка речи, другими словами, сформировать то, что нужно классифицировать. Важно также создание обучающего словаря в виде набора образцов классификации для первичного обучения нейронной сети.

В последнее десятилетие с появлением компьютерных методов обработки данных исследователи попытались параметризовать легочные звуки с целью сделать аускультацию более объективным и ценным диагностическим инструментом [3]. В течение последних двух десятилетий многие исследования проводились в режиме компьютерного анализа дыхательного звука [6]. Большая часть этих исследований включают в себя сбор, фильтрацию, извлечение признаков, спектральный анализ и классификацию дыхательных звуков.

В литературе часто используются для исследования дыхательных звуков методы частотного анализа (Фурье-методы, параметрические методы, вейвлет-преобразования) [7, 8]. Для классификации этих звуков используются алгоритмы машинного обучения, такие как искусственные нейронные сети, метод ближайшего соседа и некоторые другие [9, 10].

Эксперимент и результаты

В этом исследовании астматический и нормальный респираторный звуковой сигнал регистрируется у пациентов с астмой в разной степени. Позже сигналы разделяются как звуковые сигналы при вдохе и выдохе. Таким образом, каждый сегмент содержит равное количество дыхательных циклов как одна фаза вдоха или выдоха. Каждый звуковой сегмент оценивается и обрабатывается как отдельный шаблон.

Далее сегменты звука разбиваются на поддиапазоны с использованием дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и пакетного вейвлет-преобразования (ПВП) [7] для создания векторной характеристики звуков.

Искусственные нейронные сети (ИНС) используются для классификации нормального и болезненного уровня астмы. Процесс классификации проводится отдельно для правого легкого и левого легкого, а также для вдыхательных и выдыхательных сегментов звукового сигнала.

В этом исследовании векторы признаков создаются с использованием ДВП, ПВП и последующих статистических обработок. Процесс определения выполняется с помощью этих векторных признаков. Производительность как ДВП, так и ПВП в качестве методов извлечения признаков сравнивается с точки зрения точности определения. В табл. 1 показано, что для определения используются проценты точности определения для нормального и трех различных астматических классов (мягкая астма, умеренная астма, тяжелая астма), когда DWT используется для извлечения признаков и ИНС. Процентное соотношение представлено в табл. 2 с использованием ПВП и ИНС.

Таблица 1

Точности определения нормальных и трех различных астматических классов с использованием ДВП и ИНС

Легкие	Точность определения, %	
	ДВП	
	Вдох	Выдох
Правое легкое	91,67	76,67
Левое легкое	90,00	86,67

Таблица 2

Точности определения нормальных и трех различных астматических классов с использованием ИНС

Легкие	Точность определения, %	
	ПВП	
	Вдох	Выдох
Правое легкое	90,00	80,00
Левое легкое	88,33	81,90

Результаты (см. табл. 1, 2) показывают, что методы ДВП, ПВП и классификатор ИНС дают многообещающие результаты для выявления болезни астмы. Точность правильного определения для методов ДВП и ПВП довольно высока при анализе ингаляционных звуков. Как видно из табл. 1, 2, по сравнению с ПВП, ДВП имеет несколько более высокую производительность, за исключением фазы основного базального выдоха. Однако если из дерева ПВП получены разные поддиапазоны, тогда точность определения может быть выше при анализе звуков дыхания с использованием ПВП. Даже в этом случае ДВП более эффективный, чем ПВП, с точки зрения обработки нагрузки и вычислительного времени. Поэтому ДВП используется чаще для анализа дыхательных звуков.

Заключение

Дыхательный анализ звука с использованием методов обработки сигналов имеет важное значение для диагностики заболеваний легких, таких как астма. Существует много исследований по анализу дыхательных звуков. В этих исследованиях показано, что нейронные сети дают высокий коэффициент успеха. Таким образом, мы используем методы анализа ДВП, WPT и классификатор ИНС для анализа наших звуков дыхания. Мы сравниваем эти методы анализа с точки зрения точности классификации. В результате, как видно из итогов, ДВП немного лучше, чем ПВП в нашем исследовании. Полученные результаты очень перспективны для выявления болезни астмы.

Библиографический список

1. Барский, А. Б. Нейронные сети: Распознавание, управление, принятие решений / А. Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 354 с.
2. Титов, Ю. Н. Математическая модель органа слуха для автоматического распознавания речи / Ю. Н. Титов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 37. – С. 307–310.
3. Güler, İ. Combining neural network and genetic algorithm for Prediction of Lung Sounds / İ. Güler, H. Polat, U. Ergün // Journal of Medical Systems. – 2005. – Vol. 29. – P. 217–231.
4. Салюшин, С. А. Методика экспериментального определения структурных параметров нейросети для распознавания звуковых сигналов / С. А. Салюшин // Научная сессия МИФИ-2004: сб. науч. тр. МИФИ. – М., 2004. – С. 34–39.
5. Алдошина, И. А. Основы психоакустики / И. А. Алдошина // Звукорежиссер. – 2002. – № 3. – С. 86–92.
6. Spieth, P. M. Analyzing lung crackle sounds: Stethoscopes and beyond / P. M. Spieth, H. Zhang // Intensive Care Med. – 2011. – Vol. 37. – P. 1238–1239.
7. Новиков, Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов / Л. В. Новиков. – СПб.: Модус, 1999. – 152 с.

8. Neural classification of lung sounds using wavelet coefficients / A. Kandaswamy, C. S. Kumar, Rm. Pl. Ramanathan, S. Jayaraman, N. Malmurugan // Computers in Biology and Medicine. – 2004. – Vol. 34. – P. 523–537.
9. Kizilaslan, R. Combination neural networks forecasters for monthly natural gas consumption prediction / R. Kizilaslan, B. Karlik // Neural Network World. – 2009. – Vol. 19, № 2. – P. 191–199.
10. Yeğiner, M. Feature extraction for pulmonary crackle representation via wavelet networks / M. Yeğiner, Y. P. Kahya // Applied Signal Processing. – 2009. – Vol. 39. – P. 713–721.

Бердибаева Гульмира Куанышевна

докторант,
Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева
(Республика Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: horli@mail.ru

Berdibaeva Gul'mira Kuanyshevna

doctorate degree student,
Kazakh National Research Technical University
named after K. I. Satpayev
(22a Satpayev street, Almaty, Republic of Kazakhstan)

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Bodin Oleg Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Фирсов Дмитрий Сергеевич

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: firsov.d.7.58@gmail.com

Firsov Dmitriy Sergeevich

master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.616

Бердибаева, Г. К.

Классификация звуков астматического дыхания с использованием нейронных сетей /
Г. К. Бердибаева, О. Н. Бодин, Д. С. Фирсов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. –
2018. – № 2 (24). – С. 86–90. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-11.

О. Н. Бодин, А. Г. Убиенных, Г. Ф. Убиенных, А. В. Кузьмин

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МИОКАРДЕ

O. N. Bodin, A. G. Ubiennykh, G. F. Ubiennykh, A. V. Kuzmin

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE CARDIAC EXCITATION MODEL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование электрической активности сердца на основе модели Алиева – Панфилова и процесса распространения волны возбуждения в сердечной мышце в течение кардиацикла. **Материалы и методы.** Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды в области неинвазивной кардиодиагностики и математической физики. В ходе исследований проанализированы методы математического моделирования электрических процессов в миокарде. При проведении исследований использовались методы кардиологии, численного интегрирования дифференциальных уравнений и вычислительного эксперимента. **Результаты.** Осуществлен анализ численных параметров модели возбуждения миокарда. Рассмотрен процесс возникновения возбуждения внутри сердечной мышцы относительно местоположения источника. Проведено исследование и получена реализация модели распространения волны возбуждения в миокарде. Исследована зависимость ширины фронта распространения возбуждения и скорости волны от параметров модели. Осуществлена визуализация электрической активности сердца в течение кардиацикла. **Выводы.** Полученные результаты моделирования электрической активности сердца позволят повысить эффективность диагностики сердечно-сосудистой системы пациента.

A b s t r a c t. Background. The aim is to study the electrical activity of the heart based on the Aliev – Panfilov model and process of the propagation of excitation waves in the myocardium during cardiac. **Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of research works made in the field of non-invasive cardio diagnosis and the mathematical physics. The studies analyzed the methods of the mathematical modeling of electrical processes in the myocardium. In conducting research were used methods cardiology, numerical differentiation and information systems. **Results.** A numerical analysis of the excitation process caused by the action of a localized source is carried out. The possibility of the occurrence of excitation from the location of the source within the myocardium has been studied. Investigated and implemented a model of the propagation of excitation in the heart muscle, the dependence of the excitation propagation velocity and the width of its front on the model parameters is investigated, performed visualization of electrical activity of the heart during the cardiac cycle. **Conclusions.** The results of modeling and visualization of the electrical activity of the heart will improve the diagnostic efficiency of the cardiovascular system of the patient.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модель Алиева – Панфилова, начально-краевые задачи, уравнения в частных производных, возбуждение сердца, волны риентри.

К е y w o r d s: Aliev – Panfilov model, initial-boundary value problems, partial differential equations, excitation of heart, wave rietry.

Введение

По статистике больше всего смертей на земном шаре приходится на сердечно-сосудистые заболевания. Так, в 2015 г. от них умерло 17,7 миллиона человек. Это составило 31 % всех смертельных случаев, из которых 41,8 % пришлось на ишемическую болезнь сердца и 37,9 % – на инсульты [1].

В нормальном сердце ритмическое сердечное сокращение координируется с помощью нелинейных электрических волн возбуждения, которые плавно распространяются через сердечную ткань. Даже незначительные нарушения электрической проводимости сердца могут иметь разрушительные физиологические последствия и инициировать условия, при которых ткань повторно возбуждается через спиральные волны повторения (риентри). Нескоординированное распространение волн возбуждения обычно проявляется в быстром аритмическом сокращении сердца и сильной потере ее насосной функции.

В последнее время для исследования электрофизиологических процессов, протекающих в сердце, и выявления различных аномалий сердечной деятельности широкое распространение получили методы математического моделирования [2, 3]. Моделирование распространения волны возбуждения в миокарде имеет большое значение, поскольку его результаты позволяют врачу-кардиологу получить дополнительную информацию к той, которую он извлекает из анализа электрокардиограммы пациента. Это позволяет повысить эффективность диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС).

Анализ существующих моделей

Электрическая активность клеток сердца (кардиомиоцитов) регулируется балансом между электрическим и химическим градиентами на внешней мембране клетки. Эти градиенты вызваны селективной проницаемостью клеточной мембраны к различным ионам в разных точках во время сердечного цикла. В состоянии покоя трансмембранный потенциал составляет приблизительно -80 мВ. Клетка может возбуждаться электрическим стимулом, который осуществляет начальную деполяризацию через клеточную мембрану. Когда амплитуда стимула превышает порог срабатывания (около -50 мВ), трансмембранный потенциал быстро возрастает от состояния покоя (-80 мВ) до возбужденного состояния (примерно $+20$ мВ). Это изменение в трансмембранном потенциале обусловлено взаимодействием различных ионных каналов, контролирующих поток внутрь и наружу заряженных ионов натрия, калия и кальция.

Первая модель для количественного описания электрофизиологии возбудимых клеток была предложена в 1952 г. Ходжкиным и Хаксли [4] для нервных клеток гигантского кальмара. Большинство доступных в настоящее время моделей кардиомиоцитов было получено из классической модели Ходжкина – Хаксли. Модель Ходжкина – Хаксли была значительно упрощена ФитцХью [5] и Нагумо [6] в начале 60-х гг. прошлого века. Наряду с быстрым потенциалом действия двухпараметрическая модель ФитцХью – Нагумо характеризуется медленной восстанавливающей переменной, которая феноменологически охватывает эффекты всех ионных токов в одной единственной переменной. В дальнейшем были разработаны многочисленные модификации модели ФитцХью – Нагумо с учетом специфических характеристик деполяризации и реполяризации различных типов клеток.

Протекающие в сердечной мышце электрофизиологические процессы определяются изменением трансмембранного потенциала ее клеток с течением времени. Разнообразные математические модели электрической активности сердца, число которых в настоящее время составляет около ста, можно разделить на две основные категории: концептуальные (феноменологические) и детальные (ионные) [7]. Ионные модели описывают ионные токи, протекающие через мембрану сердечной клетки, включают в себя множество параметров и переменных (до нескольких десятков) и требуют значительных вычислительных ресурсов для своей реализации. Однако они имеют аналитическую биологическую интерпретацию параметров и их влияние на поведение модели. Концептуальные модели, описывающие генерацию и распространение потенциала действия, делятся на монодоменные, описывающие генерацию и распространение потенциала действия в едином пространстве, и бидоменные, отдельно описывающие распространение потенциала действия в двух пространствах – внутриклеточном и внеклеточном, взаимодействующих через мембраны клеток.

Для моделирования аритмий на уровне ткани или всего органа нет необходимости представлять все ионные токи клетки с точностью и сложностью приведенных выше биофизически точных моделей. В своей работе мы стремились воспроизвести фундаментальные характеристики потенциала действия при минимальных вычислительных затратах. Поэтому мы применяем феноменологическую двухпараметрическую модель Алиева – Панфилова [8], основанную на незначительных модификациях модели ФитцХью – Нагумо. Она особенно приспособлена для моделирования быстрого восходящего хода и расширенного плато потенциала действия желудочковых кардиомиоцитов.

Модель Алиева – Панфилова содержит две переменные: быструю переменную u , соответствующую трансмембранному потенциалу, и медленную переменную v , моделирующую реполяризацию (восстановление); связи между клетками миокарда описываются диффузионными членами уравнений, а динамика отдельной клетки – реакционными нелинейными членами уравнений. Модель описывается системой двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных типа «реакция – диффузия» [8]:

$$\begin{aligned} u_t &= D\Delta u - ku(u - \alpha)(u - 1) - uv, \\ v_t &= -\left(\varepsilon_0 + \frac{\mu_1 v}{u + \mu_2}\right)(v + ku(u - \alpha - 1)), \end{aligned} \quad (1)$$

где u – потенциал действия; v – переменная восстановления; D – коэффициент электропроводности среды; α – пороговый потенциал, с которого начинается возбуждение клетки. Остальные параметры (k , ε , μ_1 , μ_2) не имеют четко выраженного физического или физиологического смысла и используются для управления формой кривой, описывающей эволюцию потенциала действия. В отличие от оригинальной модели ФитцХью – Нагумо, дополнительный весовой коэффициент $[\varepsilon_0 + (\mu_1 v / (u + \mu_2))]$ был введен Алиевым и Панфиловым [8] для феноменологической настройки кривой восстановления по экспериментальным наблюдениям путем корректировки параметров μ_1 и μ_2 . Уравнения модели (1) являются безразмерными. Алиев и Панфилов предложили масштабировать потенциал действия u и время t путем

$$E = (100u - 80) \text{ [мВ]}, \quad t_\phi = 12,9t \text{ [мс]}$$

для получения амплитуды потенциала физиологического действия E (мВ) от -80 до $+20$ мВ и характерного времени возбуждения t_ϕ (мс) для кардиомиоцитов около 300 мс.

Постановка задачи моделирования

Рассмотрим постановку краевой задачи для исследования процесса возбуждения в миокарде на основе модели Алиева – Панфилова. Требуется решить систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных

$$\begin{aligned} u_t &= D\Delta u - ku(u - \alpha)(u - 1) - uv, & (x, y) \in G, t \in [0, T], \\ v_t &= -\left(\varepsilon_0 + \frac{\mu_1 v}{u + \mu_2}\right)(v + ku(u - \alpha - 1)), & (x, y) \in G, t \in [0, T] \end{aligned} \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial n}(x, y, t) &= 0, & (x, y) \in \Gamma, t \in [0, T], \\ u(x, y, 0) &= \phi(x, y), & (x, y) \in G, \\ v(x, y, 0) &= 0, & (x, y) \in G, \end{aligned} \quad (3)$$

где функция $u(x, y, t)$ – потенциал действия; функция $v(x, y, t)$ – медленная восстанавливающая переменная, связанная с ионными токами; $\phi(x, y)$ – начальное возмущение потенциала; D – коэффициент электропроводности среды; α – порог возбуждения среды (D , k , α – заданные положительные постоянные); G – ограниченная область с границей Γ . Постоянные коэффициенты ε_0 , μ_1 , μ_2 позволяют более точно приблизить форму моделируемого импульса к экспериментальным данным [9].

Моделирующая программа должна входить в состав системы исследования электрической активности сердца, обобщенная схема которой представлена на рис. 1 (пунктиром обведена моделирующая часть системы исследования).

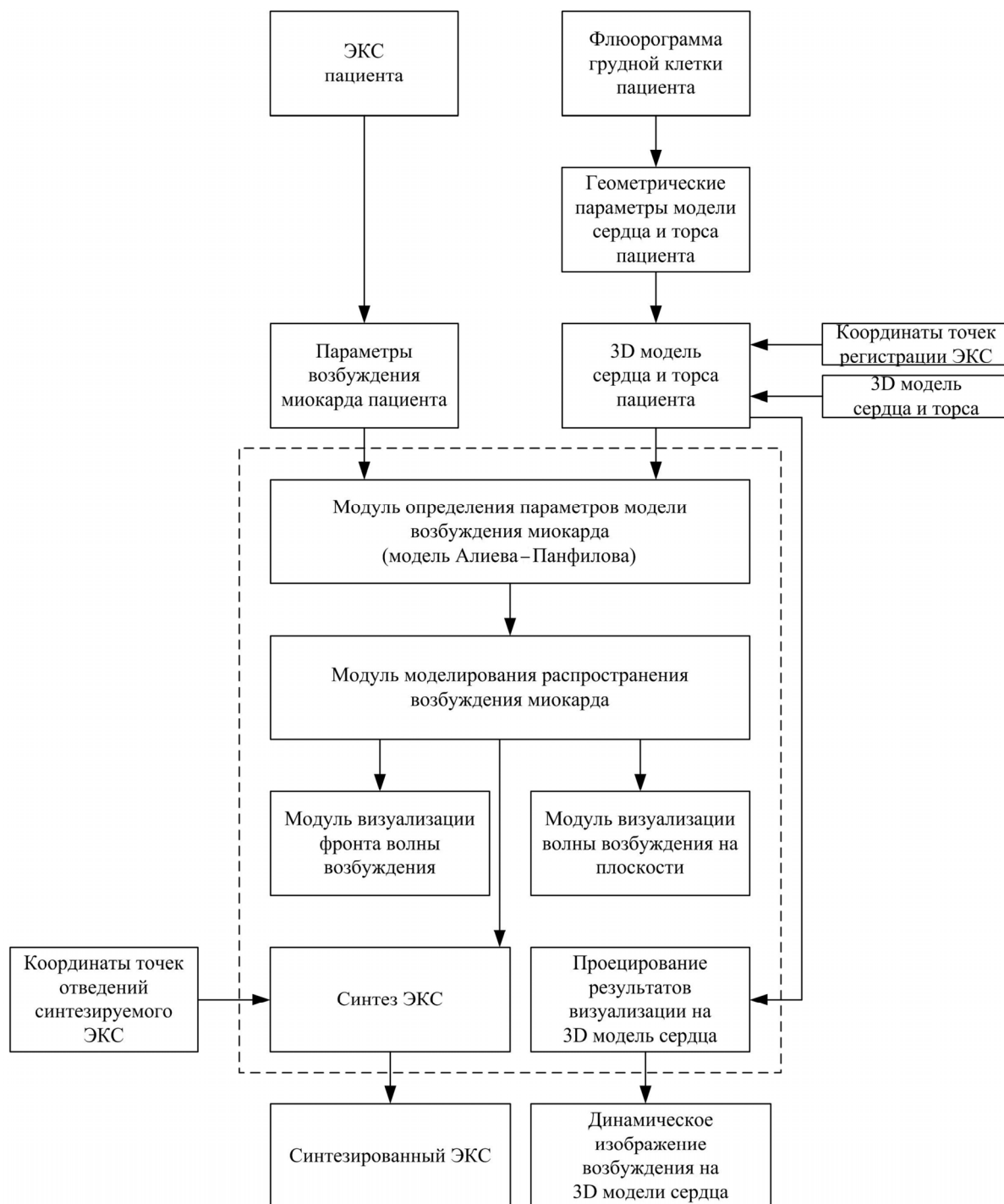


Рис. 1. Обобщенная схема исследования электрической активности сердца

К основным программным модулям, реализующим модель распространения волны возбуждения, относятся:

- модуль определения параметров модели возбуждения, отвечающий за определение индивидуальных параметров модели, характерных для конкретного состояния;
- модуль моделирования распространения волны возбуждения на плоскости с учетом полученных индивидуальных параметров;

– модуль визуализации фронта волны возбуждения, позволяющий отображать фронт волны с использованием принципов физического кодирования информации, а именно: совместного использования цветового кодирования и кодирования геометрическим параметром высоты над уровнем поверхности для повышения наглядности представления информации;

– модуль визуализации волны возбуждения на плоскости, позволяющий отображать процесс распространения волны возбуждения на плоскости с привязкой к опорным точкам поверхности модели сердца с использованием цветового кодирования.

В качестве исходных данных для моделирования требуются амплитудно-временные параметры ЭКС, геометрические параметры сердца и торса, а также координаты точек отведений.

Результаты моделирования распространения волны возбуждения используются для отображения процесса на поверхности 3D модели сердца, а также синтеза ЭКС, т.е. расчета значения ЭКС для заданной точки отведения на основе моментальных данных электрической активности точек миокарда.

В задачу исследования входят:

- оценка влияния значений параметров модели на форму и длительность распространяющегося импульса возбуждения в различных отделах сердца;
- исследование механизмов распространения волны возбуждения в среде, содержащей рефрактерные области и дополнительные источники возбуждения;
- визуализация распространения волны возбуждения в миокарде на реалистичной трехмерной модели сердца;
- исследование жизнеугрожающих аритмий, вызываемых автоволнами типа риентри, для выявления определяющих факторов их развития в рамках математической модели с использованием вычислительного эксперимента;
- синтез модельной ЭКГ.

Для проведения моделирования распространения возбуждения в сердечной мышце на основе двумерной модели необходимо решить следующие задачи:

- построить развертку поверхности трехмерной модели сердца пациента на плоскости;
- провести конечно-разностную дискретизацию краевой задачи (2), (3);
- провести вычислительные эксперименты, в ходе которых провести исследования решений краевой задачи (2), (3) и при необходимости скорректировать значения параметров модели.

Конечно-разностная дискретизация модели

Уравнения (2) представляют собой двумерную модель распространения возбуждения в миокарде, поэтому вначале необходимо спроецировать поверхность трехмерной модели сердца пациента на плоскость, чтобы получить ее «развертку» на сетке решений модели. Основная задача при выборе вида проекции заключалась в том, чтобы свести к минимуму все искажения в геометрических размерах при проецировании поверхности трехмерной модели сердца на плоскость. Исходя из этого была выбрана цилиндрическая проекция [10]. Ее достоинствами являются равноугольность и небольшие искажения в районе экватора. При построении «развертки» поверхности трехмерной модели сердца на ней выбиралось множество точек, которые проецировались на плоскость сетки решений, при этом на плоскости выделялись границы между анатомическими частями сердца (предсердиями и желудочками), которые при моделировании заданием соответствующих граничных условий становятся непроницаемыми (рис. 2). Области точек предсердий на рис. 2 обозначена цифрами 1а и 1б. Область точек желудочков обозначена цифрой 2. В этих областях и осуществлялось моделирование распространения возбуждения в сердце.

Уравнения (2) решались в области проекции поверхности сердца с помощью метода конечных разностей для пространственных производных и явным интегрированием Эйлера для производных по времени. Конечно-разностная схема на основе использования пятиточечного шаблона и равномерной сетки ($\Delta x = \Delta y$) для решения уравнений (2) имеет вид

$$u_{x,y,t+1} = u_{x,y,t} + \left(\frac{u_{x-1,y,t} + u_{x+1,y,t} + u_{x,y-1,t} + u_{x,y+1,t} - 4u_{x,y,t}}{\Delta x^2} + f(u_{x,y,t}, v_{x,y,t}) \right) \Delta t, \quad (4)$$

$$v_{x,y,t+1} = v_{x,y,t} + g(u_{x,y,t}, v_{x,y,t}) \Delta t,$$

где Δx , Δt – соответственно размеры пространственного и временного шагов дискретизации;

$$f(u, v) = -ku(u - a)(u - 1) - uv;$$

$$g(u, v) = -\left(\varepsilon_0 + \frac{\mu_1 v}{u + \mu_2}\right)(v + ku(u - a - 1)). \quad (5)$$

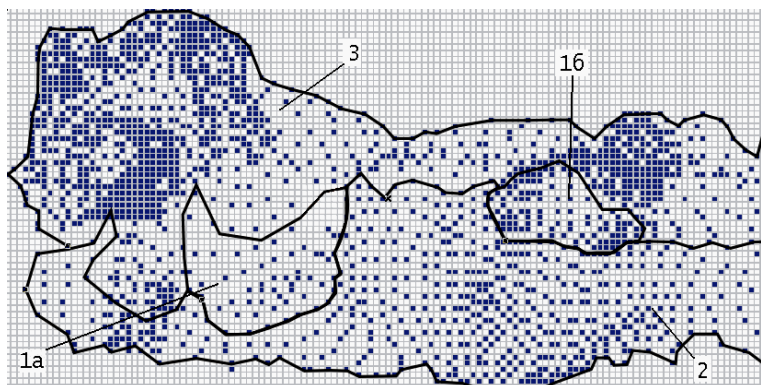


Рис. 2. Цилиндрическая проекция поверхности трехмерной модели сердца

Начальные и граничные условия (3) для системы уравнений (2) заменялись разностными начальными и граничными условиями для сеточных функций. Начальные условия задавались равными нулю для всех точек поверхности сердца, кроме пейсмекеров. Для пейсмекеров начальные условия определялись экспериментальным путем.

Граничные условия задавались в виде

$$u(x, y, t + 1) = C + \alpha u(x, y, t) + \beta u(x + s_x, y, t) + \gamma u(x, y + s_y, t). \quad (6)$$

Значения коэффициентов в уравнении (6) брались из множества $(-1; 0; +1)$ в зависимости от конфигурации границы, что позволяет задавать основные типы граничных условий.

Условие устойчивости разностной схемы (4): $\Delta t < \frac{\Delta x^2}{4}$.

Разностная схема (4) аппроксимирует краевую задачу (2), (3) с погрешностью $O(\Delta t + \Delta x^2)$.

Результаты моделирования

Согласно схеме исследования электрической активности сердца (см. рис. 1) сначала на основе анализа кардиографической информации осуществлялось задание начальных и граничных условий (3) модели, затем осуществлялась настройка параметров модели и моделировалось распространение возбуждения в миокарде. Результаты моделирования сохранялись в памяти в виде векторов значений $u(x, y)$ и $v(x, y)$ в различные моменты времени моделирования. По результатам моделирования осуществлялась визуализация распространения возбуждения на поверхности сердца (на основе шкалы цветового кодирования) и синтез модельной ЭКГ. Синтез модельной ЭКГ осуществлялся по методике, изложенной в [11]. Исходными данными являлись значения потенциала действия в каждый момент времени в каждой точке пространства $u(x, t)$. Расчет модельной ЭКГ $E(t)$ сводился к вычислению интеграла

$$E(t) = \left| \frac{1}{\max_x \{u(x, t)\}} \int_G \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} u(x, t) dx \right|^2, \quad (7)$$

т.е. модельная ЭКГ представляет собой среднее по пространству значение производной по времени от потенциала действия с весом, равным потенциалу действия. При этом функция $E(t)$ нормируется, приобретая конечный вид.

Моделирование проводилось на персональном компьютере стандартной комплектации в среде Embarcadero (CodeGear) RAD Studio 2010. На рис. 3 приведена зависимость переменных u и v от времени при различных значениях параметров модели. На рис. 3,а параметры модели имеют следующие значения: $k = 8$, $a = 0,15$, $\mu_1 = 0,2$, $\mu_2 = 0,3$, $\varepsilon_0 = 0,002$. На рис. 3,б параметры модели: $k = 8$, $a = 0,2$, $\mu_1 = 0,2$, $\mu_2 = 0,3$, $\varepsilon_0 = 0,002$.

Проведенные эксперименты показали, что место расположения источника возбуждения не влияет на скорость распространения возбуждения. Этот результат играет важную роль при решении обратных задач, позволяющих определить точки локализации источников возбуждения.

Ряд экспериментов был связан с моделированием процесса распространения возбуждения при наличии поврежденных участков сердечной мышцы. Для этого на сетку решений модели помещались невозбудимые области и варьировались значения параметров модели. Это приводило к возникновению спиральных волн риентри [12].

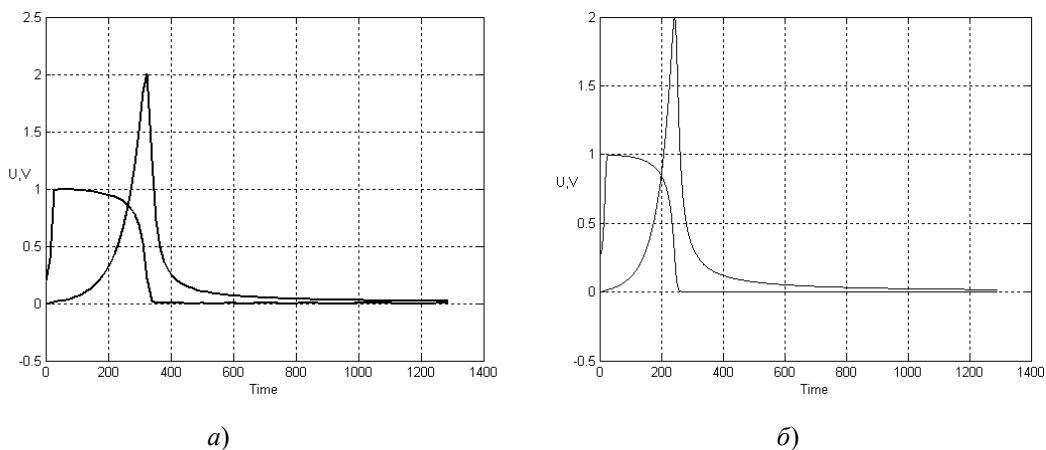


Рис. 3. Профили импульса возбуждения при различных значениях параметров модели

Для получения трехмерной картины распространения возбуждения на трехмерную модель сердца пациента накладывалось распределение потенциала действия, полученное в результате моделирования на плоской модели. Каждой вершине трехмерной модели сердца согласно шкале цветового кодирования присваивался цвет, соответствующий значению потенциала в этой точке. На трехмерной модели сердца ее поверхность представлялась в виде треугольных пластин, цвет которых определялся путем интерполяции цветов вершин по методу Гуро [13]. Рисунок 4 показывает трехмерную картину процесса распространения возбуждения по поверхности сердца в течение кардиоцикла, охватывая стадии поляризации и деполяризации всех анатомических отделов сердца (слева направо).



Рис. 4. Визуализация процесса возбуждения сердца в течение кардиоцикла

На рис. 5 показаны основные возможности моделирующей программы. Видно, что полученная синтезированная ЭКГ (справа в средней части) отображает все ключевые фазы возбуждения сердца, а именно: Р-волну, которая характеризует возбуждение предсердий; QRS-комплекс, который характеризует возбуждение желудочков; Т-волну, характеризующую реполяризацию желудочков.

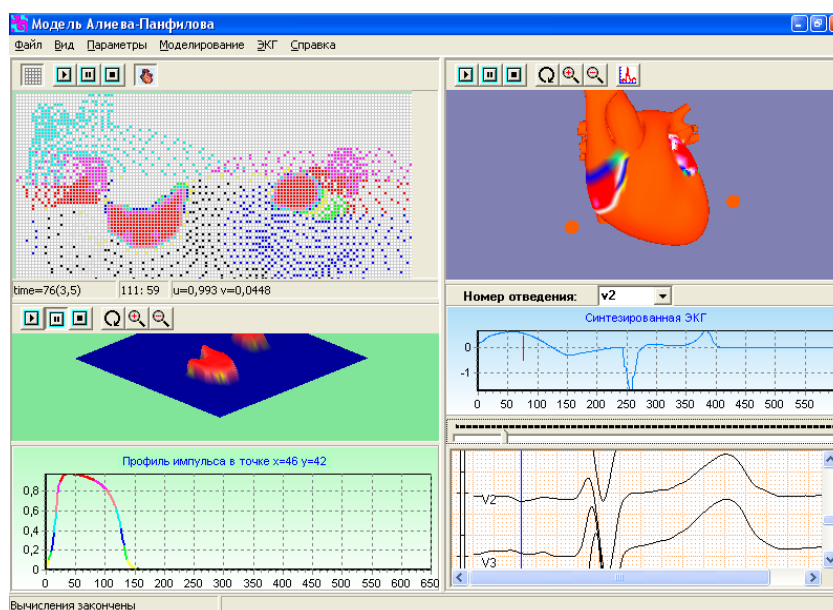


Рис. 5. Визуализация результатов моделирования

Заключение

Разработанная система исследования электрической активности сердца на основе автоволновой модели Алиева – Панфилова позволяет осуществлять:

- моделирование процесса распространения возбуждения в миокарде в различных режимах;
- отображение формы потенциала действия для различных анатомических частей сердца;
- отображение модельной ЭКГ пациента;
- выявление определяющих факторов возникновения волн ригити в желудочках сердца и исследовать их развитие;
- построение «электрического портрета» сердца пациента.

Полученные результаты моделирования и визуализации электрической активности сердца позволят повысить эффективность диагностики сердечно-сосудистой системы пациента.

Библиографический список

1. Сердечно-сосудистые заболевания. Информационный бюллетень от 17 мая 2017 г. Всемирная организация здравоохранения. – URL: <http://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-cvds>
2. Curvature Analysis of Cardiac Excitation Wavefronts / A. Murthy, E. Bartocci, F. H. Fenton, J. Glimm, R. A. Gray, E. M. Cherry, S. A. Smolka, R. Grosu // IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics. – 2013. – Vol. 10, № 2. – P. 323–336.
3. Mathematical modeling of electrocardiograms: a numerical study / M. Boulakia, S. Cazeau, M.A. Fernandez, J-F. Gerbeau, N. Zenzemi // Annals of Biomedical Engineering. – 2010. – № 38 (3). – P. 1071–1097.
4. Hodgkin, A. L. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley // J. Physiol. – 1952. – № 117. – P. 500–544.
5. FitzHugh, R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane / R. FitzHugh // Biophysical J. – 1961. – № 1. – P. 445–466.
6. Nagumo, J. An active pulse transmission line simulating nerve axon / J. Nagumo, S. Arimoto, S. Yoshizawa // Proc. IRE. – 1962. – № 50. – P. 2061–2070.
7. Алиев, Р. Р. Концептуальные и детальные математические модели электрической активности миокарда : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Алиев Р. Р. – Пушкино, 2007. – 46 с.
8. Aliev, R. R. A simple two-variable model of cardiac excitation Chaos / R. R. Aliev, A. V. Panfilov // Solitons and Fractals. – 1996. – № 7(3). – P. 293–301.

9. *Sundnes, J.* Computing the Electrical Activity in the Heart / J. Sundnes, G. T. Lines, X. Cai. – Berlin and Heidelberg and New York : Springer, 2006. – P. 311.
10. *Вахрамеева, Л. А.* Математическая картография : учебник для вузов / Л. А. Вахрамеева, Л. М. Бугаевский, З. Л. Казакова. – М. : Недра, 1986. – 286 с.
11. Программный комплекс «Виртуальное сердце» / В. С. Петров, А. В. Вильдеманов, С. А. Григорьева, Е. А. Козин, М. А. Комаров, В. А. Костин, А. К. Крюков, Т. А. Леванова, И. Б. Мееров, Г. В. Осипов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – № 5 (2). – С. 438–447.
12. Моделирование и визуализация электрической активности сердца / О. Н. Бодин, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных, Ф. К. Рахматуллин, А. С. Сергеев, М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 85–93.
13. *Херн, Д.* Компьютерная графика и стандарт OpenGL / Д. Херн, М. П. Бейкер. – 3-е изд-е. – М. : Вильямс, 2005. – 1168 с.

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Bodin Oleg Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Убиенных Анатолий Геннадьевич

старший преподаватель,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: utolg@mail.ru

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

senior lecturer,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Убиенных Геннадий Федорович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40),
E-mail: ugf@mail.ru

Ubiennykh Gennadiy Fedorovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кузьмин Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40),
E-mail: flickerlight@inbox.ru

Kuz'min Andrey Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 612.173; 536.758

Бодин, О. Н.

Программная реализация модели распространения волны возбуждения в миокарде /
О. Н. Бодин, А. Г. Убиенных, Г. Ф. Убиенных, А. В. Кузьмин // Измерение. Мониторинг. Управление.
Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 91–99. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-12.