

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

№ 3, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Батрак А. П., Полюшкина М. П.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

5

Железняк А. А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СИСТЕМЫ
ГЕНЕРАЦИИ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

11

Баранов В. А.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

20

Ильин А. С.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ

30

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Светлов А. В., Нгок Мань Нгуен

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ДОБРОТНОСТИ

39

*Воротников И. Н., Мастепаненко М. А.,
Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В.*
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ
ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ В СРЕДЕ SIMINTESCH

48

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Максимов П. А., Ишков А. С., Маркелов М. К.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
СТЕКА ЯЧЕЙКИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ЕЕ НАДЕЖНОСТЬ

54

*Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И.,
Александров В. С., Козлов Г. В., Левин А. И.*
УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ
ОКСИДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРА

64

*Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Козлов Г. В.,
Кондрашин В. И., Вареник Ю. А., Александров В. С.*
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРА
НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

73

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Алимурадов А. К.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕГМЕНТАЦИИ
РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОПЕРАТОРА ТИГЕРА

80

Бекбай А. Т., Ожикенов К. А., Бодин О. Н., Туякбаев А. А.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЖИЗНЕОПАСНЫХ АРИТМИЙ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

93

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аксенов И. В., Чайковский В. М.
ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ДЛЯ САМОЛЕТНОЙ
РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ
НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

103

Шерстнев В. В.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ГЕТЕРОГЕННОЙ
ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

110

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 3, 2021

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Batrak A.P., Polyushkina M.P.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DIESEL FUEL
QUALITY CONTROL BY ACOUSTIC METHOD

5

Zhelezniak A.A.

EFFICIENCY OF THE METHOD OF COMPENSATION
OF INFORMATION FLOWS OF THE REFERENCE
IMAGE GENERATION SYSTEM

11

Baranov V. A.

INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE CONTROL
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PRODUCTION
OF PRODUCTS WITH A HETEROGENEOUS STRUCTURE

20

Ilin A.S.

TECHNICAL MEANS OF PROTECTION
INFORMATION-MEASURING SYSTEM
CALIBRATION OF KILOVOLTMETERS

30

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Svetlov A.V., Ngoc Manh Nguyen

DETERMINATION OF RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT
PARAMETERS BASED ON RESONANT FREQUENCY
AND QUALITY FACTOR MEASUREMENTS

39

Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V.
MODELING OF MEASUREMENT CIRCUITS CAPACITIVE SENSORS
IN THE SIMINTECH ENVIRONMENT

48

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Maksimov P.A., Ishkov A.S., Markelov M.K.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF INFORMATION SECURITY CELL STACK
MATERIAL PARAMETERS ON ITS RELIABILITY

54

*Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I.,
Aleksandrov V.S., Kozlov G.V., Levin A.I.*

CONTROL OF THE PROPERTIES OF TRANSPARENT
CONDUCTING OXIDES DEPENDING
ON THE SOLUTION PARAMETERS

64

*Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V.,
Kondrashin V.I., Varenik Yu.A., Alexandrov V.S.*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLUTION CHARACTERISTICS
ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS
OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

73

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Alimuradov A. K.

ENHANCEMENT OF SPEECH SIGNAL SEGMENTATION
USING TEAGER ENERGY OPERATOR

80

Bekbay A.T., Ozhikenov K.A., Bodin O.N., Tuyakbayev A.A.

PREDICTION OF LIFE-THREATENING ARRHYTHMIAS
IN THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
OF ELECTROCARDIODIAGNOSTICS

93

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

Aksenov I.V., Chaikovsky V.M.

FREQUENCY DISCRIMINATOR FOR AIRCRAFT
RADIONAVIGATION DOPPLER SYSTEM
BASED ON MICROCONTROLLER

103

Sherstnev V.V.

ENSURING THE SAFETY OF A HETEROGENEOUS GROUP
OF UNMANNED AIRCRAFT

110

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 543.682

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-1

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. П. Батрак¹, М. П. Полюшкина²

¹ Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ andrebatrak@mail.ru, ² mpp5@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа посвящена изучению возможности применения акустического метода контроля для определения комплексного показателя качества, дизельного топлива на ранних стадиях его применения путем выявления зависимости изменения акустического спектра. Целью работы является разработка методологии и принципиальной схемы комплексного контроля физико-химических свойств качества дизельного топлива акустическим методом. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи использовался метод синтеза существующих методов контроля дизельных топлив с акустическим методом контроля некоторых углеводородов. Новизна подхода заключается в принципиальной схеме и алгоритме реализации комплексного контроля дизельного топлива. *Результаты.* Предложены схема и алгоритм реализации метода контроля качества дизельного топлива акустическим методом. *Выводы.* Реализована принципиальная схема контроля дизельного топлива предложенным методом. Разработана перспективная методология работы анализатора комплексного контроля качества дизельного топлива.

Ключевые слова: акустический метод, дизельное топливо, контроль

Для цитирования: Батрак А. П., Полюшкина М. П. Разработка методологии контроля качества дизельного топлива акустическим методом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 5–10. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-1

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DIESEL FUEL QUALITY CONTROL BY ACOUSTIC METHOD

A.P. Batrak¹, M.P. Polyushkina²

¹ Polytechnic Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ andrebatrak@mail.ru, ² mpp5@yandex.ru

Abstract. *Background.* The work is devoted to the study of the possibility of using the acoustic control method to determine the integrated quality indicator of diesel fuel at the early stages of its application by identifying the dependence of changes in the acoustic spectrum. The aim of the work is to develop a methodology and a schematic diagram of the complex control of the physicochemical properties of the quality of diesel fuel by the acoustic method. *Materials and*

methods. To solve this problem, the method of synthesis of existing methods for monitoring diesel fuels with an acoustic method for monitoring some hydrocarbons was used. The novelty of the approach lies in the schematic diagram and algorithm for the implementation of the integrated control of diesel fuel. *Results.* A scheme and an algorithm for the implementation of the method for controlling the quality of diesel fuel by the acoustic method are proposed. *Conclusions.* A schematic diagram of diesel fuel control by the proposed method has been implemented. A promising methodology for the operation of the analyzer for the integrated quality control of diesel fuel has been developed.

Keywords: acoustic method, diesel fuel, control

For citation: Batrak A.P., Polyushkina M.P. Development of a methodology for diesel fuel quality control by acoustic method. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):5–10. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-1

По статистическим данным Общества по защите потребителей, ежегодно около ста тысяч владельцев автомобилей в крупных городах России сталкиваются с поломкой автомобиля из-за некачественного дизельного топлива, что приводит к большим затратам на ремонт, а чаще всего – к полной замене двигателя.

Мировой рынок ежегодно потребляет по несколько миллионов тонн дизтоплива. Дизельное топливо особенно популярно благодаря непосредственной выгоде его использования в силу того, что при заправке качественным дизтопливом и регулярном уходе дизельный двигатель способен отработать 500 000 км без капитального ремонта. Хотя стоит учитывать, что система питания дизельного двигателя намного сложнее и отличается от системы питания бензинового. Так как дизельное топливо в камеру сгорания подается под большим давлением, количество его очень мало, а вся схема питания делает двигатель более дорогим. С целью сохранения необходимого уровня безопасности, дизельный двигатель изготавливают более прочным, по сравнению с бензиновым, и, как следствие, более тяжелым.

Тем не менее основным достоинством дизельного двигателя считается экономия топлива, в силу того, что у дизельного двигателя КПД достигает 36 % и даже выше, в то время как у бензина КПД не достигает и 25 %. Помимо этого, дизельный двигатель отличается более высоким крутящим моментом. Это помогает передвигаться в городских пробках и в пробках на трассе на холостых оборотах.

Качество дизельного топлива характеризуют по следующим основным показателям¹ (рис. 1).

Каждому из перечисленных качественных показателей характерен свой собственный метод измерения или контроля, который может изменяться в зависимости от стандарта².

Причем большая часть приборов и материалов, используемых для определения качества дизельного топлива, предназначены для определения уровня качества только одной-двух характеристик, например доля свободной воды и механических примесей определяется двумя методами:

– визуальным осмотром проверяют наличие воды или механических примесей;

– сравнением видов стандартной цветовой шкалы через сосуд с пробой со стандартными фотографиями с записью всех дополнительных наблюдений, например особенно сильное загрязнение водой или твердыми частицами или более темный цвет топлива, затрудняющий определение [1].

Цетановое число дизельного топлива определяют сравнением характеристик его сгорания в двигателе с характеристиками сгорания смесей эталонных топлив с известными

¹ ГОСТ 305–2013 Топливо дизельное. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014; ГОСТ Р 52368–2005 (ЕН 590:2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2009.

² ГОСТ 305–2013 Топливо дизельное. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014; ГОСТ Р 52368–2005 (ЕН 590:2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2009; ГОСТ ISO 5165–2014 Нефтепродукты. Воспламеняемость дизельного топлива. Определение цетанового числа моторным методом. М. : Стандартинформ, 2015; ГОСТ 34195–2017 Топлива дизельные. Определение фильтруемости по текучести при низких температурах. М. : Стандартинформ, 2019; ГОСТ 20287–91 Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания. М. : Изд-во стандартов, 1992.

значениями цетановых чисел при испытании в стандартных рабочих условиях. Сравнение проводят по показаниям, полученным на маховике для образца и двух используемых эталонных топлив со значениями цетановых чисел большим и меньшим, чем у образца (процедура «взятия в вилку»), путем изменения степени сжатия для получения требуемого угла задержки воспламенения, для интерполяции цетанового числа в единицы показаний маховика¹.

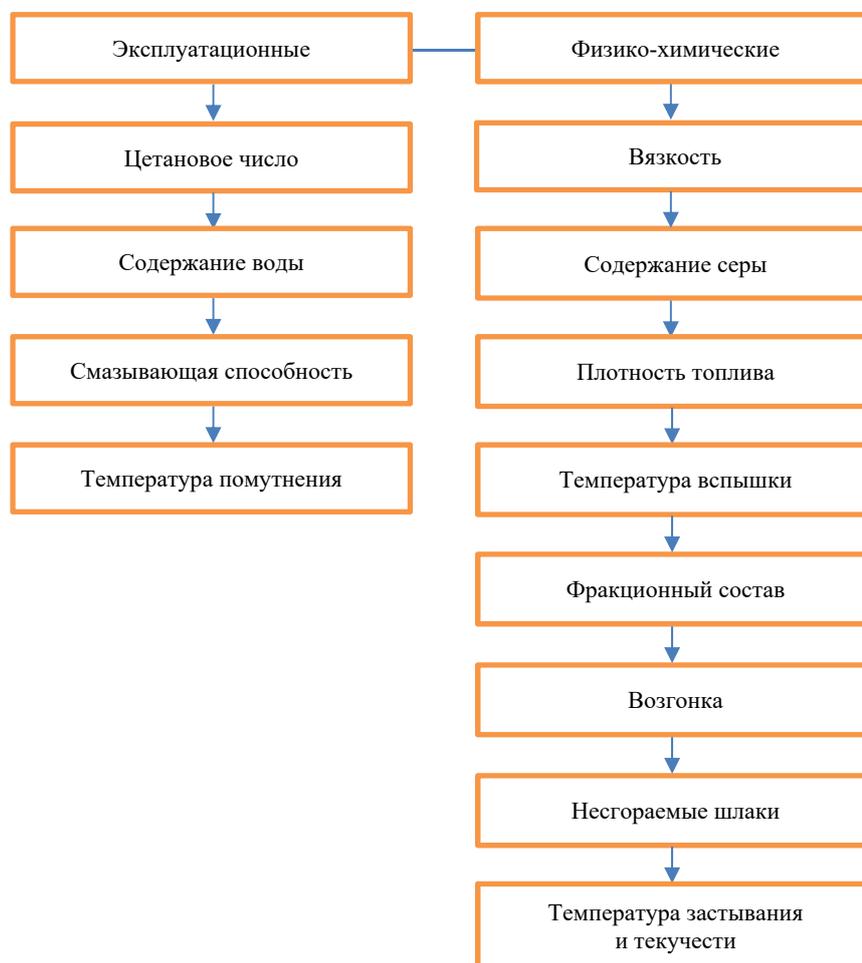


Рис. 1. Основные классификационные признаки качества дизельного топлива

Температуру вспышки образца дизельного топлива определяют в испытательном тигле аппарата Пенски – Мартенса и подогревают таким образом, чтобы при непрерывном перемешивании происходило постоянное повышение температуры. Источник зажигания опускают в тигль через равномерные интервалы времени, одновременно с остановкой перемешивания. Самую низкую температуру, при которой источник зажигания вызывает возгорание паров испытуемого образца нефтепродукта, а пламя распространяется по поверхности жидкости, регистрируют как температуру вспышки при фактическом барометрическом давлении. Эту температуру приводят к стандартному атмосферному давлению, используя уравнение

$$T_c = T_0 + 0,25(101,3 - P),$$

где T_0 – температура вспышки при барометрическом давлении окружающей среды, °С; P – барометрическое давление окружающей среды, кПа.

Следовательно, при контроле качества топлива в реальных условиях прибегают к контролю или измерению наиболее важных (чаще имеющих просто в наличии приборов и ма-

¹ ГОСТ ISO 5165–2014 Нефтепродукты. Воспламеняемость дизельного топлива. Определение цетанового числа моторным методом. М. : Стандартинформ, 2015.

териалов) критериев для данных условий эксплуатации, пренебрегая другими, что приводит к росту вероятности грубого нарушения эксплуатации двигателя.

Лишены данного недостатка комплексные методы контроля и измерений свойств дизельного топлива на основе многофункциональных переносных лабораторий, например измерители низкотемпературных показателей нефтепродуктов SX 150-800 [2], принцип действия которых основан на косвенном методе одновременного измерения трех независимых физических величин (оптической прозрачности, массы и температуры). В результате такого измерения возникает рост вероятности случайной погрешности измерений и снижение надежности результатов, в связи с чем возникает необходимость строгого соблюдения методики измерений и квалификации лаборанта.

Мы предлагаем в качестве альтернативы использовать акустический метод измерения, который, на наш взгляд, будет лишен перечисленных выше недостатков. Литературно-патентный поиск в данном направлении выявил закономерности изменения скорости прохождения звуковой волны в различных углеводородах, следовательно, работа в данном направлении является перспективной. Реализацию можно осуществить по следующей схеме (рис. 2) [3].

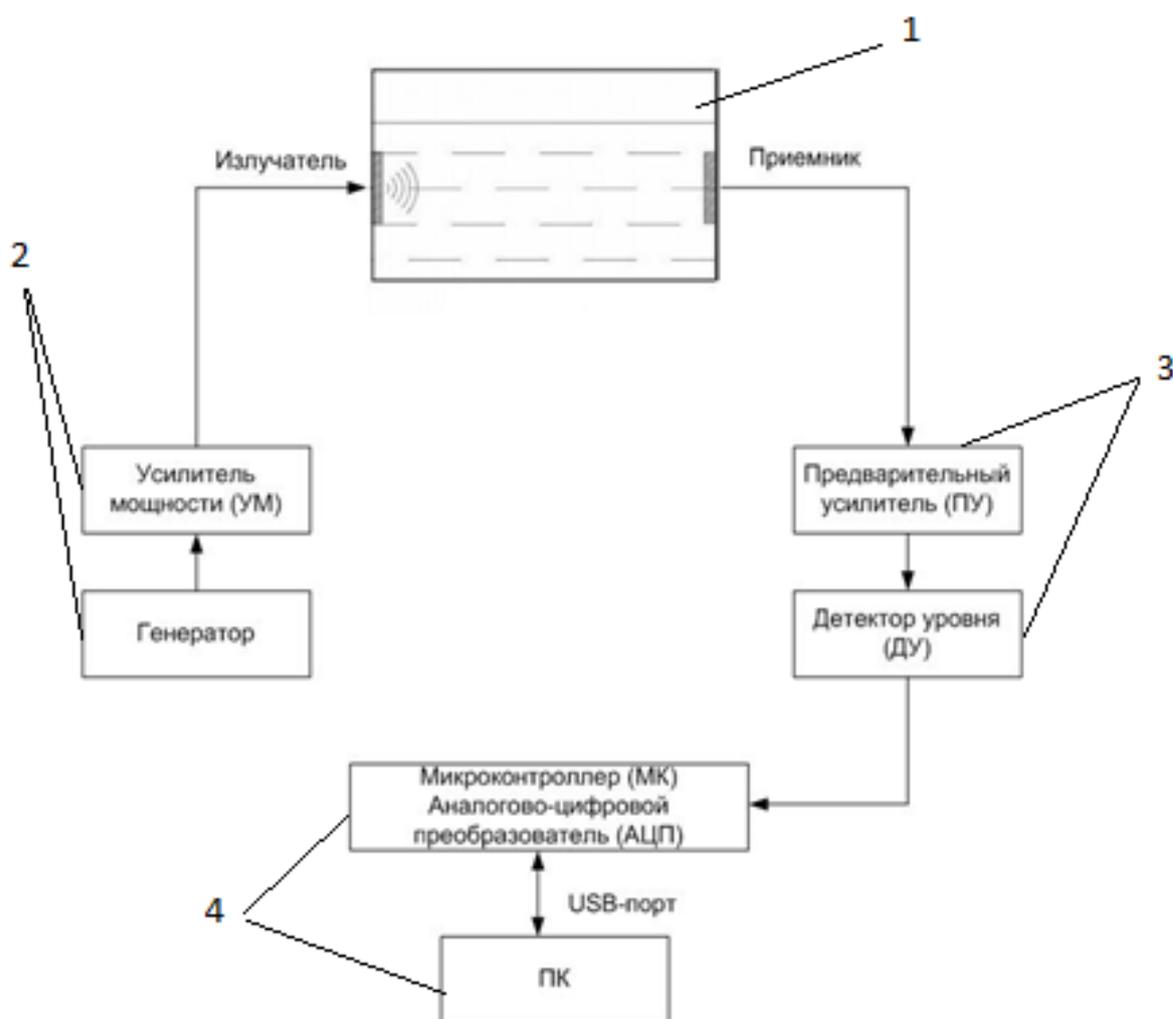


Рис. 2. Схема аппаратной реализации методологии

Принципиальная схема аппаратного обеспечения предложенной методологии будет включать образец дизельного топлива, помещенного в резервуар 1, между двумя пьезокерамическими преобразователями генератора сигналов 2, предварительного усилителя с детектором уровня 3, персонального компьютера и АЦП 4.

Общий принцип алгоритма обработки будет реализован по приведенной ниже схеме (рис. 3).



Рис. 3. Принципиальная схема обработки измерительного сигнала

Измерительная система будет представлять собой ЭВМ с пакетом моделирования MatLab 11, в среде которой будет создана программа обработки спектра на базе АЦП Simulink, предназначенная для обработки и отображения спектра свободных колебаний.

Список литературы

1. Гуреев А. А., Азев В. С., Камфер Г. М. Топливо для дизелей. Свойства и применение : учеб. пособие. М. : Химия, 1993. 330 с.
2. АДС Лаб. Единый поставщик лабораторных решений. URL: <https://baikallab.ru/catalog/more?more=1436&cat=136>
3. Батрак А. П., Чупак Т. М., Тюрюмина А. В., Никитина А. В. Акустический анализ свойств трансформаторных масел // Тяжелое машиностроение. 2014. № 4–5. С. 45–46.

References

1. Gureev A.A., Azev V.S., Kamfer G.M. *Toplivo dlya dizeley. Svoystva i primeneniye: ucheb. posobie = Fuel for diesel engines. Properties and application : tutorial*. Moscow: Khimiya, 1993:330. (In Russ.)
2. ADS Lab. *Edinyy postavshchik laboratornykh resheniy = ADS Lab. A single provider of laboratory solutions*. (In Russ.). Available at: <https://baikallab.ru/catalog/more?more=1436&cat=136>
3. Batrak A.P., Chupak T.M., Tyuryumina A.V., Nikitina A.V. Acoustic analysis of transformer oil properties. *Tyazheloe mashinostroenie = Heavy engineering*. 2014;(4–5):45–46. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Петрович Батрак

кандидат технических наук, преподаватель
кафедры стандартизации, метрологии
и управление качеством,
Политехнический институт,
Сибирский федеральный университет
(Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26А)
E-mail: andrebatrak@mail.ru

Andrey P. Batrak

Candidate of technical sciences,
lecturer of sub-department of standardization,
metrology and quality management,
Polytechnic Institute,
Siberian Federal University
(26A Kirenskogo street, Krasnoyarsk, Russia)

Мария Петровна Полюшкина

адъюнкт,

Сибирский федеральный университет

(Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26А)

E-mail: mpp5@yandex.ru

Maria P. Polyushkina

Adjunct,

Siberian Federal University

(26A Kirenskogo street, Krasnoyarsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 13.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.04.2021

Принята к публикации/Accepted 21.04.2021

УДК 681.5
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А. А. Железняк

Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия
zheleznyak13@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из основных путей повышения эффективности компенсации информационных потоков является построение системы распознавания метода компенсации информационных потоков генерации эталонных изображений. *Материалы и методы.* В случае если класс систем характеризуется перечнем входящих в него членов, то он может быть основан на принципе принадлежности к этому перечню – этот метод называется методом сравнения с эталоном. Согласно этому методу множество образов, принадлежащих одному классу, запоминается системой идентификации. При предъявлении системе новых образов она последовательно сравнивает их с эталонными образами, хранящимися в памяти. Система относит новый образ к тому классу, к которому принадлежал эталонный образ, совпавший с предъявленным. *Результаты и выводы.* Этот метод работает хорошо, только когда выборка близка к идеальной или идеальны условия предъявления изображений. В том случае, когда для членов одного класса характерны некие общие признаки, система распознавания строится на принципе общности свойств. Эти общие свойства хранятся в памяти системы. В процессе обработки изображений система должна быть способна выделять признаки из предъявленного изображения и работать с ними. Система зачисляет вновь предъявленное изображение в класс, признаки которого подобны признакам, выделенным у нового изображения.

Ключевые слова: оптимизация, алгоритм, образ, информационный поток, эффективность

Для цитирования: Железняк А. А. Эффективность метода компенсации информационных потоков системы генерации эталонного изображения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 11–19. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-2

EFFICIENCY OF THE METHOD OF COMPENSATION OF INFORMATION FLOWS OF THE REFERENCE IMAGE GENERATION SYSTEM

A.A. Zhelezniak

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia
zheleznyak13@mail.ru

Abstract. *Background.* One of the main ways to improve the efficiency of information flow compensation is to build a recognition system for the method of information flow compensation for generating reference images. *Materials and methods.* If a class of systems is characterized by a list of its members, it can be based on the principle of belonging to this list – this method is called the method of comparison with the standard. According to this method, many images belonging to the same class are stored by the identification system. When new images are presented to the system, it consistently compares them with the reference images stored in memory. The system assigns the new image to the class that the reference image that coincided with the presented one belonged to. *Results and conclusions.* This method works well only when the sample is close to ideal, or the conditions for presenting images are ideal. If members of the same class have some common features, the recognition system is based on the principle of common properties. These General properties are stored in the system memory. During image processing, the system must be able to extract features from the presented image and work with them. The system assigns the newly presented image to a class whose features are similar to those highlighted in the new image.

Keywords: optimization, algorithm, image, information flow, efficiency

For citation: Zhelezniak A.A. Efficiency of the method of compensation of information flows of the reference image generation system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):11–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-2

Введение

В основе работы положен алгоритм компенсации информационных потоков [1], основной идеей которого является использование системы генерации эталонного изображения, компенсирующего входной сигнал. Упрощенная структура системы приведена на рис. 1.

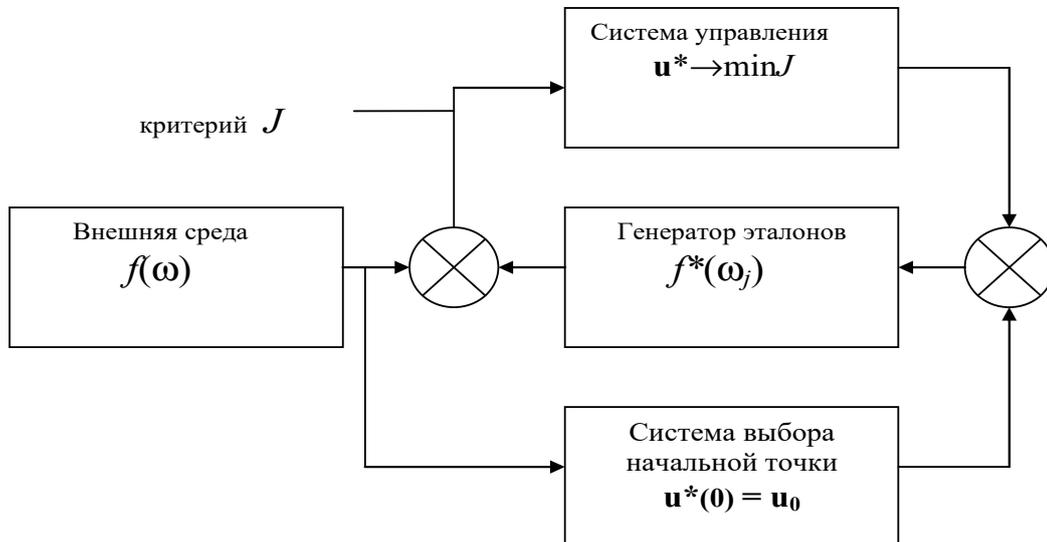


Рис. 1. Структура системы компенсации входного изображения

Эффективность разработанной информационной технологии идентификации оптических образов можно оценить либо по затратам вычислительных ресурсов, либо в сравнении с другими технологиями по максимальной мере близости.

Алгоритм системы управления компенсацией построен как трехуровневая процедура, на первом уровне оценивается начальная точка процедуры, на втором уровне находится наиболее близкий эталон из группы логически допустимых и на третьем уровне оптимизируется модель сцены [2].

На рис. 2 показан процесс изменения отклонения при использовании градиентной процедуры. Здесь видно проявление овражности функции цели, что определило использование метода наискорейшего спуска.

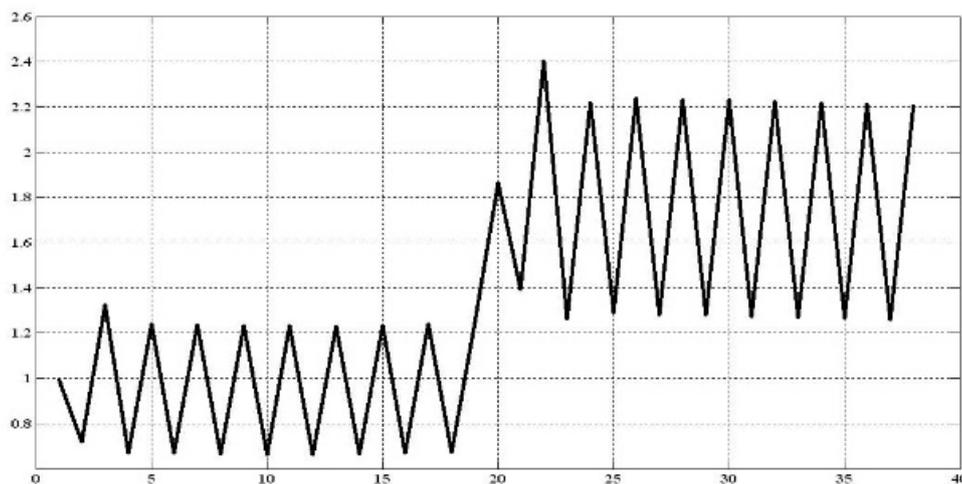


Рис. 2. Проявление овражности

На рис. 3 показано возникновение немонотонности поведения целевой функции при несоответствии эталона и объекта, что определило завершение процедуры при нарушении монотонности.

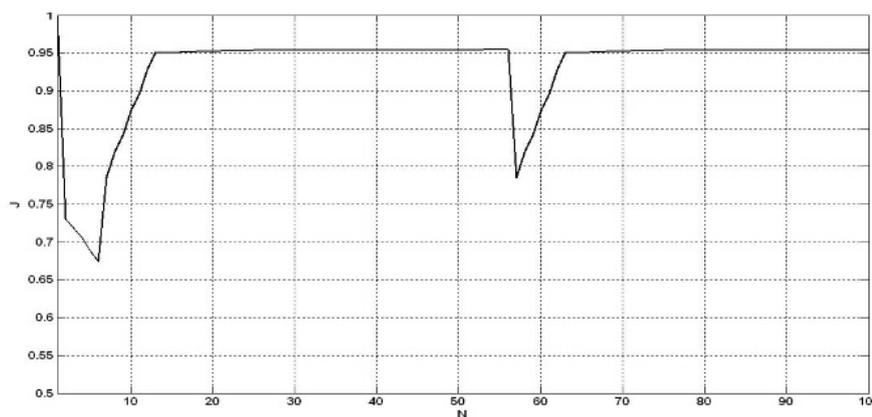


Рис. 3. Потеря монотонности

Процесс компенсации сопровождается построением модели сцены на основе наиболее близких эталонов или их комбинаций с формированием логического описания сцены [3]. Критерий близости для фрагмента изображения выбран с учетом неотрицательности оптического сигнала F . Для сокращения процедуры использована разновидность преобразования Радона – проективное преобразование:

$$F_j = \sum_{i=1}^n f_{ij}; \quad F_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}; \quad F_{\max} = \sup(F_i \cup F_j). \quad (1)$$

Следовательно, оценка близости формируется простым соотношением с учетом ограничений по амплитуде проекций, что гарантирует от потери сходимости за счет несоответствия эталона:

$$S = \sum_{i=1}^n (2F_{\max} - F_i - F_j); \quad F_i < F_{\max}; \quad F_j < F_{\max}. \quad (2)$$

Так как процедура шаговая, минимальное значение критерия достигается за определенное количество шагов. Собственно, затраты управления определяются количеством шагов компенсации, однако в этом случае необходимо обеспечить одинаковый уровень компенсации для всех эталонов, что вызывает усложнение алгоритма. Для нормализации в начале процедуры использовано значение критерия $j = 1$:

$$S_{\min} = S_n / S_1. \quad (3)$$

Для получения более простого алгоритма в качестве оценки функционала затрат использовано произведение минимального полученного значения компенсации для j -го эталона S_j . Таким образом критерий близости принимает простой и удобный для вычисления вид

$$J = nS_{\min}. \quad (4)$$

Особенностью данного подхода является использование обратной связи, т.е. система строится по принципу компенсации отклонения и, следовательно, принципиально обладает свойством компенсации возмущений. Действительно, если система способна сгенерировать входной образ, то существует возможность безошибочной работы.

Целью исследований являлся анализ эффективности метода компенсаций информационных потоков системы генерации эталонного изображения необитаемого аппарата.

Материалы и методы исследования

При исследовании информационной технологии идентификации оптических образов в основу положен алгоритм компенсации информационных потоков, теория распознавания образов в задаче построения гипотезы, теория инвариантности при решении задачи повышения помехоустойчивости.

Результаты

Для проверки работоспособности метода проведено моделирование системы с использованием градиентной процедуры в задаче компенсации входного изображения (рис. 4).



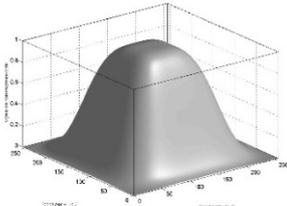
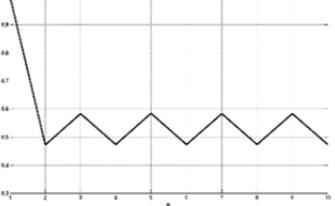
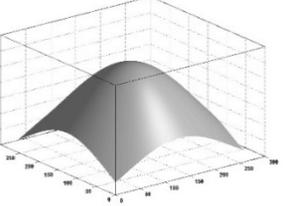
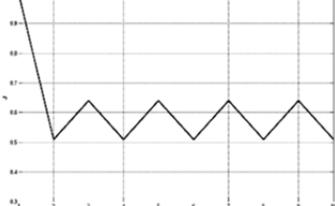
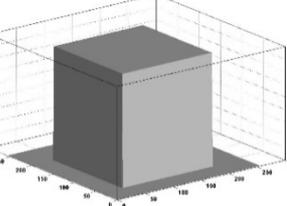
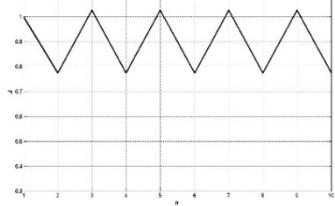
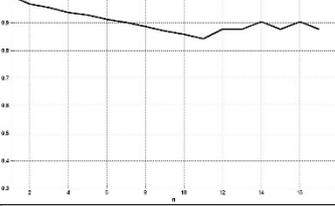
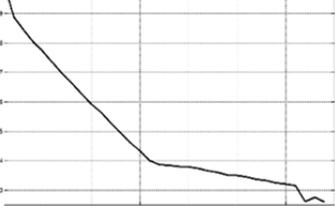
Рис. 4. Этапы компенсации изображения

Как видно, близость эталона к изображению – действительно, необходимое условие сходимости процесса компенсации. Следует обратить внимание на достаточную «грубость» эталона и хорошую разделимость эталонов. Основным достоинством процедуры является принципиальная инвариантность к изменению состава сцены и эволюциям объекта [4]. Данное свойство обеспечивается введением отрицательной обратной связи в структуру системы идентификации.

Результаты моделирования иллюстрируются для простейших эталонов на этапе выбора ближайшего эталона для простой сцены (табл. 1).

Таблица 1

Динамика процедуры компенсации (скриншоты MatLab)

Функция близости, эталон	Компенсация фрагмента	Зависимость критерия от шага
		
		
		
		
		

В табл. 2 приведены результаты шага процедуры для четырех эталонов, из которых третий эталон наиболее близко описывает элементы сцены.

Таблица 2

Оценка близости для различных эталонов

Эталон	1	2	3	4
Число шагов компенсации	34	52	7	21
Уровень компенсации	0,6374	0,6771	0,5025	0,9289
Функционал затрат	24,7611	35,8015	3,8236	18,8964

Отказ от постоянства конечного уровня компенсации при оценке близости эталона вносит неопределенность, и необходимо рассмотреть поведение системы для различных эталонов. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости критерия от шага процедуры для четырех эталонов.

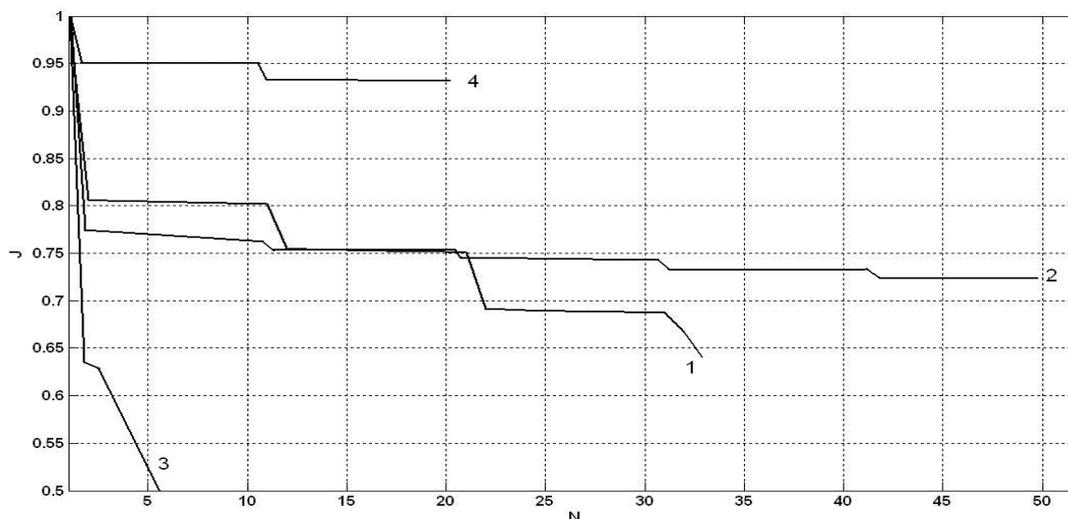


Рис. 5. Изменение оценки близости в процедуре для различных эталонов

Характерной особенностью полученных зависимостей является ступенчатый характер, обусловленный высокой эффективностью процедуры выбора начальной точки и незначительной эффективностью уточнения параметров модели.

Как видно из рис. 5, процедура сходится достаточно быстро, уже на пятом шаге алгоритма возможно принятие решения о принадлежности изображения к эталону.

При проведении эксперимента, в зависимости от весового коэффициента ρ_k , получаем быстро сходящийся монотонный процесс, возникающий при оптимальном выборе весового коэффициента (рис. 6).

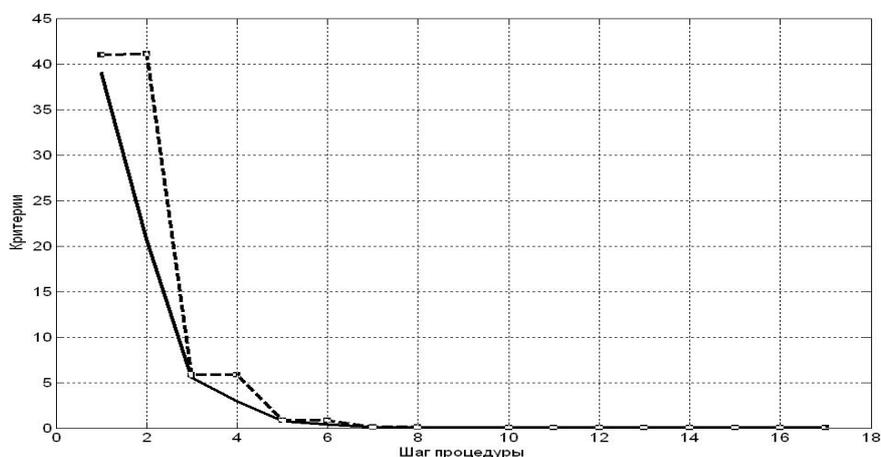


Рис. 6. Монотонная сходимость

При приближении к границе сходимости наблюдается возникновение колебаний (рис. 7).

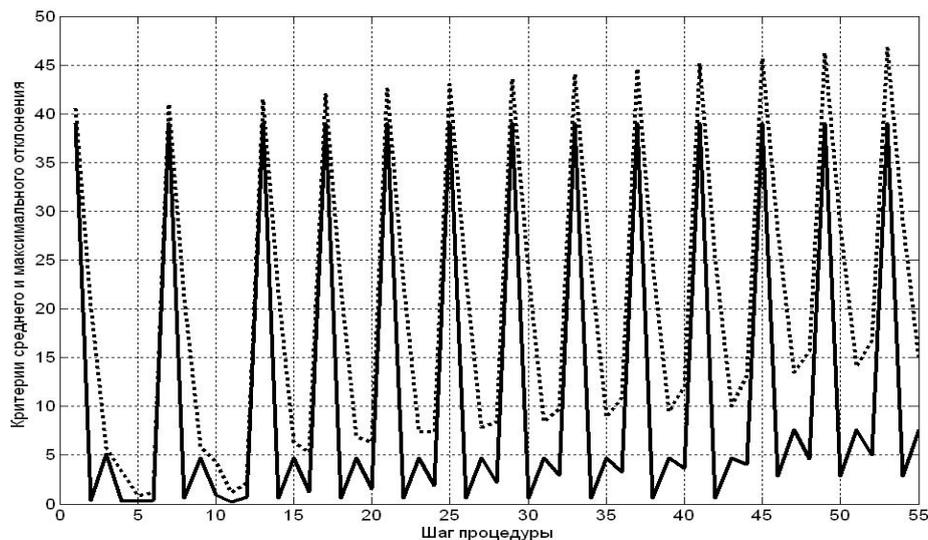


Рис. 7. Возникновение колебаний на границе устойчивости процедуры

Собственно, возникновение колебаний связано с остаточной ошибкой компенсации. Действительно, остаточная ошибка имеет место в любом случае. Процесс компенсации остаточной ошибки может вести к монотонному уменьшению ошибки или происходит накопление ошибки и колебания [5]. Как видно из полученных откликов, в системе происходит последовательное устранение ошибки компенсации. При превышении критического значения коэффициента веса система теряет сходимость и ошибка начинает стремиться к бесконечности (рис. 8).

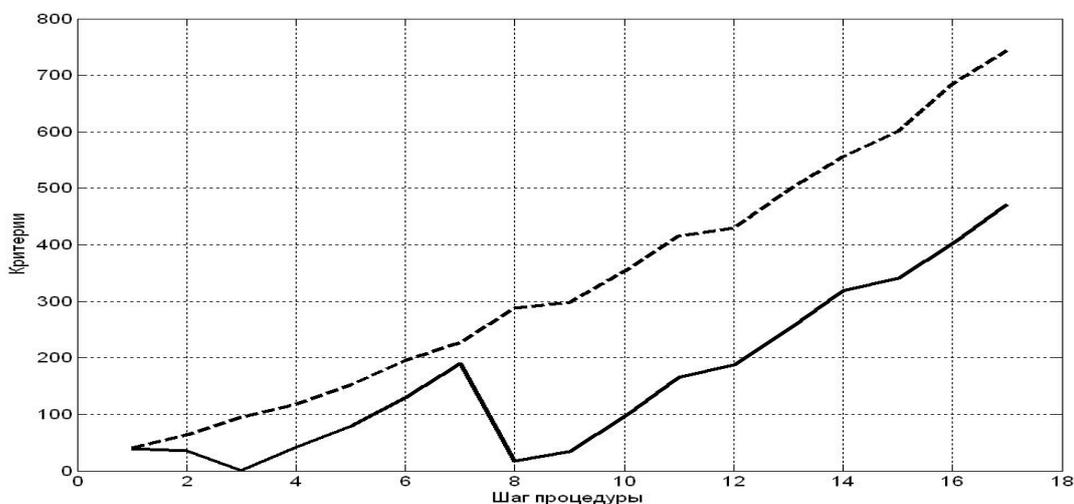


Рис. 8. Потеря сходимости

Таким образом, можно сделать вывод – система обладает свойством сходимости при выполнении следующих условий:

- эталон соответствует изображению объекта;
- движение эталона начато из начальной точки, удовлетворяющей условию

$$f - f^*(\omega, \omega(u)) < 0. \quad (5)$$

Для изображений, близких к эталону, сходимость процедуры монотонная. В работе проведено исследование эффективности метода компенсации информационных потоков для акустических сигналов с наилучшими корреляционными свойствами [6].

Полученные значения оценок гипотез по сравнению с корреляционным методом приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения оценок гипотез

Номер гипотезы	1	2	3	4
Значение корреляционной функции	0,8611	0,6653	0,07091	0,4041
Затраты на управление	1,69	83,28	72,03	60,64

Таким образом, для корреляционной меры максимальное расстояние составляет между образами 12,14 и для оценки по затратам управления максимальное расстояние составляет 49,28, что в 4,02 раза превышает результат для корреляционной меры.

Обсуждение

Моделирование работы системы выполнено по алгоритму, приведенному на рис. 9.

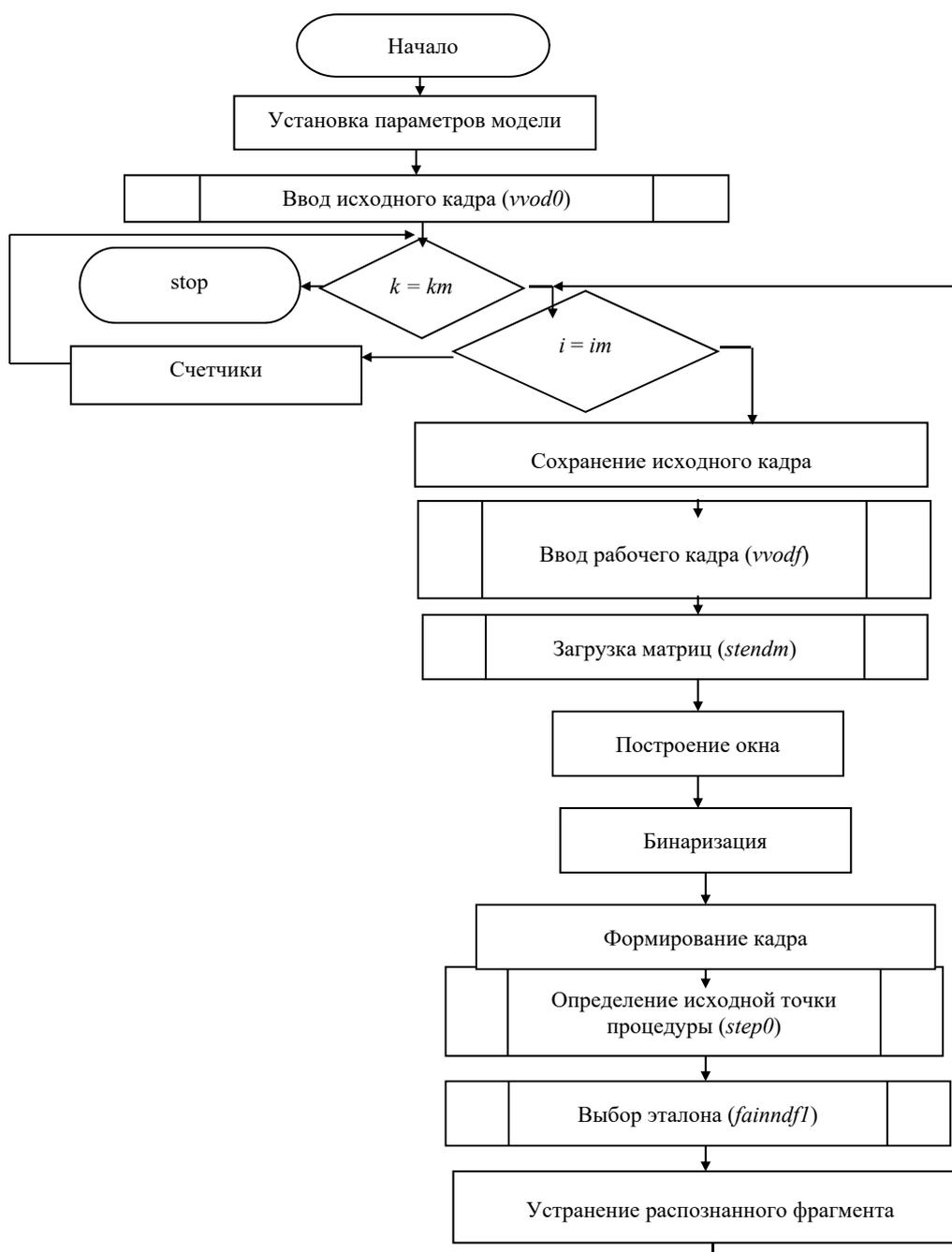


Рис. 9. Фрагмент алгоритма фрагментации кадра и идентификации образа

Алгоритм предусматривает выполнение операций фрагментации и идентификации элементов сцены по заданным эталонам [7, 8]. В данном участке алгоритма рассматривается процедура фрагментации изображения сцены и выделения областей, содержащих изображения объектов. Данная процедура является одной из основных в процессе идентификации оптических образов, так как представляет базовую процедуру поиска объекта в изображении сцены. В соответствии с приведенным алгоритмом в начале процедуры происходит установка параметров модели, т.е. строится гипотеза о наличии в кадре тех или иных объектов. Затем вводится исходный кадр и производится его обработка. Строятся матрицы проекций кадра и вычисляются области интереса. Затем строится рабочий кадр гипотезы и производится вычитание. Если результат сравнения исходного кадра с рабочим неудовлетворителен – процедура повторяется для новой гипотезы. Результаты работы подпрограммы выделения фрагмента изображения и построения матрицы проекций приведены на рис. 10. На рисунке виден выделенный программой контур фигуры человека и матрицы проекций.

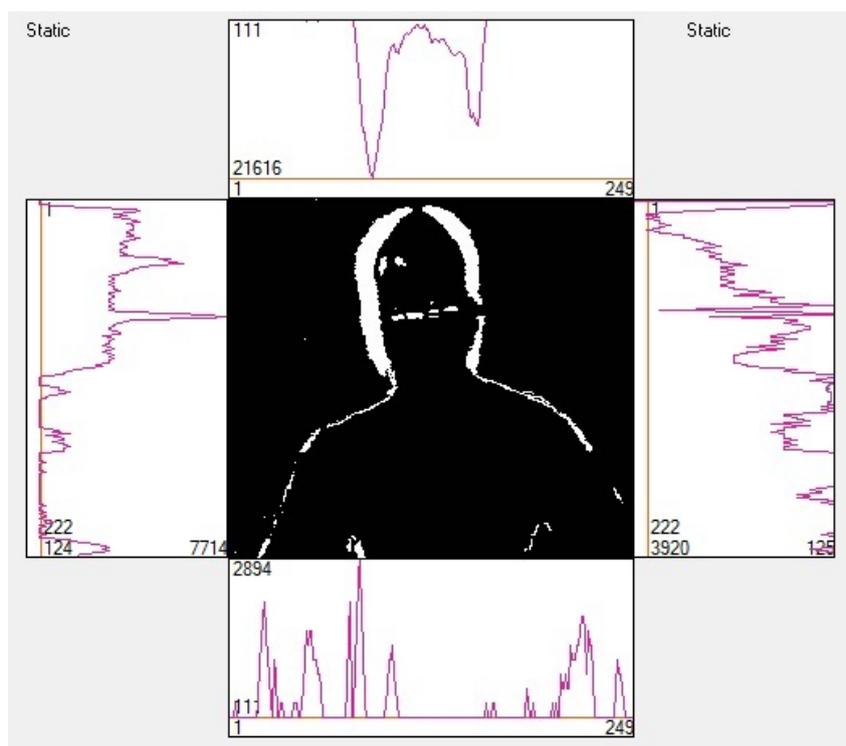


Рис. 10. Результат работы подпрограммы выделения фрагмента и построения матрицы проекций (скриншот MatLab)

Подпрограмма генерации эталона построена на основе последовательного накопления фрагментов изображения [9]. Существенной особенностью используемого алгоритма является использование в нем операции выдачи нулевых – рекомендуемых управлений.

В данной подпрограмме происходит формирование эталонного изображения объекта из скелетного графа и функций принадлежности, покрывающих ветви графа. Выбор скелетного графа производится в соответствии с первоначальной гипотезой. Управление эталоном производится модификацией матрицы коэффициентов аффинного преобразования [9].

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы: использование критерия минимальных затрат управления при экспоненциальной сходимости обеспечивает оптимальность управления по Беллману; наличие отрицательной обратной связи в процедуре идентификации изображения объекта по отношению к эталону позволяет реализовать процедуру не чувствительную к возмущениям в пространстве объектов. Использование в информационной технологии идентификации оптических образов критерия минимума затрат управления обеспечивает большее расстояние в пространстве сигнала, чем корреляционная мера.

Список литературы

1. Кульба В. В. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов // Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН. М. : Наука, 2006. 579 с.
2. Муравьев Е. А. Один подход к управлению информативностью признаков в распознавании образов // Искусственный интеллект. 2002. № 4. С. 493–498.
3. Жиленьков А. А., Титов И. Л., Черный С. Г. Моделирование процесса повышения надежности автоматических систем управления в автономных системах объектов морского транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 4. С. 198–207.
4. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. Киев : Слово, 2008. 344 с.
5. Рожнецов А. А. Предельно достижимые возможности при распознавании многомерных сигналов // Математические методы распознавания образов ММРО-11 : тр. Всерос. конф. Пушкино, 2003. С. 169–171.
6. Розенфельд А., Дейвис Л. С. Сегментация и модели изображений // Труды Института инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1979. Т. 67, № 5. С. 71–82.
7. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1247–1252.
8. Горева Т. И. Нейросетевые модели диагностики технических систем // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2012. № 1. С. 31–43.

References

1. Kul'ba V.V. Theoretical foundations of designing information and control systems of spacecraft. *Institut problem upravleniya imeni V. A. Trapeznikova RAN = V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences*. Moscow: Nauka, 2006:579. (In Russ.)
2. Murav'ev E.A. One approach to managing the informativeness of features in pattern recognition. *Iskusstvennyy intellekt = Artificial intelligence*. 2002;(4):493–498. (In Russ.)
3. Zhilenkov A.A., Titov I.L., Chernyi S.G. Modeling of the process of increasing the reliability of automatic control systems in autonomous systems of marine transport facilities. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova = Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2015;(4):198–207. (In Russ.)
4. Zaychenko Yu.P. *Nechetkie modeli i metody v intellektual'nykh sistemakh = Fuzzy models and methods in intelligent systems*. Kiev: Slovo, 2008:344. (In Russ.)
5. Rozhentsov A.A. Extremely achievable capabilities in the recognition of multidimensional signals. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov MMRO-11: tr. Vseros. konf. = Mathematical methods of pattern recognition MMRO-11: proceedings of the All-Russian conf. Pushchino, 2003*:169–171. (In Russ.)
6. Rozenfel'd A., Deyvis L.S. Segmentation and image models. *Trudy Instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike = Proceedings of the Institute of Electronics and Radio Electronics Engineers*. 1979; 67(5):71–82. (In Russ.)
7. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology. *Procedia Engineering*. 2015;100:1247–1252.
8. Goreva T.I. Neural network models of diagnostics of technical systems. *Vestnik KRAUNTS. Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences*. 2012;(1):31–43. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Александр Александрович Железняк**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования судов
и автоматизации производства,
Керченский государственный морской
технологический университет
(Россия, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)
E-mail: zheleznyak13@mail.ru

Aleksandr A. Zhelezniak

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department of electrical
equipment of ships and industrial automation,
Kerch State Marine Technological University
(82 Ordzhonikidze street, Kerch, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 22.03.2021

Принята к публикации/Accepted 23.03.2021

УДК 681.518.3
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

В. А. Баранов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
baranov_va2202@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Производство высокотехнологичных изделий микроэлектроники, приборостроения, электротехники, машиностроения с требуемыми функциональными свойствами невозможно без оперативного управления технологическим процессом на основе достоверной измерительной информации о ходе каждой технологической операции и текущем состоянии изделия. Целью работы являлась разработка информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса производства изделий с гетерогенной структурой. *Материалы и методы.* Разработка канала измерения составляющих комплексного сопротивления объекта измерения и напряжения на нем системы управления технологическим процессом изготовления изделий с гетерогенной структурой осуществлена на основе современной парадигмы материаловедения методом системного анализа. *Результаты.* Показана возможность оперативного получения информации о разнородных показателях текущего состояния полуфабриката изделия и многооперационного технологического процесса путем измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления объекта с гетерогенной структурой. Разработаны структурная схема и алгоритм функционирования универсального измерительного канала информационно-управляющей системы. *Вывод.* Разработана информационно-управляющая система, реализующая оригинальный способ активного контроля многопараметрических объектов по разнородной информации в ходе технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой. Коррекция разнородных параметров и характеристик каждой технологической операции непосредственно в ходе ее выполнения становится возможной при выборе в качестве универсальной измеряемой величины параметров комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем. Формирование управляющих воздействий осуществляется на основе уравнений связи функциональных параметров и характеристик изделия и технологической операции с параметрами и характеристиками их нелинейного импеданса, которые вносятся в базу данных подсистемы управления. Применение системы обеспечит высокое качество продукции высокотехнологичных отраслей промышленности.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, информационно-измерительная система, активный контроль, измерительный контроль, многопараметрический контроль, гетерогенная структура, измерения параметров комплексного сопротивления

Для цитирования: Баранов В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. С. 20–29. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PRODUCTION OF PRODUCTS WITH A HETEROGENEOUS STRUCTURE

V.A. Baranov

Penza State University, Penza, Russia
baranov_va2202@mail.ru

Abstract. *Background.* The production of high-tech products of microelectronics, instrument making, electrical engineering, mechanical engineering with the required functional properties is impossible without operational control of the technological process based on reliable measuring information about the progress of each technological operation and the current state of the product. The aim of the work was to develop an information and control system for active

control of the technological process of manufacturing products with a heterogeneous structure. *Materials and methods.* The development of a channel for measuring the components of the measurement object complex resistance and the voltage on it of the control system for the technological process of manufacturing products with a heterogeneous structure was carried out on the basis of the modern paradigm of materials science by the method of system analysis. *Results.* An information and control system has been developed that implements an original method of active control of multiparametric objects using heterogeneous information during the technological process of manufacturing a product with a heterogeneous structure. Correction of dissimilar parameters and characteristics of each technological operation directly during its execution becomes possible when choosing the parameters of the complex resistance of the object and the voltage on it as a universal measured value. The formation of control actions is carried out on the basis of the equations for the relationship of functional parameters and characteristics of the product and the technological operation with the parameters and characteristics of their nonlinear impedance, which are entered into the database of the control subsystem. Application of the system will ensure high quality of products of high-tech industries.

Keywords: information and control system, information and measurement system, active control, measurement control, multivariate control, heterogeneous structure, measurements of complex resistance parameters

For citation: Baranov V. A. Information and control system for active control of technological processes for production of products with a heterogeneous structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):20–29. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

Введение

Придание изделию определенных функциональных свойств, таких как твердость, коррозионная стойкость, термостойкость, пористость и т.д., является целью технологических процессов электроники, приборостроения, машиностроения [1]. Изделия с гомогенной структурой во многих случаях не удовлетворяют всей совокупности предъявляемых к ним требований. В связи с этим разрабатываются технологические процессы, формирующие гетерогенные структуры, которые обладают функциональными свойствами, недостижимыми при использовании однородных материалов.

Проф. Л. И. Тушинский сформулировал базовый принцип современного материаловедения [2]: **от микроструктуры материала к его макросвойствам**. Получение требуемого функционального свойства изделия достигается формированием определенной микроструктуры материала. Из данного принципа следует, что все макросвойства изделия взаимосвязаны, поскольку определяются его составом и микроструктурой. Микроструктура и макросвойства связаны через мезоуровень, на котором выделяется конечное счетное число различаемых компонентов структуры изделия. Данная формулировка принципа указывает путь придания изделию требуемого свойства, но не отражает определяющее влияние состава материала на свойства изделия и не указывает способ получения необходимой микроструктуры.

А. Д. Верхотуров, Б. Я. Мокрицкий и Д. А. Пустовалов предложили пятизвенную формулу парадигмы материаловедения [3]: **«методология и метод исследования – состав – структура – технология – свойства»**. В рамках данной парадигмы качество изделия как наличие требуемых функциональных свойств достигается формированием соответствующей структуры материала определенного состава в ходе научно обоснованного технологического процесса.

Качественная и количественная информация о свойствах материалов, полученная в ходе исследований выбранным методом, является теоретической основой разработки технологического процесса производства изделий с заданными функциональными свойствами. Достижение высокого качества изделий невозможно без регулирования большого числа разнородных параметров технологического процесса на основе оперативно получаемой измерительной информации о их текущих значениях, т.е. активного измерительного контроля, из-за нестабильности параметров и характеристик сырья, оборудования, среды и неполноты информации о ходе технологического процесса.

По аналогии с формулой материаловедения формула технологического процесса может быть сформулирована в следующем виде: **«метод изготовления – состав – структура – технология с активным контролем – целевое свойство изделия»**. В соответствии с этой формулой разработка информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса является обязательным этапом проектирования высокоэффективных производственных линий.

Технологический процесс с активным пооперационным измерительным контролем

Технологический процесс представляет собой последовательность технологических операций, в ходе которых сырье, полуфабрикаты подвергаются механическим, химическим, электрическим, тепловым, радиационным и другим физическим воздействиям, направленным на формирование определенного состава и гомогенной (однотипные мезокомпоненты) или гетерогенной (мезокомпоненты нескольких типов) структуры изделия, что придает ему целевое функциональное свойство.

Разделение структур материалов на гомогенные и гетерогенные производится на основе принципа суперпозиции. По отношению к структуре материала принцип суперпозиции формулируется следующим образом: уравнения, описывающие свойства материала, являются линейными по количеству мезокомпонентов. Принцип суперпозиции выполняется для объектов с гомогенной структурой и не выполняется для гетерогенных структур, поскольку уравнения поведения каждого типа мезокомпонентов отличаются друг от друга, и свойства материала различным образом нелинейно изменяются при изменении общего количества мезокомпонентов.

При представлении о технологическом процессе как о динамической системе принцип суперпозиции выполняется для линейных динамических систем с гомогенной структурой, что является теоретической основой решения задач ее анализа. Знание переходной или импульсной характеристики линейной динамической системы позволяет определить реакцию системы на произвольное воздействие.

На рис. 1 представлена структура технологического процесса изготовления изделия с заданными функциональными свойствами с активным пооперационным контролем. Активный пооперационный контроль обеспечивается введением в состав технологической линии многоконтурной информационно-управляющей системы (ИУС). Каждый контур ИУС управляет проведением соответствующей технологической операции и включает в себя измерительный канал (ИК) и управляющий канал (УК). Объединение контуров в систему достигается подключением всех каналов к подсистеме обработки контрольно-измерительной информации, которая состоит из блока обработки измерительной информации, блока формирования команд управления и базы данных.

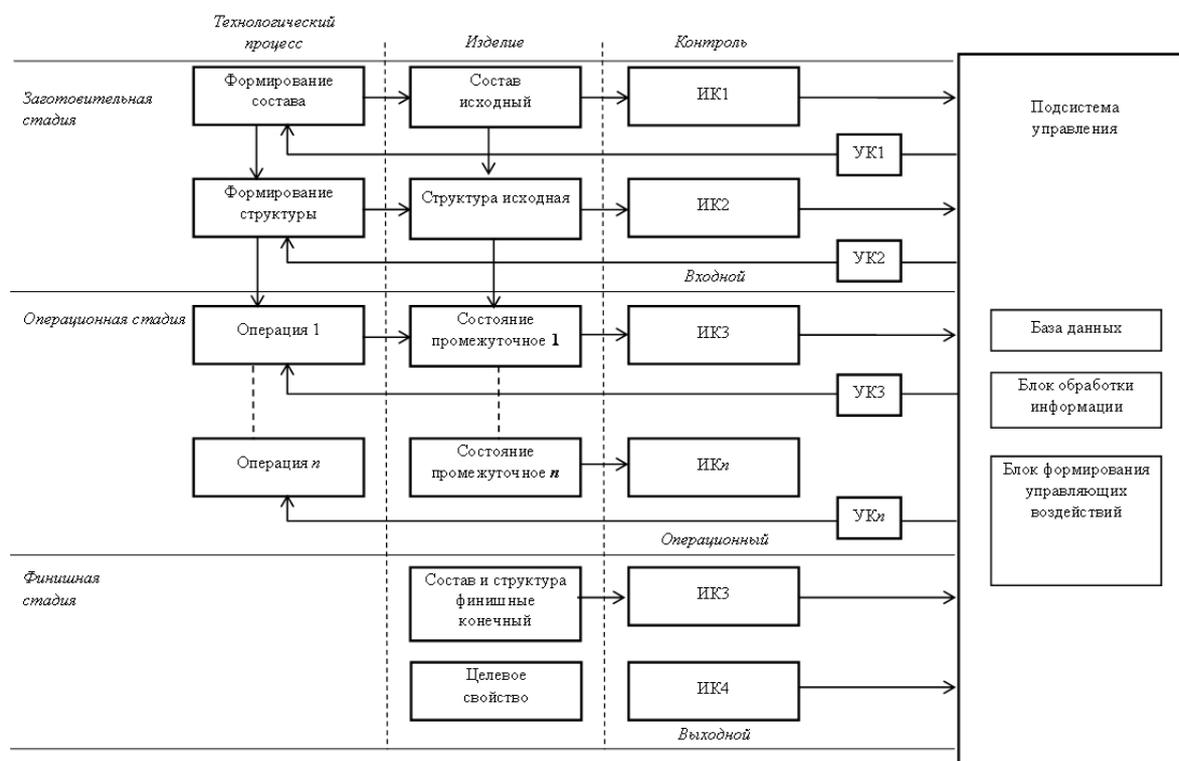


Рис. 1. Информационно-управляющая система технологического процесса с активным измерительным контролем

По типу решаемых измерительных задач технологический процесс делится на три стадии. На заготовительной стадии формируются исходные состав и структура сырья. Качество применяемых материалов подтверждается сертификатами соответствия, выданными по результатам измерений, выполненных по стандартизованным методикам измерений. В базу данных подсистемы управления заносится информация о номинальных значениях параметров и номинальных характеристиках изделия и технологического процесса для каждой технологической операции, а также математические модели их взаимосвязей. Так, например, база данных [4] содержит информацию о процессе микродугового оксидирования (МДО) в виде экспоненциальных регрессионных уравнений связи параметров МДО – процесса и изделия. Модели синтезированы на основе результатов математического моделирования процесса формирования оксидных покрытий и результатов измерений, выполненных на экспериментальной установке в ходе отработки МДО-процесса. Модели описывают зависимости параметров покрытия от типа сплава, концентраций силиката натрия и гидроксида калия, толщины покрытия.

На операционной стадии последовательно осуществляются технологические операции, целенаправленно трансформирующие состояние полуфабриката в направлении придания изделию требуемого функционального свойства. Параметры каждой операции и полуфабриката изделия измеряются соответствующим измерительным каналом (ИК) системы. Полученная измерительная информация совместно с информацией, накопленной в базе данных, обрабатывается блоком обработки информации, который вырабатывает команды управления исполнительным устройством (ИУ). Исполнительное устройство оказывает на процесс однородное или комбинированное физическое воздействие, изменяющее параметры процесса до достижения им требуемого состояния.

Задачей измерительного контроля на финишной стадии является оценивание качества изделия путем подтверждения наличия у изделия целевого функционального свойства в степени, соответствующей установленным требованиям. Измерения проводятся по стандартизованным методикам измерений. Стандартизованные методы реализуются относительно дорогостоящим специализированным лабораторным оборудованием, измерения часто требуют высокой квалификации оператора и значительного времени. Это не позволяет использовать измерительное оборудование, применяемое на заготовительной и финишной стадиях технологического процесса, на операционной стадии.

Комплексный контроль состояния многопараметрического объекта по разнородной измерительной информации

В процессе выполнения каждой технологической операции операционной стадии измеряются разнородные параметры полуфабриката изделия и технологического процесса, влияющие на качество изделия. Результаты измерений используются для комплексного измерительного контроля состояния системы «технологический процесс – изделие», которая рассматривается как многопараметрический объект контроля [5].

Управление технологическим процессом основано на отнесении текущего состояния объекта контроля к одному из следующих качественно различных состояний: нормальное, допустимое, критическое, аварийное. Границами состояний являются предварительно определенные значения частных и комплексных показателей. Текущее состояние объекта определяется путем обработки комплекса значений измеряемых параметров объекта и сравнения показателей с их номинальными значениями.

При пооперационном измерительном контроле технологического процесса под нормальным состоянием реализации технологической операции понимается отсутствие необходимости в корректирующем воздействии на процесс. Допустимым считается состояние технологической операции, при котором возврат в нормальное состояние возможен в течение текущей технологической операции при определенных управляющих воздействиях на процесс. Критическое состояние процесса характеризуется тем, что формирование у готового изделия целевых свойств возможно только при воздействиях на процесс при выполнении всех последующих технологических операций. Аварийное состояние процесса определяется невозможностью всеми имеющимися управляющими воздействиями вернуть процесс в нормальное состояние до его окончания.

Контроль динамики технологического процесса осуществляется путем циклического повторения всех контрольно-измерительных операций через определенные интервалы времени и сопоставления результатов контроля в соседних циклах.

Выбор измеряемых параметров при активном измерительном контроле технологического процесса

Актуальной задачей метрологического обеспечения технологических процессов является разработка методов и средств оперативного измерения параметров и определения характеристик полуфабриката изделия на операционной стадии непосредственно в ходе технологической операции в режиме реального времени. Полуфабрикат изделия не обладает целевым функциональным свойством, поскольку соответствующая микроструктура еще не сформирована. Следовательно, для управления технологическим процессом необходимо контролировать такое свойство изделия, которым оно обладает на всех стадиях технологического процесса и которое функционально связано с целевым свойством. Параметры и характеристики изделия, отражающие это свойство, должны оперативно измеряться в ходе технологического процесса. При этом должны быть известны функции связи измеряемых параметров изделия и технологического процесса с физической величиной, отражающей целевое свойство изделия.

Сформулированным требованиям к контролируемому свойству удовлетворяет электропроводность. Это свойство присуще всем без исключения физическим компонентам технологического процесса на всех его стадиях. Электропроводность описывается пассивными электрическими величинами (емкость, индуктивность, активное сопротивление) и комплексным электрическим сопротивлением.

Выбор параметров комплексного сопротивления в качестве величин, измерение которых позволяет осуществлять измерительный контроль всех операций технологического процесса, предъявляет определенные требования к содержимому базы данных системы управления. Для реализации предлагаемого подхода в состав технологического оборудования должны быть включены средства измерений параметров комплексного сопротивления с соответствующими метрологическими характеристиками. Базу данных ИУС необходимо дополнить математическими моделями связи регулируемых параметров и характеристик технологической операции с параметрами и характеристиками комплексного сопротивления ее материальных компонентов.

Измерения параметров комплексного сопротивления гомогенных объектов

При измерениях параметров объектов с гомогенной структурой используется алгебраическое представление комплексного сопротивления $\dot{Z}_x = R_x + jX_x$, где R_x и X_x – активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления соответственно; j – мнимая единица. Использование исключительно алгебраического представления обусловлено тем, что периодическое напряжение, подаваемое средством измерений на объект измерения может иметь как синусоидальную, так и несинусоидальную форму. При этом подразумевается, что принцип суперпозиции выполняется.

Моделью объекта измерения с гомогенной структурой является линейная многоэлементная двухполюсная электрическая цепь (МДЭЦ) с параллельно-последовательным соединением пассивных электрических элементов трех видов: конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы. Моделирование основано на постулировании связи значения пассивной электрической величины с соответствующим параметром объекта измерения. Параметры МДЭЦ считаются линейными, т.е. независимыми от амплитуды приложенного к ней напряжения. Амплитудно-фазовая частотная характеристика является дробно-полиномиальной функцией частоты напряжения питания измерительной схемы.

С позиции метрологии достоинством линейных МДЭЦ является наличие мер пассивных электрических величин (сопротивление постоянному току, электрическая емкость, индуктивность) с нормированными метрологическими характеристиками. Меры пассивных электрических величин используются при синтезе измерительных схем в качестве опорных элементов. По результатам инвариантных измерений параметров элементов линейной МДЭЦ с известной структурой определяются параметры гомогенной структуры на основе предварительно теоре-

тически или экспериментально определенных функциональных связей параметров элементов МДЭЦ и параметров структуры.

На рис. 2 представлена обобщенная функциональная схема измерительного канала ИУС многопараметрического контроля объекта с гомогенной структурой, моделью которого является линейная МДЭЦ.

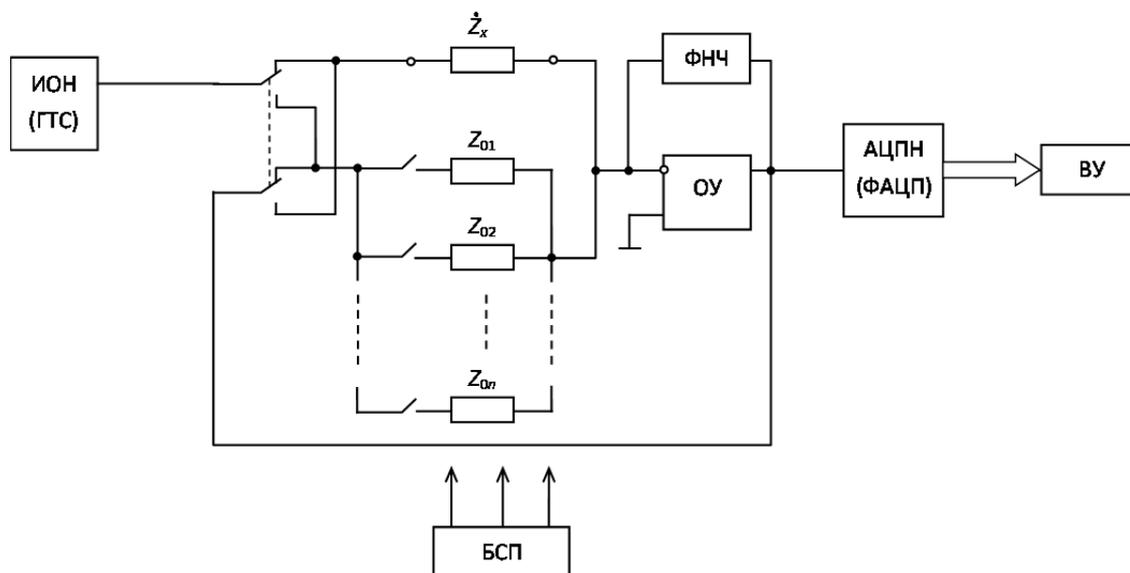


Рис. 2. Измерительный канал ИУС активного измерительного контроля объекта с гомогенной структурой

Основой канала является устройство для определения параметров МДЭЦ [6], которому приданы системные свойства адаптивности и самокалибровки [7]. Устройство составляют активная измерительная схема (ИС) в виде инвертирующего усилителя, состоящего из операционного усилителя (ОУ), фильтра низких частот (ФНЧ), опорных пассивных элементов электрической цепи \dot{Z}_{on} и объекта измерения с комплексным сопротивлением \dot{Z}_x , источника опорного напряжения (ИОН) или блока формирования частотно-временных интервалов (БФЧВИ), АЦП напряжения [6] или фазочувствительного АЦП (ФАЦП) и блока самоповерки (БСП) [7]. Результаты аналого-цифрового преобразования обрабатываются вычислительным устройством (ВУ), которое формирует результаты инвариантного измерения в виде совокупности значений параметров элементов МДЭЦ.

Структура канала адаптируется к принятой МДЭЦ: выбирается место включения МДЭЦ в активную ИС (на входе активной ИС или в цепи ее обратной связи), форма напряжения питания ИС (меандр, треугольная, пилообразная, синусоидальная), выбирается структура ИС и алгоритм самокалибровки. Согласно [6], при модели с параллельным соединением элементов объект измерения включается на входе ИС, а при модели с последовательным соединением элементов – в виде отрицательной обратной связи инвертирующего усилителя. Программное обеспечение измерительного канала позволяет ПЭВМ вычислять значения параметров МДЭЦ.

Измерения параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов

Имеются качественные различия между однородными свойствами гомогенных и гетерогенных объектов. Параметры и характеристики объектов с гетерогенной структурой не подчиняются принципу суперпозиции. В отношении электропроводности качественное различие состоит в том, что в гетерогенных структурах, кроме электронной проводимости, имеет место ионная и молионная электрическая проводимость. Наличие нескольких типов электрической проводимости вызывает нелинейность электрического сопротивления и принципиальные изменения вида частотных характеристик. Комплексное сопротивление является функцией амплитуды синусоидального напряжения на объекте измерения. Комплексное сопротивление объектов с гетерогенной структурой не подчиняется принципу суперпозиции, поэтому на из-

мерительную схему корректно подавать только синусоидальное напряжение, и задачу измерения параметров комплексного сопротивления объектов с гетерогенной структурой следует рассматривать как задачу импедансометрии.

Линейная МДЭЦ, составленная из элементов трех традиционных видов, не является адекватной моделью объекта с гетерогенной структурой при решении многих измерительных задач. В связи с этим в электрохимии и других отраслях при синтезе МДЭЦ используется расширенная элементная база. К традиционным элементам добавляются виртуальные элементы: импеданс Варбурга, импеданс Геришера, импеданс постоянной фазы и др. За счет введения в схему таких элементов удастся получить АФЧХ модели, с допустимыми отклонениями воспроизводящую АФЧХ объекта измерения, полученную экспериментально.

Основной метрологической проблемой использования расширенной элементной базы является отсутствие стандартизованных мер виртуальных элементов для использования в качестве опорных элементов измерительных схем. Базис опорных элементов при разработке средств измерений параметров гетерогенных структур составляют, как и для средств измерений параметров гомогенных структур, традиционные пассивные электронные компоненты. Отсюда следует, что модель объекта измерения с гетерогенной структурой должна быть совместима и с традиционными, и с виртуальными элементами МДЭЦ. Такой моделью является одиночный электрический элемент с комплексным электрическим сопротивлением (импедансом) \dot{Z}_X . Математической моделью элемента является комплексное число в тригонометрической форме $\dot{Z}_X = z_X \cos \varphi_X + jz_X \sin \varphi_X$, где z – модуль комплексного числа, φ – фазовый сдвиг между двумя синусоидальными сигналами с равной частотой.

Прямая задача импедансометрии объекта с гетерогенной структурой состоит в определении путем измерений СКС следующих характеристик:

- частотная характеристика $X_X(\omega) = f[R_X(\omega)]$ (диаграмма Найквиста), где ω – круговая частота, при фиксированных значениях амплитуды напряжения U_X на объекте измерения и температуры Θ_X объекта измерения (импедансная спектроскопия);
- температурная характеристика $X_X(\Theta) = f[R_X(\Theta)]$ при фиксированных значениях напряжения U_X и круговой частоты ω (импедансная термоскопия);
- характеристика нелинейности $X_X(U_X) = f[R_X(U_X)]$ при фиксированных значениях круговой частоты ω и температуры Θ_X (импедансная вольтскопия).

Обратная задача импедансометрии объекта с гетерогенной структурой состоит в синтезе эквивалентной МДЭЦ из заданного элементного базиса по критерию совпадения диаграмм Найквистана. Единственность решения обратной задачи достигается использованием дополнительной информации с учетом дальнейшего использования результатов измерений. Обратная задача импедансометрии решается программными средствами.

На рис. 3 представлен универсальный измерительный канал ИУС технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой, который может использоваться для измерительного контроля всех технологических операций. Измерительный контроль параметров технологической операции и изделия основан на электрической модели объекта измерения в виде двухполюсной электрической цепи с нелинейным комплексным сопротивлением \dot{Z}_X и математической модели в тригонометрической или показательной формах.

Объект измерения включается с измерительную цепь, содержащую элементы коммутации. Элементы коммутации выполняют следующие функции: включение объекта измерения в измерительную схему; подключение мер пассивных электрических величин вместо объекта измерения в режиме самокалибровки измерительного канала; формирование оптимальной для текущей измерительной задачи структуры ИС: делитель напряжения или неуравновешенный мост.

Аналого-цифровой преобразователь составляющих комплексного сопротивления АЦП СКС совместно с ИС образует одну из базовых структурных схем устройства для измерения СКС [8]. При использовании измерительной схемы в виде делителя напряжения канал реализует способ измерения СКС двухполюсника и напряжения на нем, который позволяет осу-

ществлять импедансную спектроскопию и импедансную вольтскопию. Канал также позволяет, при необходимости измерять СКС при питании измерительной схемы от внешнего источника напряжения \dot{U}_s с ненормированными метрологическими характеристиками. Это достигается оригинальным алгоритмом аналого-цифрового преобразования напряжений на мерах пассивных электрических величин, включаемых в измерительную схему, и измерения частоты частотомером Ч [9].

Устройство управления УУ АЦП СКС управляет как процессом аналого-цифрового преобразования, так и цифроаналоговым преобразователем напряжения ЦАПН, формирующим напряжение питания ИС U_s . Коды результатов аналого-цифрового преобразования напряжения на элементах ИС и фазового сдвига между напряжениями, выполняемого аналого-цифровым преобразователем синусоидального напряжения АЦПН, поступают в вычислительное устройство ВУ АЦП СКС. ВУ АЦП СКС вычисляет значения активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления. Результаты измерений, полученные измерительным каналом, передаются подсистеме управления ИУС, которая использует измерительную информацию для управления технологическим процессом.

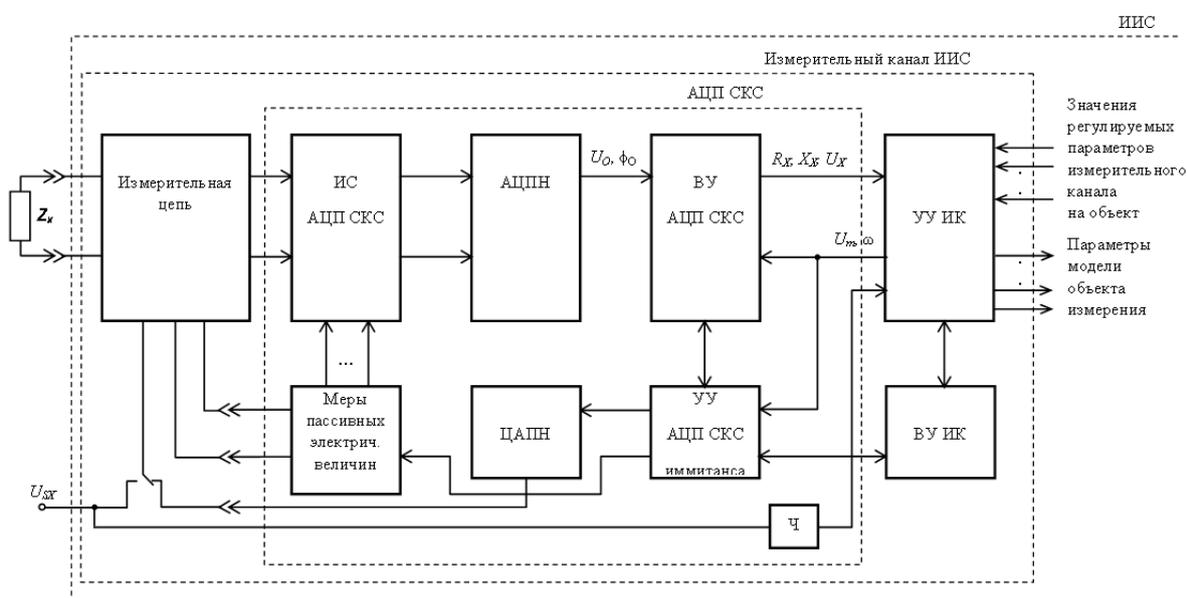


Рис. 3. Измерительный канал ИУС технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой

Заключение

Разработана информационно-измерительная система, предназначенная для функционирования в составе информационно-управляющей системы для управления многооперационным технологическим процессом в микроэлектронике, электрохимии, приборостроении. Информационно-измерительная система позволяет вести пооперационный активный измерительный контроль изготовления изделия с гетерогенной структурой. Предложен новый способ комплексного контроля многопараметрического объекта, позволяющий отнести текущее состояние объекта к одному из возможных четырех качественно различных видов состояния, обеспечивает гибкое управление технологическим процессом, чем обеспечивается стабильно высокое качество продукции. Коррекция разнородных параметров и характеристик каждой технологической операции непосредственно в ходе ее выполнения становится возможной при выборе в качестве универсальной измеряемой величины параметров комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем. Формирование управляющих воздействий осуществляется на основе уравнений связи функциональных параметров и характеристик изделия и технологической операции с параметрами и характеристиками их нелинейного импеданса, которые вносятся в базу данных подсистемы управления. Описана структура универсального измери-

тельного канала информационно-управляющей системы технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой.

Список литературы

1. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Токарев А. О., Синдеев В. И. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М. : Мир, 2004. 384 с.
2. Тушинский Л. И. Синергетические основы эволюции структур в современном материаловедении // Фракталы и прикладная синергетика : сб. тез. Первого междисциплинарного семинара (Москва, 18–21 октября 1999 г.). М., 1999. С. 17–18.
3. Верхотуров А. Д., Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А. Метод как основа новой парадигмы материаловедения // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 1. С. 14. URL: <https://readera.org/14340575>
4. Свидетельство о госрегистрации базы данных «Регрессионные модели взаимосвязей параметров МДО-процесса. Параметры, характеризующие пробой покрытий» / Печерская Е. А., Голубков П. Е., Сафронов М. И., Баранов В. А. № 2020621594 ; дата госрег. 31.08.2020. URL: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d02ac2ee1e2f805a9e1f9bdf8dcf01a2>
5. Патент № 2719467 Российская Федерация G06F 17/10 (2020.01); G06F 11/30 (2020.01). Способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации / Баранов В. А., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Герасимов А. И., Печерская Е. А., Шерстнев В. В. № 2019134726 ; заявл. 11.11.2019 ; опубл. 17.04.2020.
6. Мартяшин А. И., Светлов А. В. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симп. : в 2 т. Т. 2 / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. Пенза : ИИЦ ПГУ, 2003. С. 288–290.
7. Агамалов Ю. Р., Бобылев Д. А., Боровских Л. П., Кнеллер В. Ю. Виртуальный самоверяемый анализатор иммитанса с адаптивными функциональными возможностями // Датчики и системы. 2008. № 7. С. 21–27.
8. Баранов В. А. Систематизация способов измерения составляющих комплексного сопротивления по методу решения обобщенного уравнения мостовой цепи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 3. С. 110–120.
9. Патент № 2214609 Российская Федерация G 01 R27/02. Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем / Андрияшев А. А., Баранов В. А., Баранов Вл. А., Буц В. П., Недорезов В. Г., Шестернин А. Н. № 2001124545/09 ; заявл. 4.09.2001 ; опубл. 20.10.2003.

References

1. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniy materialov: struktura, svoystva i protsessy nanoseniya neorganicheskikh pokrytiy* = *Methods of materials research: structure, properties and processes of inorganic coatings application*. Moscow: Mir, 2004:384. (In Russ.)
2. Tushinskiy L.I. Synergetic foundations of the evolution of structures in modern materials science. *Fraktaly i prikladnaya sinergetika: sb. tez. Pervogo mezhdistsiplinarnogo seminara (Moskva, 18–21 oktyabrya 1999 g.)* = *Fractals and applied synergetics : a collection of theses. The first interdisciplinary seminar (Moscow, October 18-21, 1999)*. Moscow, 1999:17–18. (In Russ.)
3. Verkhoturov A.D., Mokritskiy B.Ya., Pustovalov D.A. Method as the basis of a new paradigm of materials science. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika* = *Materials Science News. Science and technology*. 2015;(1):14. (In Russ.). Available at: <https://readera.org/14340575>
4. *Svidetel'stvo o gosregistratsii bazy dannykh «Regressionnyye modeli vzaimosvyazey parametrov MDO-protsessa. Parametry, kharakterizuyushchie proboy pokrytiy»* = *Certificate of state registration of the database "Regression models of interrelations of the parameters of the MDO process. Parameters characterizing the breakdown of coatings"*. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Safronov M.I., Baranov V.A. No. 2020621594; 31.08.2020. (In Russ.). Available at: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d02ac2ee1e2f805a9e1f9bdf8dcf01a2>
5. Patent 2719467 Russian Federation G06F 17/10 (2020.01); G06F 11/30 (2020.01). A method for complex control of the state of a multiparametric object based on heterogeneous information. Baranov V.A., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Gerasimov A.I., Pecherskaya E.A., Sherstnev V.V. No 2019134726; appl. 11.11.2019; publ. 17.04.2020. (In Russ.)
6. Martyashin A.I., Svetlov A.V. Promising directions of development of meters of parameters of multi-element electric circuits. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubileynogo simp.: v 2 t. T. 2* = *Actual problems of science and education : tr. International. anniversary simp.: in 2 vol. Vol. 2*. Penza: IITs PGU, 2003:288–290. (In Russ.)

7. Agamalov Yu.R., Bobylev D.A., Borovskikh L.P., Kneller V.Yu. Virtual self-trusted Immitance Analyzer with adaptive functionality. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2008;(7):21–27. (In Russ.)
8. Baranov V.A. Systematization of methods for measuring the components of complex resistance by the method of solving the generalized equation of the bridge circuit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2008;(3):110–120. (In Russ.)
9. Patent 2214609 Russian Federation G 01 R27/02. A method for measuring the components of the complex resistance of a two-pole and the voltage on it. Andryushaev A.A., Baranov V.A., Baranov V.I.A., Buts V.P., Nedorezov V.G., Shesternin A.N. No. 2001124545/09; appl. 4.09.2001; publ. 20.10.2003. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Алексеевич Баранов

кандидат технических наук, доцент
кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: baranov_va2202@mail.ru

Viktor A. Baranov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 25.05.2021

Принята к публикации/Accepted 26.05.2021

УДК 621.317.7.089.6
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-4

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ

А. С. Ильин

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
aalexetil@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность разрабатываемой информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров определяется постоянно растущими требованиями к модернизации и совершенствованию метрологического обеспечения новых средств измерений высоких напряжений. Однако, кроме обеспечения требуемых метрологических характеристик, возникает необходимость обеспечения работоспособности системы при возникновении электрических пробоев изоляции цепей высокого напряжения, а также защиты персонала от поражения электрическим током. Рассмотрены технические мероприятия, касающиеся надежности и безопасности информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров. Целью работы является ознакомление с результатами разработки установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ, а также описание функционирования защиты от разрушения при возникновении электрических пробоев и персонала от поражения электрическим током. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи использовались требования нормативно-технических документов ГОСТ 12.3.019–80. *Результаты.* Разработана система защиты персонала от поражения электрическим током информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров УПК-30ПТ и повышена надежность при работе на высоком напряжении. *Вывод.* Положительные результаты работы открывают перспективу создания системы защиты для малогабаритных и автоматизированных информационно-измерительных систем с рабочими напряжениями до 100 кВ и более.

Ключевые слова: высокое напряжение, электроустановка, надежность, защита, управление, электрическая блокировка

Для цитирования: Ильин А. С. Технические средства защиты информационно-измерительной системы поверки киловольтметров // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. С. 30–38. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-4

TECHNICAL MEANS OF PROTECTION INFORMATION-MEASURING SYSTEM CALIBRATION OF KILOVOLT METERS

A.S. Ilin

Penza State University, Penza, Russia
Scientific Research Institute of Electro-Mechanical Devices, Penza, Russia
aalexetil@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the developed information and measuring system for calibrating kilovoltmeters is determined by the constantly growing requirements for the modernization and improvement of the metrological support of new high voltage measuring instruments. However, in addition to ensuring the required metrological characteristics, it becomes necessary to ensure the reliability of the system in the event of electrical breakdowns in the insulation of high voltage circuits, as well as to protect personnel from electric shock. This article discusses technical measures regarding the reliability and safety of the information-measuring system for checking the kilovoltmeters. *Materials and methods.* To solve this problem, the requirements of the normative technical documents GOST 12.3.019-80 were used. *Results.* In the course of the work, a system for protecting personnel from electric shock was developed for the information-measuring system for checking the UPK-30PT kilovoltmeters and the reliability was increased when operating at high voltage. *Conclusion.* The positive results of the work open up the prospect of creating a protection system for small-sized and automated information-measuring systems with operating voltages up to 100 kV and more.

Keywords: high voltage, electrical installation, reliability, security, management, electrical interlocking

For citation: Ilin A.S. Technical means of protection information-measuring system calibration of kilovoltmeters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):30–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-4

Создание и широкое применение в последние годы новых средств измерений высоких (до 30 кВ) напряжений классов 1, 0,5 % вызвало настоятельную необходимость модернизации и совершенствования не только их метрологического обеспечения, но и повышения надежности работы при возникновении аварийных ситуаций (пробоях изоляции и цепях высокого напряжения), а также совершенствование системы защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током [1].

Анализ нормативно-технической литературы позволил выделить ряд технических решений, которые были реализованы в информационно-измерительной системе для поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Структура комплексной защиты информационно-измерительной системы (ИИС) поверки киловольтметров изображена на рис. 1 [2].

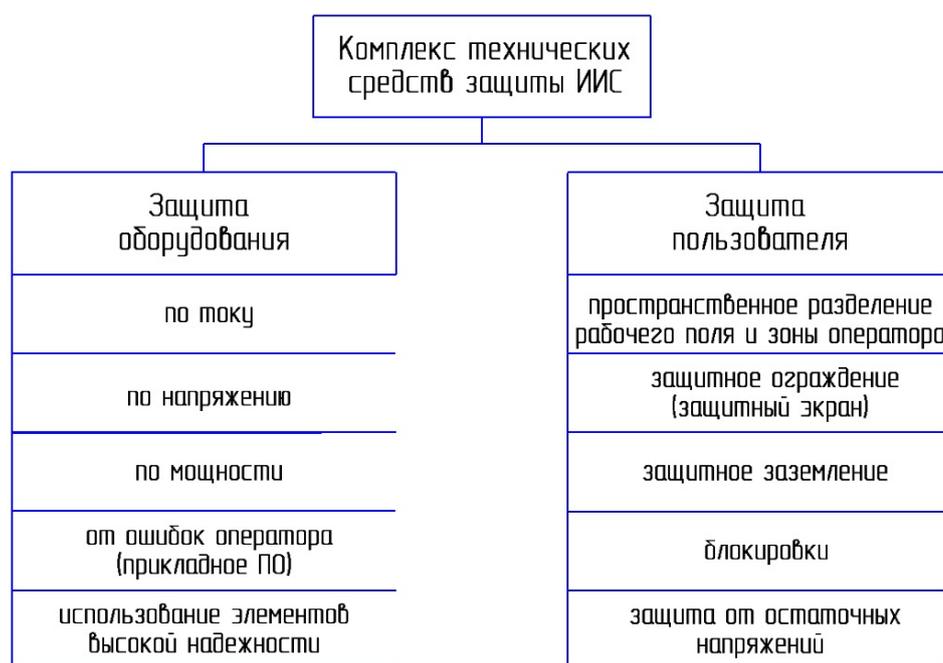


Рис. 1. Структура комплексной защиты ИИС поверки киловольтметров

Комплекс технических средств защиты ИИС подразделяется на средства защиты оборудования (столбец 1), обеспечивающие работоспособность ИИС, и средства защиты пользователя (столбец 2), обеспечивающие безопасность работы пользователя [3].

Защита оборудования включает: защиту по току, напряжению, мощности, от ошибок оператора (в прикладном ПО), а также благодаря использованию элементов высокой надежности.

Защита по току, напряжению и мощности

В соответствии с требованиями ГОСТ ИЕС 61010–2014 защита должна¹:

- при КЗ исключить переход в режим ограничения тока и обязана производить отключение высокого напряжения;
- при возникновении перенапряжений по высоковольтному выходу осуществлять выключение регулирующих элементов. При этом может быть дополнительно установлен разрядник, который включается между высоковольтным выходом и корпусом блока;

¹ ГОСТ ИЕС 61010-1-2014. Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования.

– при выделении в высоковольтной цепи энергии более 10–100 Дж производить отключение высокого напряжения.

Для защиты системы по току, напряжению и мощности выбран малогабаритный высоковольтный источник напряжения фирмы Spellman, который имеет защиту по указанным параметрам, но и возможность подключения блокировки [4].

Токовая защита выполнена с использованием контура стабилизации по току (режим стабилизации тока). Ограничение тока или его стабилизация на заданном уровне осуществляется путем сравнения сигнала ОС с управляющим токовым сигналом. В режиме стабилизации тока выходной ток источника ограничивается до заданного уровня даже в случае продолжительного короткого замыкания на выходе. В данном режиме блок питания работает на максимально допустимой для него мощности.

Дополнительно реализована защита по входному опорному напряжению. При возникновении перегрузок с помощью транзисторной оптопары происходит замыкание вывода на нулевую шину питания 0 В. Благодаря чему превышение опорного напряжения производит блокировку источника и отключение высокого напряжения.

Если мощность нагрузки превышает выходную мощность источника питания (обычно на 5–15 %), то срабатывает защита по мощности.

Защита в прикладном ПО

В качестве одной из мер по обеспечению безопасности системы служит программное обеспечение, являющееся управляющей программой [5].

ГОСТ Р МЭК 61508-3–2012 требует блокировать процессы выполнения задач (остановка выполнения программы) в случае ошибочных действий оператора.

При использовании ПК в программе управления реализованы блокировки от ошибочных действий оператора, а также аварийное ручное и автоматическое отключение высокого напряжения. В качестве ручного отключения высокого напряжения в ПО имеется кнопка аварийного выключения высокого напряжения «ОСТАНОВИТЬ».

ПО предусматривает защиту в случае неверно заданного управляющего напряжения для источника высокого напряжения. Для обеспечения безопасности при работе с высоким напряжением после каждой контрольной точки предусмотрено отключение высокого напряжения и переход установки в режим ожидания.

Элементы надежности

Наличие острых выступов на поверхности электродов, высоковольтной шины и болтов подключения могут создавать местные искажения электрического поля. Вследствие чего существует большая вероятность преждевременного коронирования и потери энергии. Для предотвращения повышения напряженности электрического поля и возникновения коронного разряда на рабочем поле шина высокого напряжения, электроды образцового делителя напряжения высоковольтного (ДНВ), а также болты подключения высоковольтных проводов имеют цилиндрическую форму с большим радиусом закругления.

Изоляция токоведущих частей электрического оборудования увеличивает безопасность, а также надежность работы электроустановок. Обеспечение надежности изоляции достигается: правильным выбором ее материала и геометрии (толщина, форма), обусловленной в первую очередь значением рабочего напряжения и конструкцией оборудования.

Токоведущая шина или шина высокого напряжения предназначена для подключения источника высокого напряжения и объектов нагрузки. Шина выполнена в виде медного металлического прутка, находящегося внутри диэлектрической трубы, концы которой закреплены к внутренним поверхностям боковых стенок камеры. В качестве материала диэлектрической трубы выбран полимер. Для повышения надежности конструкции между трубой и верхней стенкой камеры установлены две диэлектрические растяжки.

Источник высокого напряжения, являющийся частью системы, имеет изолированный высоковольтный провод для подключения к токоведущей шине. Высоковольтный провод источника представляет собой жилу (гибкая луженая медная проволока), с полупроводящим слоем и внешней основной изоляцией (силиконовая резина).

Также к токоведущей шине крепятся концы двух высоковольтных проводов, соединяющих шину с высоковольтными вводами образцового делителя напряжения высоковольтного и поверяемого делителя напряжения высоковольтного. В процессе работы выбраны силиконовые высоковольтные провода, применяемые в высоковольтных испытательных установках и позволяющие выдерживать напряжения до 100 кВ.

Защита пользователя представляет комплекс технических средств защиты при работе с высоким напряжением и относится непосредственно к безопасности системы. Учитывая правила по охране труда при эксплуатации электроустановок и требования ГОСТ 12.3.019–80, работа с напряжением выше 1000 В должна проводиться при наличии защитных ограждений рабочего поля с использованием защитного заземления, электрических блокировок, изоляции токоведущих частей, световой и звуковой индикации¹.

Защита пользователя включает в себя: пространственное разделение рабочего поля и зоны оператора, защитное ограждение, защитное заземление, блокировку, защиту от остаточных зарядов внутри ограждения².

Пространственное разделение рабочего поля и зоны оператора

В целях безопасности система делится на низковольтную (зона оператора) и высоковольтную (рабочее поле) части.

Зона оператора представляет собой рабочее место персонала и состоит из четырех блоков: ПК, образцового цифрового вольтметра, цифрового вольтметра поверяемого делителя напряжения высоковольтного и регулируемого источника опорного напряжения.

Высоковольтная часть устанавливается на рабочем поле и состоит из двух блоков: управляемого источника высокого напряжения, образцового делителя напряжений и поверяемого делителя напряжений высоковольтного.

Защитное ограждение

Защитные ограждения применяются для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям или приближения к ним на опасное расстояние. Ограждения могут быть выполнены в виде оболочек, барьеров, камер или отдельных помещений.

Для рассматриваемой ИИС разработана и выполнена экранированная измерительная камера, предназначенная для отделения электрических цепей и/или проводников от опасных токоведущих частей с помощью электрического защитного экрана, присоединенного к системе защитного уравнивания потенциалов и предназначенного для обеспечения защиты от поражения электрическим током. Камера выполнена в настольном исполнении и представляет собой электрический защитный экран.

С лицевой стороны камеры (для удобства эксплуатации) имеются двери, изготовленные из металлической сетки, для установки и наблюдения за поверяемым устройством.

В соответствии с п. 5.6 ГОСТ 12.3.019–80 расположение шины высокого напряжения выбрано так, что расстояние между шиной и металлическими частями корпуса и других заземленных элементов не менее 0,5 м для испытательного напряжения постоянного тока 30 кВ.

Источник расположен на недосягаемом для прикосновения оператором уровне в процессе эксплуатации установки. В центре камеры с учетом безопасного расстояния 0,5 м устанавливаются образцовый и поверяемый ДНВ.

Все низковольтные сигнальные и заземляющие провода, расположенные в экранированной измерительной камере, уложены в кабель-каналы.

Защитное заземление

Заземлением электроустановки называют преднамеренное электрическое соединение ее с заземляющим устройством. Заземляющее устройство состоит из заземлителя и заземляющих

¹ ГОСТ 12.3.019–80. Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности.

² ГОСТ ИЕС 61140–2012. Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования (с Поправкой).

проводов. Заземлителем называются металлический стержень, провод, лист, полоса или металлический предмет другой формы, соединяющий заземленную часть электроустановки с землей. Заземляющим проводником называются металлические проводники, которыми заземляемые части электроустановки соединяются с заземлителем или контуром заземления¹.

Защитное заземление снижает до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях оборудования, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок [1]. В результате замыкания на корпус заземленного оборудования снижается напряжение прикосновения и, как следствие, ток, проходящий через тело человека, при его прикосновении к оборудованию.

Все оборудование, расположенное на рабочем поле, имеет одно общее защитное заземление благодаря клеммам заземления (рис. 2).

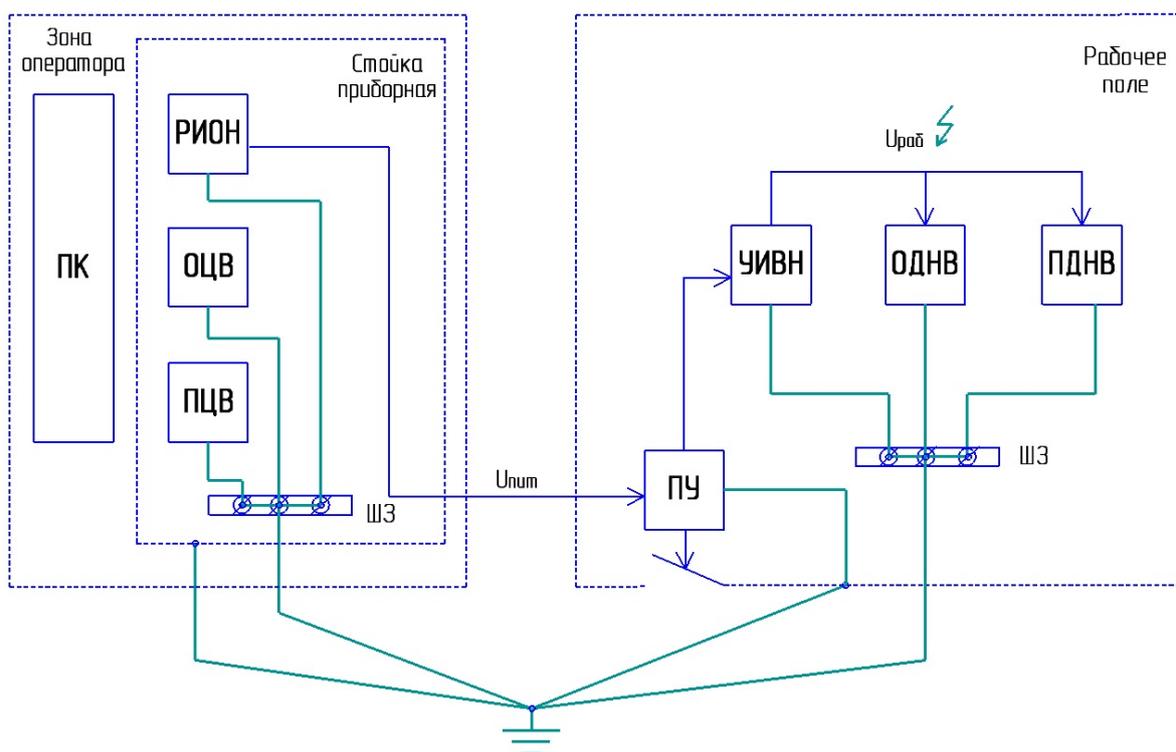


Рис. 2. Защитное заземление ИИС:

ПК – персональный компьютер; РИОН – регулируемый источник опорного напряжения;

ОЦВ – образцовый цифровой вольтметр; ПЦВ – поверяемый цифровой вольтметр;

ПУ – панель управления; ШЗ – шина заземления; УИВН – управляемый источник высокого напряжения; ОДНВ – образцовый делитель напряжения высоковольтный; ПДНВ – поверяемый делитель напряжения высоковольтный

Каждый блок, расположенный в измерительной камере, присоединен к медной шине заземления с помощью отдельного ответвления. Последовательное включение нескольких заземляемых объектов в заземляющий проводник запрещено. Низковольтное оборудование, расположенное на приборной стойке в зоне оператора, также отдельными проводниками подключено к медной шине заземления. Защитное заземление имеют непосредственно сама экранированная измерительная камера, а также приборная стойка. Все оборудование ИИС поверки киловольтметров заземляется в одну точку.

Блокировка

Для увеличения безопасности и предотвращения аварийных ситуаций применяются электрические блокировки, способные разрывать цепь питания и подачу высокого напряжения на рабочее поле.

¹ ГОСТ 12.4.026–76. Цвета сигнальные и знаки безопасности.

Электрическая блокировка воздействует только на контакты электрической цепи. Она может применяться при любых расстояниях от защищаемого объекта. Принцип действия электрической блокировки состоит в том, что открытие дверей ограждения электроустановки сопровождается разрывом блокировочных контактов электрической цепи и автоматическим отключением электроустановки. В другом случае блокировка дает возможность открыть двери ограждения электроустановки только после предварительного отключения источника высокого напряжения [6].

Часто блокировки применяют совместно со звуковыми или световыми сигнальными устройствами, предупреждения о наличии напряжения на электроустановке. При **световой** сигнализации зеленый свет ламп показывает, что напряжение с установки снято, красный свет – что установка находится под опасным напряжением. К **звуковой** сигнализации относятся звонок и сирена, предупреждающие работающих о появлении напряжения на установке.

Блокировка выполнена в виде отдельного блока управления камерой, к которому подключаются контакты цепи питания, контакты дверей, кнопки управления и световая сигнализация.

Блокировочные контакты дверей включены в цепь управления высоковольтным источником напряжения. Блокировочные контакты при открывании двери размыкают цепь питания высоковольтного источника, и высокое напряжение отключается. Во избежание произвольного размыкания цепи двери снабжены затворами и рукояткой с затвором.

На рис. 3 представлена схема блока управления камерой (см. рис. 2).

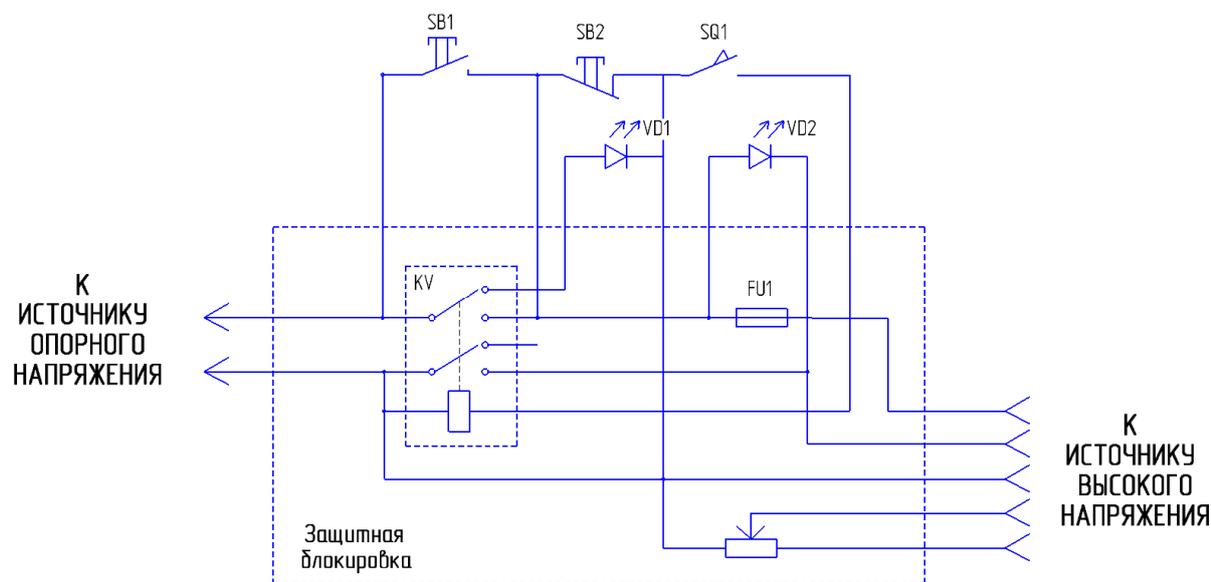


Рис. 3. Схема блока управления камерой

Защита от остаточных зарядов внутри ограждения

Остаточный заряд остается на определенное время на элементах цепей высокого напряжения, образующих емкость относительно «земли». Согласно ГОСТ Р 58698–2019 (МЭК 61140 2016) для выравнивания потенциала элемента с потенциалом «земли» должна использоваться специальная разрядная штанга, которая посредством гибкого провода, заданного сечения, крепится к контуру заземления. Штанга представляет собой диэлектрическую трубку, на одном конце которой расположена изолированная накладка для руки, а на другом – щуп, обеспечивающий контакт при прикосновении к токоведущим частям после отключения высокого напряжения¹.

После отключения напряжения и открытия двери камеры с помощью штанги путем касания свободного конца штанги к элементам высоковольтной цепи и другим предметам, находящимся в камере, производится выравнивание в экранированной камере потенциалов элементов электрической цепи относительно потенциала земли. Контакт обслуживающего

¹ ГОСТ Р 58698–2019 (МЭК 61140 2016). Защита от поражения электрическим током. Общие положения для электроустановок и электрооборудования.

персонала с высоковольтной частью системы запрещен без предварительного выравнивания потенциалов элементов относительно земли.

Управление защитной экранированной камерой ИИС

Для управления экранированной камерой и получения информации о состоянии высокого напряжения установлена панель управления. Панель включает в себя кнопку «Вкл.», включающую питание источника высокого напряжения и кнопку аварийного выключения «Выкл.». Сигнальная лампа красного цвета сигнализирует о включении источника высокого напряжения, замкнутых контактах дверей и о подаче напряжения на рабочее поле. Сигнальная лампа зеленого цвета сигнализирует о подаче напряжения на пульт управления при отключенном источнике высокого напряжения и разомкнутых контактах дверей. В соответствии с ГОСТ 12.4.026–76 кнопка аварийного выключения имеет красный цвет. Все элементы панели управления и блокировочные контакты подключены к управляемому реле¹. Блок управления камерой представлен на рис. 4.

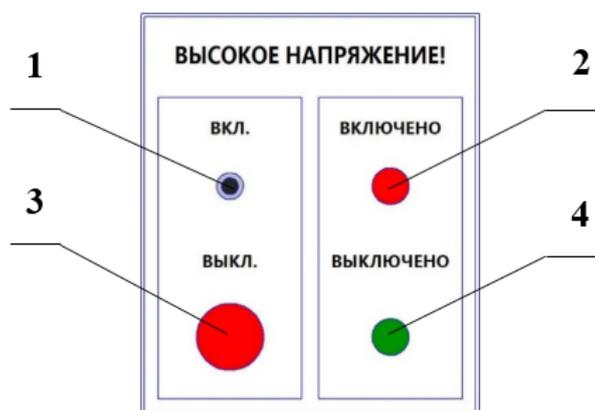


Рис. 4. Блок управления камерой:

1 — кнопка включения питания источника высокого напряжения;
2 — красная сигнальная лампа; 3 — кнопка аварийного выключения; 4 — зеленая сигнальная лампа

Перед включением высокого напряжения в измерительной камере убедиться, что источники высокого напряжения, образцовый и контролируемый ДНВ заземлены и подключены к токоведущей шине, а блокировочные контакты дверей замкнуты. При этом **на лицевой панели блока управления** сигнальная лампа зеленого цвета указывает, что напряжение с установки снято. Кнопкой «Вкл.» включается питание высоковольтного источника. При этом на лицевой панели блока управления включится сигнальная лампа красного цвета, сигнализирующая о наличии высокого напряжения в камере.

Срабатывание защиты происходит при размыкании цепи путем открытия двери, нажатия кнопки аварийного отключения, а также включения блокировки источника высокого напряжения.

Система не может быть включена после срабатывания защиты, так как цепь будет полностью разомкнута благодаря установленному реле (см. рис. 3). Для включения необходимо повторно замкнуть цепь защиты нажав кнопку «Вкл.».

Для автоматического управления подключить ИИС к ПК. В ПО управления задать параметры измерения и управляющие напряжения для источника высокого напряжения. При необходимости включить автозапуск следующего управляющего напряжения. Для включения высокого напряжения в окне «управление измерением» нажать кнопку «ЗАПУСТИТЬ». Для отключения высокого напряжения в ПО рядом расположена кнопка «ОСТАНОВИТЬ».

В случае превышения максимального значения управляющего напряжения в первой контрольной точке ПО не включит высокое напряжение и выдаст информационное сообщение об

¹ ГОСТ 12.3.019–80. Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности.

ошибке. В процессе работы, при превышении управляющего напряжения в конкретной контрольной точке, программа производит отключение высокого напряжения и системы в целом. Для повторного запуска необходимо заново повторить все операции в ПО управления ИИС.

Заключение

В ходе работы были рассмотрены технические средства защиты ИИС для поверки киловольтметров.

Реализованы технические средства защиты ИИС, позволяющие обеспечить: надежность работы, ограничение доступа обслуживающего персонала к высоковольтной части, безопасную работу после снятия высокого напряжения, контроль и управление установкой.

Разработанная комплексная защита информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров УПК-30ПТ обеспечивает надежность работы при возникновении электрических пробоев изоляции и защиту персонала от поражения электрическим током.

Список литературы

1. Казаков А. Правила устройства электроустановок. М. : Кнорус, 2015. 488 с.
2. Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П., Плаксунов Р. Ф. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4. С. 44–50. doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
3. Средства защиты в электроустановках. URL: <https://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/zashchita-elektrostanovok.html>
4. Высоковольтные источники питания. URL: <https://www.spellmanhv.com>
5. Ильин А. С., Юрков Н. К., Баннов В. Я. [и др.]. Алгоритм работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 303–305.
6. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения РД 34.35.512.

References

1. Kazakov A. *Pravila ustroystva elektroustanovok = Electrical installation rules*. Moscow: Knorus, 2015:488. (In Russ.)
2. Il'in A.S., Kostrikina I.A., Voronov A.P., Plaksunov R.F. Installation for verification of kilovoltmeters UPK-30PT. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(4):44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
3. *Sredstva zashchity v elektroustanovkakh = Means of protection in electrical installations*. (In Russ.). Available at: <https://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/zashchita-elektrostanovok.html>
4. *Vysokovol'tnye istochniki pitaniya = High-voltage power supplies*. (In Russ.). Available at: <https://www.spellmanhv.com>
5. Il'in A.S., Yurkov N.K., Bannov V.Ya. [et al.]. The algorithm of the installation for checking kilovoltmeters UPK-30PT. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:303–305. (In Russ.)
6. *Instruktsiya po ekspluatatsii operativnykh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nykh ustroystvakh vysokogo napryazheniya RD 34.35.512 = Operating instructions for operational safety locks in high voltage switchgear RD 34.35.512*. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeil@mail.ru

Aleksey S. Ilin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
electronics engineer,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 26.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 02.06.2021

Принята к публикации/Accepted 03.06.2021

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ДОБРОТНОСТИ

А. В. Светлов¹, Нгок Мань Нгуен²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка методики определения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности. *Материалы и методы.* Предложенная методика предусматривает измерение резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи с последующим решением системы уравнений, связывающих измеренные параметры с индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением электрической цепи. *Результаты.* Приведены расчетные соотношения, рассмотрен пример определения параметров конкретной трехэлементной резонансной электрической цепи и оценивания составляющей погрешности, обусловленной неидеальностью операционного усилителя, на основе которого построена измерительная цепь. *Выводы.* Применение предложенной методики определения параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности позволило избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения измерительной цепи. По результатам моделирования составляющая погрешности, обусловленная неидеальностью элементной базы измерительной цепи, не превышает 1 %.

Ключевые слова: электрическая цепь, резонансная частота, добротность, параметры элементов цепи, измерение, погрешность

Для цитирования: Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров резонансных электрических цепей по результатам измерений резонансной частоты и добротности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 39–47. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

DETERMINATION OF RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETERS BASED ON RESONANT FREQUENCY AND QUALITY FACTOR MEASUREMENTS

A.V. Svetlov¹, Ngoc Manh Nguyen²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The aim of the article is to develop a methodology to determine parameters of three-element resonant electric circuits based on resonant frequency and quality factor measurements. *Materials and methods.* The proposed technique provides for the measurement of resonant frequency, quality factor, and maximum voltage at the output of a measuring circuit with subsequent solution of a system of equations connecting the measured parameters

with inductance, capacitance, and active resistance of the electrical circuit. *Results.* Calculated ratios are given, and an example of determining the parameters of a specific three-element resonant electric circuit, and estimating the error component due to imperfection of an operational amplifier, with a measuring circuit built thereon, is considered. *Conclusions.* An application of the proposed technique to determine the parameters of resonant electrical circuits based on resonant frequency and quality factor measurements made it possible to get rid of errors in analogue conversions of the output voltage of the measuring circuit. According to the simulation results, the error component does not exceed 1 % due to imperfection of the element base of the measuring circuit.

Keywords: electrical circuit, resonant frequency, quality factor, parameters of circuit elements, measurement, error

For citation: Svetlov A.V., Nguyen N.M. Determination of resonant electrical circuit parameters based on resonant frequency and quality factor measurements. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):39–47. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-5

Задача измерения параметров объектов, представляемых эквивалентными электрическими схемами в виде резонансных электрических цепей (ЭЦ), фактически включает в себя две задачи [1]:

- определение частотных параметров ЭЦ: резонансной частоты и добротности;
- определение электрических параметров ЭЦ: активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления ЭЦ в полосе рабочих частот или эквивалентных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений в соответствии с принятой для измерения эквивалентной электрической схемой объекта исследования.

Традиционно применяемые способы определения электрических параметров ЭЦ [2–4] предполагают:

- преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение с помощью специально создаваемой для этого измерительной цепи (ИЦ), на вход которой подается требуемый тестовый сигнал;

- выполнение последовательности аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ с целью раздельного получения информации о искомых электрических параметрах ЭЦ.

В результате последовательного выполнения ряда аналоговых преобразований накапливается значительная погрешность преобразования [5]. Избежать этого можно, оставив только одну аналоговую процедуру – преобразование сопротивления исследуемой ЭЦ в напряжение при вариации частоты тестового сигнала с целью определения резонансной частоты и добротности, а электрические параметры ЭЦ предложено определять программным способом – путем вычисления по найденным значениям частотных параметров ЭЦ.

В соответствии с методом совокупных измерений составляется и решается система уравнений, связывающих искомые электрические параметры ЭЦ с измеренными значениями резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ [6].

Методику совокупных измерений параметров резонансных ЭЦ рассмотрим на примере трехэлементной ЭЦ, включенной в состав ИЦ, построенной на операционном усилителе (ОУ) с опорным сопротивлением R_0 во входной цепи и исследуемой ЭЦ в цепи отрицательной обратной связи (рис. 1).

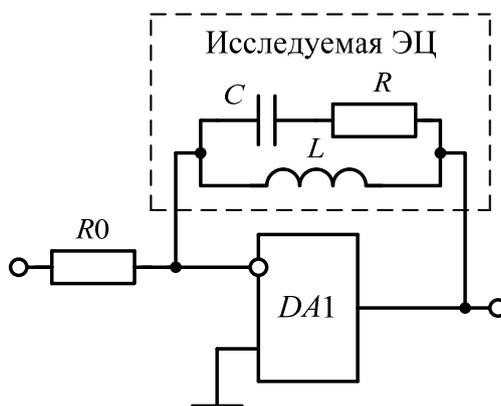


Рис. 1. ИЦ для измерения параметров резонансных ЭЦ

Для формирования подаваемого на вход ИЦ тестового синусоидального напряжения используется генератор прямого цифрового синтеза (DDS) UNI-T UTG9002C-II [7]. Амплитуда синусоидального выходного напряжения ИЦ с помощью амплитудного детектора [8] преобразуется в постоянное напряжение, измеряемое цифровым вольтметром YOKOGAWA 7555 [9].

В процессе поиска резонансной частоты ЭЦ оператор дискретно перестраивает частоту выходного сигнала DDS-генератора до тех пор, пока амплитуда выходного напряжения ИЦ не достигнет максимального значения. По мере приближения к резонансу уменьшается шаг перестройки частоты, а также уменьшается амплитуда тестового сигнала, чтобы не превышать максимального рекомендованного значения входного напряжения амплитудного детектора. Регистрируются найденные значения резонансной частоты f_0 и максимального выходного напряжения ИЦ U_{m0} на резонансной частоте.

С целью определения добротности ЭЦ находят значения частоты f' ниже резонансной частоты f_0 и частоты f'' выше резонансной частоты, при которых амплитуда выходного напряжения равна $U' = 0,707 U_{m0}$. Добротность ЭЦ определяется по формуле: $Q = f_0 / f'' - f'$.

Электрические параметры ЭЦ (эквивалентные индуктивность L , емкость C , активное сопротивление R) могут быть получены путем решения системы уравнений, связывающих эти параметры ЭЦ с найденными значениями резонансной частоты f_0 , добротности Q и максимального напряжения U_{m0} на выходе ИЦ. Для трехэлементной резонансной ЭЦ, показанной на рис. 1, такие уравнения имеют вид

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC - R^2 C^2}}; \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{\frac{L - R^2 C}{R^2 C}}; \quad (2)$$

$$U_{m0} = \frac{16\pi^4 U_0 f_0^4 L^2 R C^2}{R_0 [(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC)^2 + 4\pi^2 f_0^2 R^2 C^2]}. \quad (3)$$

Система уравнений, решение которой позволяет найти искомые электрические параметры ЭЦ, составляется путем приравнивания выражений (1)–(3) измеренным значениям f_0 , Q , U_{m0} . Для численного решения составленной системы уравнений могут быть использованы любые математические программы, например, MathCAD. Кроме того, авторами методом подстановки получено решение составленной системы уравнений в виде формул следующего вида:

$$R = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{U_0 (Q^2 - 1)^2}; \quad (4)$$

$$L = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q (Q^2 - 1)}; \quad (5)$$

$$C = \frac{U_0 (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q (Q^2 + 1)}. \quad (6)$$

Практическую реализацию разработанной методики определения параметров трехэлементных резонансных ЭЦ по результатам измерений резонансной частоты и добротности рассмотрим на примере ЭЦ, включенной в состав ИЦ, показанной на рис. 1, при следующих номинальных значениях параметров элементов: $L_{\text{ном}} = 100$ мГн, $C_{\text{ном}} = 100$ пФ, $R_{\text{ном}} = 1000$ Ом. Номинальные значения частотных параметров в соответствии с (1) и (2): $f_{0\text{ном}} = 50,35439$ кГц; $Q_{\text{ном}} = 31,60696$. Сопротивление $R_0 = 10$ кОм. Амплитуда тестового синусоидального напря-

жения $U_0 = 0,5$ В. Задание на моделирование ИЦ в частотной области, составленное в соответствии с правилами языка программы PSpice [10], представлено в виде файла 1.cir:

```

1
V1 1 0 AC 0.5
V2 4 0 15
V3 5 0 -15
R0 1 2 50K
L1 2 3 100E-3
R1 2 6 1K
C1 6 3 100E-12
.LIB d:\W\544UD2.mod
X1 0 2 4 5 3 544UD2
.IC V(3) = 0 V(6) = 0
.AC LIN 10000 40E3 60E3
.PROBE V(3)
.END

```

Макромодель ОУ 544УД2 составлена с помощью программы [11] по измеренным динамическим и типовым статическим параметрам ОУ [12, 13].

В результате моделирования ИЦ получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модели ИЦ $U_m(f)$. На рис. 2 приведен фрагмент графика АЧХ, на котором обозначены все измеряемые параметры выходного напряжения ИЦ: резонансная частота f_0 ; максимальное выходное напряжение ИЦ U_{m0} на резонансной частоте; частоты f' и f'' , при которых амплитуда выходного напряжения равна $U' = 0,707 U_{m0}$. Из показанного на рис. 3 графика АЧХ с более высоким разрешением получены значения: $f_0 = 50,258$ кГц; $U_{m0} = 10,024$ В. Аналогичным образом получены значения: $f' = 49,4727$ кГц; $f'' = 51,0567$ кГц. По результатам моделирования найдено значение добротности: $Q = f_0 / (f'' - f') = 31,7285$, а по формулам (4)–(6) вычислены значения параметров элементов: $R = 998,7009$ Ом; $C = 99,9377$; $L = 100,25$ мГн.

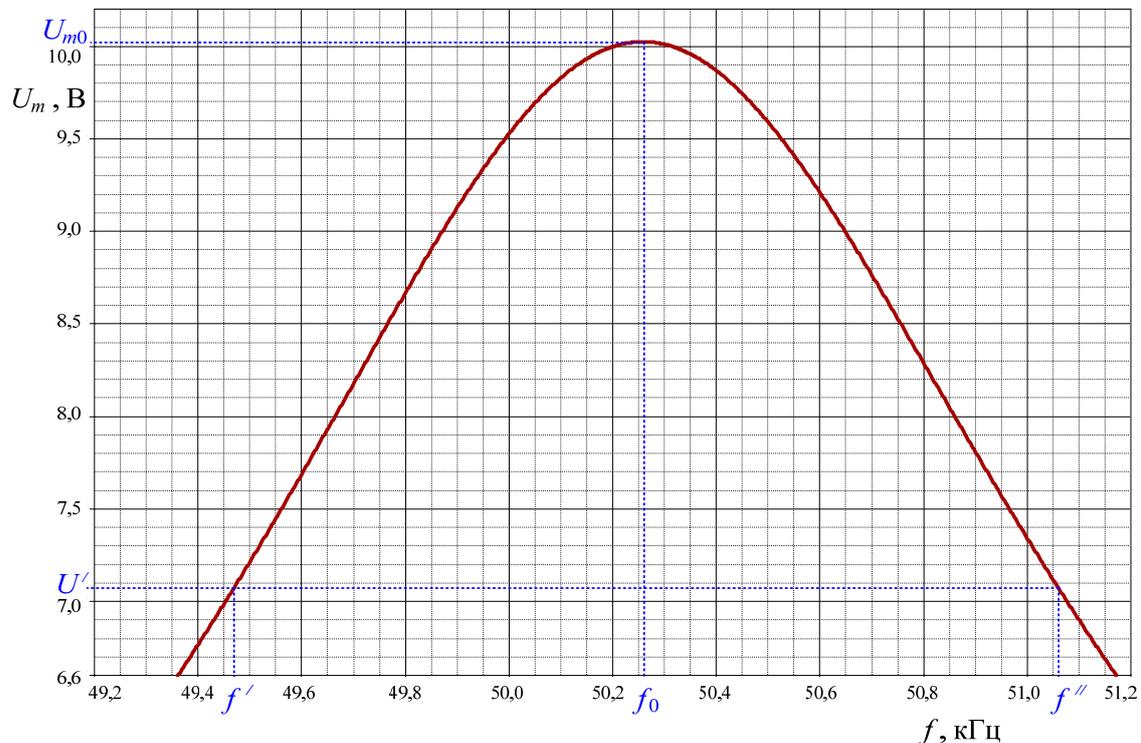


Рис. 2. Фрагмент графика АЧХ модели ИЦ в области частот от f' до f''

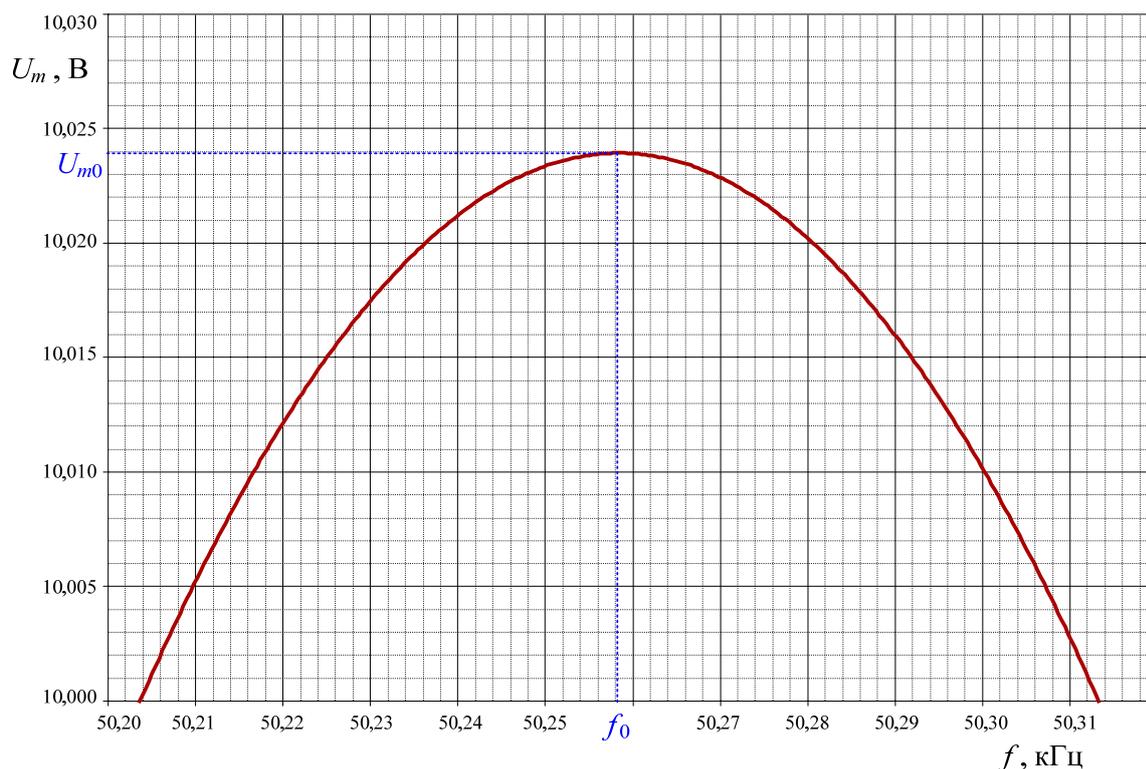


Рис. 3. Фрагмент графика АЧХ модели ИЦ вблизи резонансной частоты f_0

Относительные погрешности определения параметров резонансных ЭЦ, обусловленные неидеальностью ОУ ИЦ, оцениваются путем сопоставления полученных по результатам моделирования значений частотных параметров и параметров элементов ЭЦ с их номинальными значениями:

$$\delta f_0 = \frac{f_0 - f_{0 \text{ ном}}}{f_{0 \text{ ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (7)$$

$$\delta Q = \frac{Q - Q_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (8)$$

$$\delta R = \frac{R - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (9)$$

$$\delta L = \frac{L - L_{\text{ном}}}{L_{\text{ном}}} \cdot 100 \% ; \quad (10)$$

$$\delta C = \frac{C - C_{\text{ном}}}{C_{\text{ном}}} \cdot 100 \% . \quad (11)$$

В рассмотренном примере получены следующие значения погрешностей: $\delta f_0 = -0,19 \%$; $\delta Q = 0,38 \%$; $\delta R = -0,13 \%$; $\delta L = 0,25 \%$; $\delta C = -0,06 \%$.

Данные составляющие погрешности, обусловленные неидеальностью ОУ ИЦ, суммируются с составляющими погрешностями других средств измерений, задействованных в процессе определения параметров резонансных ЭЦ. Погрешности промышленных DDS-генератора [7] и цифрового вольтметра постоянного тока [9] не превышают 0,1 %. Погрешность разработанного авторами статьи амплитудного детектора [8] не превышает 1 %. Результирующая относительная погрешность определения параметров резонансных ЭЦ не должна превышать 1,5–2 % в установленных диапазонах допустимых соотношений измеряемых параметров элементов

ЭЦ. Эти диапазоны можно найти путем моделирования ИЦ при поочередной вариации номинальных значений параметров всех элементов ЭЦ и оценивании получаемой погрешности, которая не должна превышать заданных пределов.

Аналогичным образом могут быть определены параметры трехэлементных резонансных ЭЦ других топологий. В табл. 1 и 2 приведена информация о месте включения исследуемой ЭЦ разных топологий в составе ИЦ (входная цепь ОУ или цепь отрицательной обратной связи ОУ).

Таблица 1

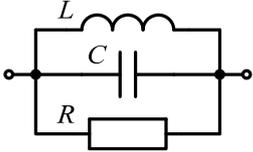
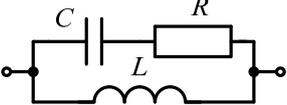
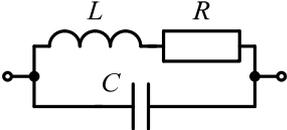
ЭЦ		
Место включения	Входная цепь ОУ	Цепь отрицательной обратной связи ОУ
Система уравнений	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L}{R^2C}} = Q; \\ \frac{U_0 R_0}{R} = U_{m0}. \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{R^2C}{L}} = Q; \\ \frac{U_0 R}{R_0} = U_{m0}. \end{cases}$
Решение для R	$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}}$	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0}$
Решение для C	$C = \frac{U_{m0}}{2\pi U_0 f_0 R_0 Q}$	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
Решение для L	$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0}$	$L = \frac{U_{m0} R_0}{2\pi U_0 f_0 Q}$

Таблица 2

ЭЦ		
Место включения	Цепь отрицательной обратной связи ОУ	Цепь отрицательной обратной связи ОУ
Система уравнений	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC - R^2C}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L - R^2C}{R^2C}} = Q; \\ \frac{16\pi^4 U_0 f_0^4 L^2 R C^2}{R_0 [(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC)^2 + 4\pi^2 f_0^2 R^2 C^2]} = U_{m0} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{2\pi L \sqrt{\frac{L}{C} - R^2}} = f_0; \\ \sqrt{\frac{L - CR^2}{CR^2}} = Q; \\ \frac{U_0 (4\pi^2 f_0^2 L^2 + R^2)}{R_0 R} = U_{m0} \end{cases}$
Решение для R	$R = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{U_0 (Q^2 - 1)^2}$	$R = \frac{U_{m0} R_0}{U_0 (Q^2 + 1)}$
Решение для C	$C = \frac{U_0 (Q^2 - 1)^2}{2\pi U_{m0} f_0 R_0 Q (Q^2 + 1)}$	$C = \frac{U_0 Q}{2\pi U_{m0} f_0 R_0}$
Решение для L	$L = \frac{U_{m0} R_0 (Q^2 + 1)}{2\pi U_0 f_0 Q (Q^2 - 1)}$	$L = \frac{U_{m0} R_0 Q}{2\pi U_0 f_0 (Q^2 + 1)}$

Критерием выбора места включения исследуемой ЭЦ является наличие обратной связи ОУ по постоянному току. В соответствии с этим критерием только последовательная RCL -цепь не может включаться в цепи отрицательной обратной связи ОУ. В качестве опорных элементов во всех вариантах ИЦ используются активные сопротивления R_0 . Приведены системы уравнений, связывающие искомые параметры R , C , L элементов ЭЦ с измеренными значениями резонансной частоты f_0 , добротности Q и максимального напряжения U_{m0} на выходе ИЦ. Приведены также решения этих систем уравнений в виде формул для вычисления искомых параметров. В табл. 1 приведена информация для определения параметров ЭЦ, образованных последовательным и параллельным соединением трех элементов R , C , L . В табл. 2 – информация для ЭЦ, образованных параллельным соединением двухэлементной последовательной RC - или RL -цепи с другим реактивным элементом L или C .

Проведено моделирование ИЦ для всех топологий ЭЦ, представленных в табл. 1 и 2. Во всех рассмотренных примерах относительные погрешности определения параметров ЭЦ, обусловленные неидеальностью ОУ, не превысили 1%. Экспериментальные исследования описанных в данной работе средств измерений подтвердили реализуемость предложенной методики определения параметров резонансных ЭЦ по результатам измерений резонансной частоты и добротности [14]. Применение метода совокупных измерений для определения параметров резонансных ЭЦ позволило существенно упростить аппаратную часть средств измерений и избавиться от погрешностей аналоговых преобразований выходного напряжения ИЦ.

Список литературы

1. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Совокупные измерения параметров трехэлементных резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 3. С. 68–77.
2. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
3. Мартяшин А. И., Куликовский К. Л., Куроедов С. К., Орлова Л. В. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
4. Чураков П. П., Свистунов Б. Л. Инвариантные измерители параметров катушек индуктивности. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. 180 с.
5. Колдов А. С. Оценивание погрешностей измерительных преобразователей с последовательным выполнением аналоговых преобразований измеряемых величин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. С. 20–23.
6. Колдов А. С., Светлов А. В. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.): в 2 т. Пенза: Изд-во ПГУ, 2019. Т. 1. С. 145–149.
7. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
8. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 31–37.
9. Мультиметры цифровых моделей 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. Номер по Госреестру 25784-03: Описание типа СИ. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/25784-03-7555-7556-7561-7562-7563-23811>.
10. PSpice® User's Guide. includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006. URL: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>
11. OrCAD Model Editor 9.1webupdate1. 2017. URL: <https://software.-com/windows/apps/orcad-model-editor>
12. Sapunov E. V., Svetlov A. V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings (21–23 May 2015, Omsk). Omsk, 2015. doi 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
13. Паршуков М. Ю., Сапунов Е. В., Светлов А. В. Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 2. С. 112–123.
14. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Стенд для исследования резонансных электрических цепей // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020»): материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. С. 10–12.

References

1. Svetlov A.V., Nguen N.M. Cumulative measurements of parameters of three-element resonant electric circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2020;(3):68–77. (In Russ.)
2. Kneller V.Yu., Borovskikh L.P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov = Determination of parameters of multi-element bipolar.* Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
3. Martyashin A.I., Kulikovskiy K.L., Kuroedov S.K., Orlova L.V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey = Fundamentals of invariant transformation of electrical circuit parameters.* Moscow: Energoatomizdat, 1990:216. (In Russ.)
4. Churakov P.P., Svistunov B.L. *Invariantnye izmeriteli parametrov katushek induktivnosti = Invariant inductance coil parameter meters.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1998:180. (In Russ.)
5. Koldov A.S. Estimation of errors of measuring transducers with sequential execution of analog transformations of measured values. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2018» = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of the International Scientific and Technical conf. "Shlyandinsky readings – 2018".* Penza: Izd-vo PGU, 2018:20–23. (In Russ.)
6. Koldov A.S., Svetlov A.V. Method of cumulative measurements of parameters of resonant electrical circuits. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t. = Problems of automation and control in technical systems : collection of articles based on the materials of XXXIII International Scientific and Technical conf. (Penza, May 22-23, 2019): in 2 vols.* Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:145–149. (In Russ.)
7. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki = UNI-T UTG9002C-II signal generator. Technical specifications.* (In Russ.). Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/=uni_t_utg9002c_ii/
8. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing means of measuring parameters of resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):31–37. (In Russ.)
9. *Multimetry tsifrovyykh modeley 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. Nomer po Gosreestru 25784-03: Opisaniye tipa SI = Multimeters of digital models 7555, 7556, 7561, 7562, 7563. State Register number 25784-03: Description of the SI type.* (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisaniye/25784-03-7555-7556-7561-7562-7563-23811>
10. *PSPICE® User's Guide. includes PSPICE A/D, PSPICE A/D Basics, and PSPICE. – Cadence. Product Version 15.7. – July 2006.* Available at: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspug.pdf>
11. *OrCAD Model Editor 9.1webupdate1. 2017.* Available at: <https://software.com/windows/apps/orcad-model-editor>
12. Sapunov E.V., Svetlov A.V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings (21–23 May 2015, Omsk).* Omsk, 2015. doi 10.1109/SIBCON.2015.7147326
13. Parshukov M.Yu., Sapunov E.V., Svetlov A.V. Processing of measurement results of frequency and time parameters of operational amplifiers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2016;(2):112–123. (In Russ.)
14. Svetlov A.V., Nguen N.M. Stand for the study of resonant electrical circuits. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2020»): materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2020") : materials of the XII International scientific and technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:10–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Вильевич Светлов

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры радиотехники
 и радиоэлектронных систем,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: rtech@pnzgu.ru

Anatoliy V. Svetlov

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

Нгуен Нгок Мань

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

Nguyen Ngoc Manh

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

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

Поступила в редакцию/Received 20.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 27.05.2021

Принята к публикации/Accepted 28.05.2021

УДК 621.317.73
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ В СРЕДЕ SIMINTECH

И. Н. Воротников¹, М. А. Мастепаненко², Ш. Ж. Габриелян³, С. В. Мишуков⁴

^{1,2,3,4} Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия
¹vorotn_in@mail.ru, ²mma_26@inbox.ru, ³shaliko69@mail.ru, ⁴stas.mishukov.92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследована возможность построения нестандартных многоэлементных измерительных схем емкостных датчиков в среде динамического моделирования SimInTech. *Материалы и методы.* На основе встроенных библиотек программной среды выполнено компьютерное моделирование измерительных схем датчиков с применением двух способов построения модели – расчетного и экспериментального. *Результаты.* Построены модели операционного усилителя и измерительной схемы четырехэлементной RC-цепи, проверена их работоспособность и проведен сравнительный анализ с существующими математическими моделями. На основе языка программирования среды SimInTech выполнено программирование отдельного расчетного блока, позволяющего проводить сложные вычислительные операции непосредственно в модели. Получены экспериментальная и расчетная кривые, описывающие зависимость изменения выходного напряжения от номинальных параметров измерительной схемы. *Выводы.* Разработана рабочая модель операционного усилителя и подтверждена целесообразность применения среды для исследования многоэлементных измерительных схем емкостных датчиков на основе встроенного математического решателя.

Ключевые слова: моделирование, измерительная схема, емкостной датчик, временная диаграмма, схема замещения

Для цитирования: Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 48–53. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

MODELING OF MEASUREMENT CIRCUITS CAPACITIVE SENSORS IN THE SIMINTECH ENVIRONMENT

I.N. Vorotnikov¹, M.A. Mastepanenko², Sh.Zh. Gabrielyan³, S.V. Mishukov⁴

^{1,2,3,4} Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia
¹vorotn_in@mail.ru, ²mma_26@inbox.ru, ³shaliko69@mail.ru, ⁴stas.mishukov.92@mail.ru

Abstract. *Background.* The possibility of constructing non-standard multi-element measurement circuits of capacitive sensors in the SimInTech dynamic modeling environment is investigated. *Materials and methods.* On the basis of the built-in libraries of the software environment, computer modeling of measuring circuits of sensors is performed using two methods of constructing the model – analytical and experimental. *Results.* Models of an operational amplifier and a measuring circuit of a four-element RC circuit are constructed, their operability is checked and a comparative analysis is carried out with existing mathematical models. Based on the SimInTech programming language, a separate calculation block is programmed, which allows performing complex computational operations directly in the model. Experimental and calculated curves describing the dependence of the change in the output voltage on the nominal parameters of the measuring circuit are obtained. *Conclusion.* The working model of the operational amplifier is developed and the expediency of using the environment for the study of multi-element measuring circuits of capacitive sensors based on the built-in mathematical solver is confirmed.

Keywords: simulation, measuring circuit, capacitive sensor, time diagram, substitution circuit

For citation: Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh. Zh., Mishukov S.V. Modeling of measurement circuits capacitive sensors in the SimInTech environment. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):48–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

Введение

Основным универсальным и эффективным методом научного познания различных технических объектов является построение их схем замещения (СЗ), позволяющее выполнить математическое моделирование и исследование основных параметров, свойств и характеристик под воздействием разнородных сигналов при различных условиях. Для моделирования и выполнения расчетов технических систем, приборов и компонентов применяется разнообразное программное обеспечение, такое как Mathcad (PTC Ink.), Matlab и Simulink (MathWorks), VisSim (Visual Solutions), LabVIEW (National Instruments) и др. При этом каждый из перечисленных программных комплексов выполняет строго определенный круг задач, ограниченный не только областями применения, но и низкой гибкостью при расчетах нестандартных динамических моделей.

Указанный недостаток может быть устранен с помощью современной среды динамического моделирования технических систем SimInTech (Simulation In Technic), реализующей принцип структурированной базы переменных сигналов, что позволяет создавать комплексные модели, объединяющие в себе несколько расчетных схем с различными физическими, электрическими, гидравлическими и другими процессами [1]. Эта особенность среды SimInTech, в частности, позволяет выполнить построение СЗ емкостных датчиков, состоящих из двух и более пассивных элементов – конденсаторов или резисторов, количество которых напрямую связано с полнотой описания характеристик исследуемого объекта или продукта как качественно, так и количественно [2].

Материалы и методы

Исследования этих схем показывают, что наиболее достоверную информацию при описании электрических свойств объектов можно получить только при четырех- и более элементной структуре эквивалентной цепи, рассматриваемой в переходном и установившемся режимах [3]. При этом для преобразования получаемых параметров целесообразно применять измерительные схемы (ИС), в составе которых предусмотрены операционные усилители (ОУ), позволяющие выполнять анализ переходного процесса при воздействии на цепь импульсных сигналов различной формы широкого диапазона частот [4].

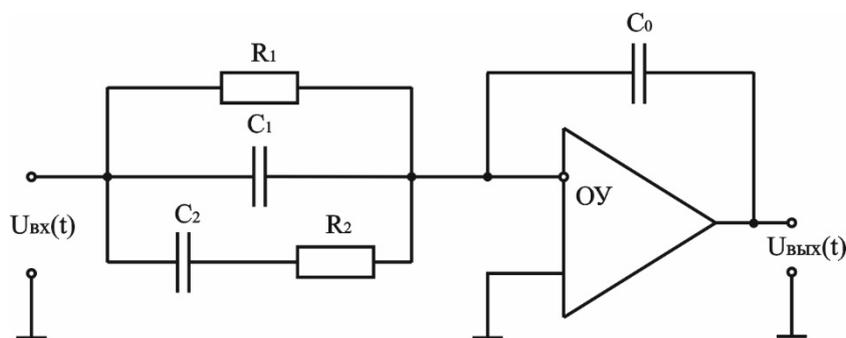


Рис. 1. ИС емкостного датчика

В таком случае стандартным техническим решением будет являться четырехэлементная RC-цепь, подключаемая к инвертирующему входу ОУ после источника опорного напряжения $U_{вх}(t)$, а в цепь отрицательной обратной связи (ООС) в свою очередь включается опорный элемент в виде конденсатора или резистора (рис. 1), при этом в случае с опорным конденсатором C_0 напряжение на выходе $U_{вых}(t)$ будет изменяться по экспоненциальному закону переходного процесса [5], описываемого выражением

$$U_{вых}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} + \frac{U_0}{R_1 C_0} t + \frac{U_0 C_2}{C_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right), \quad (1)$$

где U_0 – опорное напряжение, В; C_0 – образцовый конденсатор, пФ; R_1, R_2 – элементы СЗ в виде сопротивлений, Ом; C_1, C_2 – элементы СЗ в виде емкостей, пФ.

Для построения приведенной выше четырехэлементной схемы датчика в среде динамического моделирования SimInTech был создан новый проект с электрической схемой, в которой предусмотрен математический решатель для электрических процессов (рис. 2). Основные элементы проектируемой модели, такие как резисторы R_1 – R_2 , конденсаторы C_0 – C_2 , вольтметры $PV1$ – $PV3$, нулевые потенциалы и другие, были взяты из стандартной библиотеки «ЭЦ-Динамика», обладающей достаточным количеством блоков для построения неограниченного количества различных электрических схем, параметры которых рассчитываются по мгновенным значениям применяемых элементов. Вывод результатов симуляции реализован с помощью временных диаграмм (ВД) посредством библиотеки «Вывод данных», позволяющей визуализировать протекающие процессы в проектируемой модели ИС емкостного датчика.

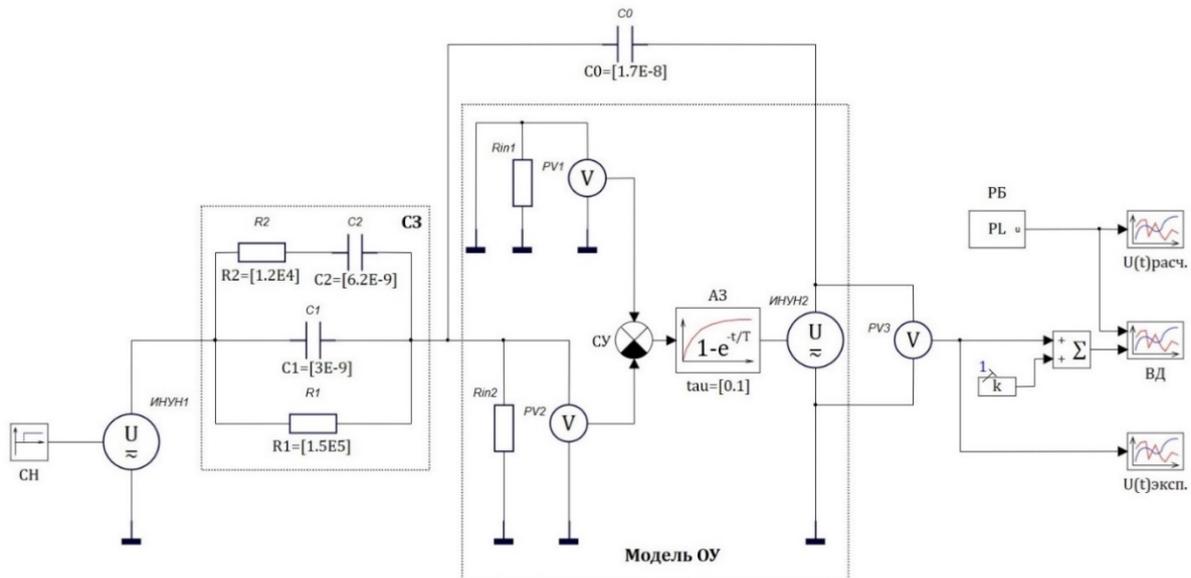


Рис. 2. Модель ИС в среде SimInTech

Поскольку в существующих библиотеках среды SimInTech отсутствует операционный усилитель, то потребовалось выполнить его построение посредством сравнивающего устройства (СУ), реализующего поэлементное вычитание одного входного векторного сигнала из другого, и апериодического звена (АЗ), представляющего из себя аналитико-дискретную непрерывную математическую модель, которая описывается линейным дифференциальным уравнением. Для этого звена были приняты следующие значения: коэффициент усиления $k = 1 \cdot 10^5$, постоянная времени $\tau = 0,1$ с, время расчета $t = 0,001$ с. С целью создания большого входного сопротивления входы модели ОУ подключены к резисторам R_{in1} и R_{in2} с величиной сопротивления 1 МОм.

Принцип работы модели ИС (рис. 2) заключается в следующем: от источника напряжения ИНУН1, управляемого через математическую связь блоком скачка напряжения СН, на схему замещения емкостного датчика посредством электрической связи подается опорное напряжение E_0 , поступающее на инвертирующий вход модели ОУ, в которой с помощью идеального вольтметра $PV2$ электрическая связь преобразуется в математическую и поступает на СУ, выполняющее сравнение поступающего сигнала и передающее результат в АЗ. Далее по заданному экспоненциальному закону АЗ преобразует сигнал в математический вид и передает его на управляемый источник напряжения ИНУН2, связанный через опорный конденсатор C_0 с инвертирующим входом ОУ, после чего сигнал с помощью вольтметра $PV3$ снимается с выхода ОУ и поступает на сумматор (СМ), который в свою очередь передает сигнал в виде экспериментальной кривой $U(t)_{\text{эксп.}}$ на блок временной диаграммы.

Результаты

Проверка работоспособности построенной модели выполнялась методом сравнения с известным результатом математического моделирования в среде Mathcad на основе статьи [5],

в которой подробно описан алгоритм исследования и получены достоверные результаты совокупных измерений параметров многоэлементных цепей. Исходя из этого, были приняты следующие значения номинальных параметров: $C_1 = 3$ нФ, $R_1 = 150$ кОм, $C_2 = 6,2$ нФ, $R_2 = 12$ кОм, $C_0 = 17$ нФ, $U_0 = 5$ В.

Одним из преимуществ среды SimInTech является возможность создания расчетных блоков на встроенном языке программирования, что позволяет выполнять сложные вычислительные операции непосредственно в модели. Для проверки указанной функции было выполнено построение расчетного блока (РБ) по формуле (1) (рис. 3), в котором производится одно-временное конфигурирование входных и выходных портов, что дает возможность его интегрирования в разработанную модель ИС.

```

Блок "Язык программирования": LangBlock22
Файл  Правка  Поиск  Расчёт  Справка
[Иконки панели инструментов]
1  output u;
.
.  U=5;
.  C0=17E-9;
.  R1=150000;
.  C1=3E-9;
.  C2=6.2E-9;
.  R2=12000;
.
10 p=1/(R2*C2);
.  deltat=0.0001;
.
.  if time < deltat then u=0;
.
.  u =U*C1/C0+U*(time-deltat)/R1/C0+U*C2/C0*(1-exp(-(time-deltat)/R2/C2));

```

Рис. 3. Окно блока языка программирования SimInTech

Расчетный блок был применен с целью построения на ВД сразу двух кривых – расчетной $U(t)_{\text{расч.}}$, которая описывает протекающий в ИС переходный процесс с теоретической точки зрения, и экспериментальной $U(t)_{\text{эксп.}}$, полученный в результате моделирования в среде (рис. 4).

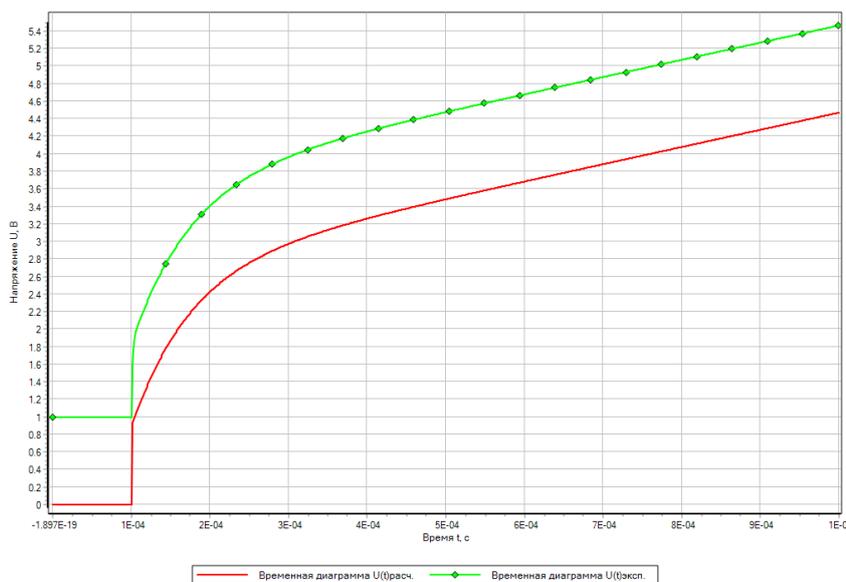


Рис. 4. Временные диаграммы экспериментальной и расчетной кривых

Поскольку построенные временные диаграммы кривых наложились друг на друга, то для наглядности потребовалось ввести дополнительный блок в виде СМ, который искусственно смещает экспериментальный график $U(t)_{\text{эксп.}}$ на величину заданной константы равной 1 В, что в свою очередь позволяет визуально оценить совпадение полученных графиков.

Заключение

Анализ результатов проведенного моделирования показывает, что полученные временные диаграммы в среде динамического моделирования SimInTech (рис. 4) полностью совпадают с известным результатом математического моделирования, что свидетельствует о работоспособности построенной модели емкостного датчика. При этом совпадение кривых на ВД показывает: во-первых, верное построение и работоспособность модели ОУ, что позволяет построить упрощенную субмодель в дополнение к базовым блокам среды; во-вторых, отражает целесообразность применения встроенного математического решателя среды, применительно к сложным динамическим моделям электрических цепей; в-третьих, свидетельствует о большом потенциале среды при выполнении исследований четырехэлементных СЗ емкостных датчиков с построением зависимости напряжения от входных параметров R_1, R_2, C_1, C_2 .

Список литературы

1. Карташов Б. А., Шабаяев Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2017. 423 с.
2. Сарваров Л. В., Сафаров М. Р. Сравнительный анализ способов вычисления параметров двухполосников // Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2001. С. 100.
3. Mastepanenko M. A., Gabrielyan S. Z., Mishukov S. V. Improving the algorithms for measuring sensor parameters to determine the moisture content of dry and liquid agricultural products // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. № 488. doi: 10.1088/1755-1315/488/1/012028
4. Колдов А. С. Оценка погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 71–74.
5. Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В., Светлов А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-9

References

1. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech = SimInTech dynamic modeling environment for technical systems*. Moscow: DMK Press, 2017:423. (In Russ.)
2. Sarvarov L.V., Safarov M.R. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of two-pole. *Materialy 50-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Materials of the 50th Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2001:100. (In Russ.)
3. Mastepanenko M.A., Gabrielyan S.Z., Mishukov S.V. Improving the algorithms for measuring sensor parameters to determine the moisture content of dry and liquid agricultural products. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;(488). doi: 10.1088/1755-1315/488/1/012028
4. Koldov A.S. Estimation of errors in aggregate measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:71–74. (In Russ.)
5. Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V., Svetlov A.V. Cumulative measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-9

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Николаевич Воротников

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электротехники,
автоматики и метрологии,
Ставропольский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)
E-mail: vorotn_in@mail.ru

Igor N. Vorotnikov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of electrical engineering,
automation and metrology,
Stavropol State Agrarian University
(12 Zootekhnicheskiiy lane, Stavropol, Russia)

Максим Алексеевич Мастепаненко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электротехники,
автоматики и метрологии,
декан электроэнергетического факультета,
Ставропольский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)
E-mail: mma_26@inbox.ru

Maxim A. Mastepanenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department of electrical
engineering, automation and metrology,
dean of the faculty of electric power engineering,
Stavropol State Agrarian University
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

Шалико Жораевич Габриелян

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
доцент кафедры электротехники,
автоматики и метрологии,
заместитель декана электроэнергетического
факультета,
Ставропольский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)
E-mail: shaliko69@mail.ru

Shaliko Zh. Gabrielyan

Candidate of agricultural sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of electrical engineering,
automation and metrology,
deputy dean of the faculty
of electric power engineering,
Stavropol State Agrarian University
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

Станислав Вадимович Мишуков

ассистент кафедры электротехники,
автоматики и метрологии,
Ставропольский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)
E-mail: stas.mishukov.92@mail.ru

Stanislav V. Mishukov

Assistant of sub-department of electrical engineering,
automation and metrology,
Stavropol State Agrarian University
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2021

Принята к публикации/Accepted 28.05.2021

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.391.31

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ СТЕКА ЯЧЕЙКИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ЕЕ НАДЕЖНОСТЬ

П. А. Максимов¹, А. С. Ишков², М. К. Маркелов³

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

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

¹ agdvs8880@gmail.com, ^{2,3} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Печатные платы современных аналоговых, цифровых и цифроаналоговых электронных устройств средней сложности и выше имеют основу в виде стека – набора слоев различного назначения, прессуемых впоследствии в единую печатную плату. Материалы, используемые для формирования данных слоев, играют существенную роль в дальнейшей работоспособности электронного устройства, так как обладают различными электрическими, тепловыми и механическими параметрами, определяющими достоинства того или иного их стека и, соответственно, возможные ограничения выполненного на его основе устройства. *Материалы и методы.* Качество материалов, используемых для печатных плат, характеризуется множеством технических параметров, которые могут существенно влиять на характеристики конечных электронных устройств. Негативное влияние материалов стека печатной платы может проявиться как непосредственно после изготовления изделия, так и в процессе эксплуатации, приводя к мгновенным или задержанным во времени отказам разных видов критичности. *Результаты.* Установлено, что в условиях производства современных электронных устройств и печатных плат для них, в том числе работающих в высокочастотных диапазонах, на качество их работы могут влиять самые различные факторы. В работе показано, что с целью максимального снижения возможных рисков, связанных с различными физическими явлениями и возникающими паразитными параметрами материалов печатной платы, необходимо проведение моделирования ее работы с учетом возможных параметров используемых материалов и их влияния как минимум на самые критичные участки – печатный монтаж, места установки микросхем и других радиоэлементов. Определены значения количества теплоты, выделяемой с единицы ее площади, так как многие характеристики электронных компонентов и материалов печатных плат, их работоспособность зависит от температурного режима, в пределах которого они работают. *Вывод.* Выполненные исследования позволяют исключить возможные последствия повышения температуры в устройстве, например, изменение формы передаваемых сигналов, деградация материалов, тепловое расширение элементов платы и, как следствие, разрыву или повреждению медных дорожек на стыке – наружный слой-переходное отверстие.

Ключевые слова: печатная плата, стек, топологическое моделирование, HyperLynx, материалы печатных плат

Для цитирования: Максимов П. А., Ишков А. С., Маркелов М. К. Исследование влияния параметров материалов стека ячейки защиты информации на ее надежность // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 54–63. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INFORMATION SECURITY CELL STACK MATERIAL PARAMETERS ON ITS RELIABILITY

P.A. Maksimov¹, A.S. Ishkov², M.K. Markelov³

¹ Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

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

¹ agdvs8880@gmail.com, ^{2,3} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Printed circuit boards of modern analog, digital and digital-analog electronic devices of medium complexity and higher have a base in the form of a stack-a set of layers for various purposes, which are subsequently pressed into a single printed circuit board. The materials used for the formation of these layers play a significant role in the further performance of the electronic device, since they have different electrical, thermal and mechanical parameters that determine the advantages of a particular stack and, accordingly, the possible limitations of the device made on its basis. *Materials and methods.* The quality of the materials used for printed circuit boards is characterized by a variety of technical parameters that can significantly affect the characteristics of the final electronic devices. The negative impact of the materials of the printed circuit board stack can manifest itself both immediately after the manufacture of the product, and during operation, leading to instantaneous or delayed failures of various types of criticality. *Results.* It is established that in the conditions of production of modern electronic devices and printed circuit boards for them, including those operating in high-frequency bands, the quality of their work can be influenced by a variety of factors. The paper shows that in order to minimize the possible risks associated with various physical phenomena and the resulting parasitic parameters of printed circuit board materials, it is necessary to conduct a simulation of its operation, taking into account the possible parameters of the materials used and their impact on at least the most critical areas – the printed circuit board, the installation sites of microcircuits and other radio elements. The values of the amount of heat released per unit of its area are determined, since many characteristics of electronic components and printed circuit board materials, their performance depends on the temperature regime within which they operate. *Conclusions.* The performed studies allow us to exclude possible consequences of an increase in temperature in the device, for example, a change in the shape of the transmitted signals, degradation of materials, thermal expansion of the board elements and, as a result, rupture or damage to the copper tracks at the junction-the outer layer-the transition hole.

Keywords: printed circuit board, stack, topological modeling, HyperLynx, printed circuit board materials

For citation: Maksimov P.A., Ishkov A.S., Markelov M.K. Investigation of the influence of information security cell stack material parameters on its reliability. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 54–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

Введение

Современная электронная аппаратура, а также важность, объемность решаемых ею задач заставляют предъявлять к надежности ее работы высокие требования. Актуальной задачей является прогнозирование различных побочных эффектов и паразитных параметров, которые могут ухудшать надежность печатной платы, реализующей электрическую принципиальную схему электронной аппаратуры. Основными такими негативными явлениями, которые вызваны свойствами материалов печатной платы, могут быть фазовые задержки, появляющиеся в линиях связи и печатном монтаже, перегрев печатной платы и ее элементов [1–3].

При этом с возрастанием сложности проектируемой аппаратуры, увеличением количества используемых элементов и слоев в печатных платах в разы возрастает и сложность анализа конечного устройства. В результате не вызывает сомнений тот факт, что без использования макетирования и моделирования прогнозировать появление тех или иных побочных явлений в работе печатной платы становится практически невозможным.

В разрезе проведения испытаний для оценки надежности функционирования устройства до его выпуска в серийное производство можно выделить два основных способа – макетирование и моделирование. В случае анализа влияния основных параметров, используемых для печатных плат материалов, предпочтительней именно второй вариант. Моделирование позволяет без использования дорогостоящего оборудования и значительных временных затрат, возможного использования нескольких макетов произвести моделирование многослойной печатной платы.

Хотя математический подход имеет свои ограничения на используемые модели реальных физических объектов и прочие ограничения, связанные с применением современного математического аппарата, его проведение гораздо более выгодно и требует лишь учета ограничений, налагаемых реализацией соответствующих моделей и алгоритмов.

В настоящее время для моделирования многослойной печатной платы, упрощенная схема которой приведена на рис. 1, широко применяется комплекс программных средств HyperLynx, предназначенный для моделирования, анализа и верификации проектов печатных плат.

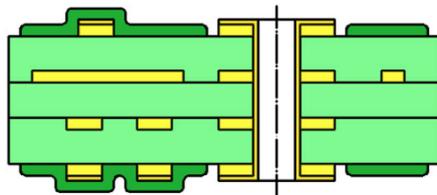


Рис. 1. Упрощенная схема многослойной печатной платы, состоящей из четырех слоев

Предварительный анализ, в том числе с использованием топологического моделирования в программе HyperLynx, позволит с достаточной степенью достоверности определить различные параметры печатной платы [4–6]. Это позволяет повысить повторяемость сложных изделий, заранее учитывая возможные явления и устраняя спектр разнообразных ошибок, в том числе связанных с выбором материалов стека.

Описание свойств и функционала моделируемого объекта

Используя программу HyperLynx, можно провести общую оценку влияния некоторых параметров материалов на параметры функционирования печатной платы до этапа изготовления ее опытного образца с целью прогнозирования влияния материалов печатной платы на работу изделия.

Известно, что основными свойствами материалов печатных плат являются: диэлектрическая постоянная, тангенс угла потерь, теплопроводность, коэффициент расширения, удельное сопротивление, пробивное напряжение, механическая стойкость, влагостойкость и др. [8–10].

Для проведения исследований была разработана печатная плата ячейки защиты информации (рис. 2), которая представляет из себя два вычислительных узла, приемный и передающий, каждый из которых, соответственно, принимает и декодирует с последующей передачей в систему входной поток данных.

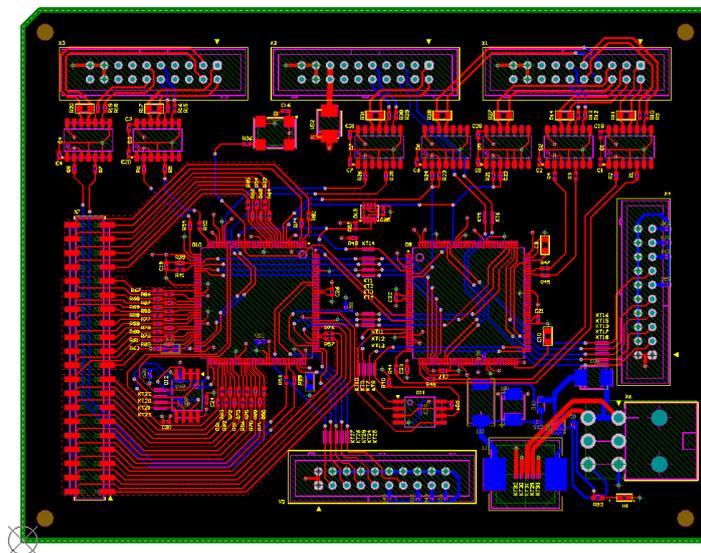


Рис. 2. Печатная плата ячейки защиты информации

С любыми внешними устройствами данная ячейка связана интерфейсными микросхемами и разъемами, к которым подведены линии различных интерфейсов передачи данных. Присутствуют как параллельные линии данных, так и последовательные, в том числе дифференциальные. Структура и расположение элементов соответствуют типовым расположениям, применяемым во многих цифровых устройствах. Также имеется и схема питания, вынесенная стандартно на край печатной платы, состоящая из диодов, защищающих схему от переполюсовки при неправильном подключении разъема питания, понижающего импульсного стабилизатора и фильтрующих цепей. Разработанная печатная плата ячейки защиты информации позволяет произвести не только моделирование данного изделия, но и с некоторой погрешностью

произвести оценку работы других возможных электронных элементов со схожими структурой и принципами функционирования.

Методика проведения моделирования

Используя моделирование, можно оценить влияние диэлектрической проницаемости и теплопроводности на параметры работы ячейки защиты информации. Впоследствии это позволит выбрать структуру, перечень применяемых материалов и конструкцию печатной платы. Методика проведения моделирования следующая. Имеющаяся модель печатной платы загружается в программу HyperLynx. Далее происходит последовательная настройка параметров стека в соответствии с заданными параметрами, типичными для применяемых классов материалов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры диэлектрических материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Теплопроводность
FR-4	5,4	0,25
ФАФ-4Д	2,5	
IMS-20		2

По итогам выполненного моделирования делаются выводы, производится оценка полученных результатов.

Моделирование топологии ячейки

Моделирование влияния диэлектрической постоянной материалов выполнено с использованием линии данных интерфейса FSMC (рис. 3). Данный параллельный интерфейс выбран по ряду причин – он один из наиболее протяженных, разведен в соответствии с правилами разводки для высокоскоростных интерфейсов и имеет общие параметры с линиями, которые используются для иных интерфейсов типа parallel, parallel LVDS, DDR, QDR. Таким образом, данный интерфейс позволяет оценить влияние диэлектрической проницаемости на сигналы в подобных линиях данных.

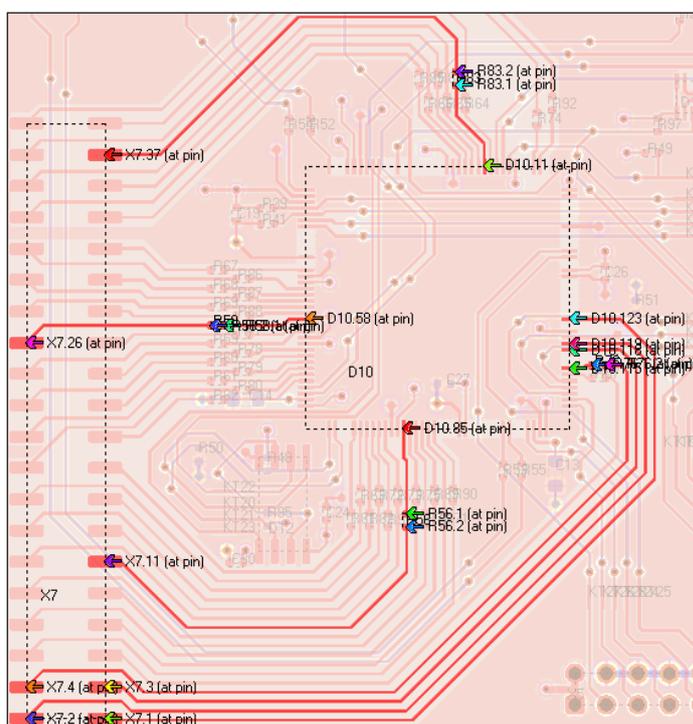


Рис. 3. Линии параллельного интерфейса, выбранные для проведения моделирования

Перед непосредственной оценкой влияния диэлектрической проницаемости материала (μ) печатной платы на сигналы в линиях стоит оговориться, что программа HyperLynx не позволяет учитывать неоднородности в материалах, будь то медные трассы или материал диэлектрика, считая все материалы однородными [9, 10]. Несмотря на это, общая оценка параметров при выборе тех или иных материалов позволит оценить и максимальные отклонения при известных отклонениях параметров материала от номинальных.

Вначале проведем моделирование влияния материала диэлектрика на значение задержки сигнала в линиях, выбирая материалы FR-4 и ФАФ-4Д, значение диэлектрической проницаемости которых отличается примерно вдвое (рис. 4). Для этого выберем самую длинную линию, соответствующую выводу D10.123 микроконтроллера, и проанализируем сигнал частотой 500 МГц в ней. Для выводов будем использовать модель вывода SDRAM_DQ микросхемы ПЛИС Virtex4_FF896, поставляемой производителем, так как ее параметры позволяют проводить моделирование с достаточной степенью адекватности на достаточно высоких выбранных частотах.

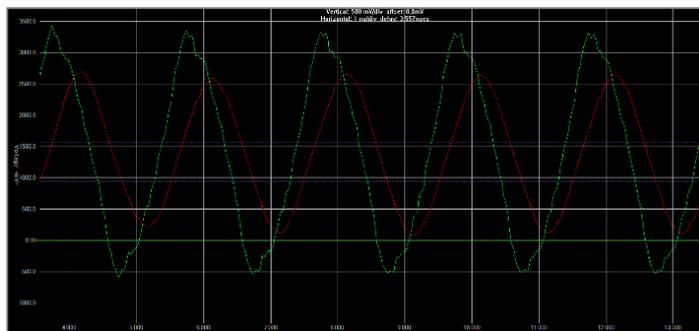


Рис. 4. Разница уровней напряжений в одной и той же линии при значении частоты 500 МГц и значениях $\mu = 5,4$ и $\mu = 2,4$

На полученной осциллограмме видно, что уровни сигналов в одной и той же линии различаются на значение примерно в 0,8 В. Другими словами, в линии одной и той же длины затухание может составлять до $2/7$ от амплитуды сигнала, что с учетом случайных воздействий на печатную плату вызывает необходимость учитывать длины линий и количество элементов в линии, потери в которых в совокупности с потерями в линии могут повлиять на стабильный прием и передачу данных.

Другое важное влияние, оказываемое материалом диэлектрика и значением его диэлектрической проницаемости на параметры сигналов в линии – возрастающая со значением μ диэлектрика фазовая задержка, которая в ряде случаев может привести к неверному считыванию данных с параллельной шины, либо рассинхронизации двух устройств, тактируемых по одной линии со значительной задержкой распространения.

На рис. 5 приведены результаты моделирования для материала FR-4, причем для исследования выбраны различные линии интерфейса, указанные на рис. 3. Они имеют разную длину, часть из них не имеет элементов в своем составе, в части присутствуют согласующие резисторы, которые также влияют на задержку, так как образуют с распределенными емкостями RC-цепочки.

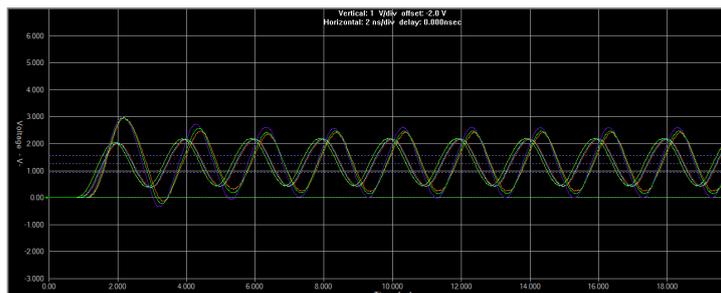


Рис. 5. Задержка сигналов в линиях параллельной шины при $f = 500$ МГц и $\mu = 5,4$

В результате моделирования установлено, что даже в линиях, близких по длине, фаза приходящих на разъем сигналов различается. При различии же длин линий на сантиметры задержка между линиями может составлять угол, равный 90° , что приведет к неверному считыванию устройством принимаемых данных.

На следующей осциллограмме (рис. 6) видно, что при уменьшении μ материала в два раза различия в скорости распространения сигналов в различных линиях практически исчезают.

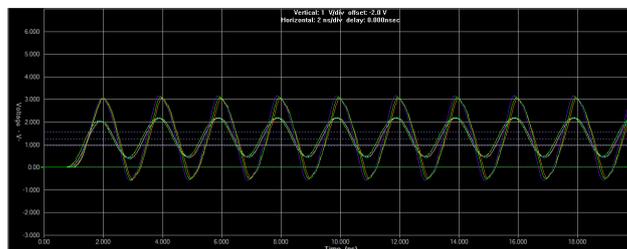


Рис. 6. Задержка сигналов в линиях параллельной шины при $f = 500$ МГц и $\mu = 2,4$

Другим важным параметром, прямо влияющим на функционирование ячейки памяти, является количество теплоты, выделяемой с единицы ее площади, так как многие характеристики электронных компонентов и материалов печатных плат, их работоспособность зависят от температурного режима, в пределах которого они работают. В частности, температурные значения определяют необходимые ширины медных поясков вокруг переходных отверстий, также допустимые максимальные токи в проводящих слоях, сопротивления сигнальных линий, токи утечки микросхем и другие важные параметры устройства.

При рассмотрении печатной платы с точки зрения ее тепловых параметров обычно говорят о рассеиваемой мощности отдельных элементов и суммарной мощности, выделяемой печатной платой в виде тепла. Основным свойством, способствующим теплообмену между источником и средой, является теплопроводность используемого материала и его площадь соприкосновения чаще всего с воздушной средой, а также смежные параметры – наличие рядом других источников тепла, конвекция и скорость воздушных потоков в близком пространстве, геометрия самой печатной платы и располагаемых на ней элементов.

Для проведения моделирования для используемой ячейки было выбрано два материала – стандартный FR-4 и специальный материал с металлическим основанием IMS-20. Условия нормальные, начальная температура воздуха 20°C , присутствуют небольшие воздушные потоки со скоростями $1\text{--}4$ см/с с обеих сторон платы. Для первого этапа моделирования использовались дополнительные условия – печатная плата одна и находится в закрытом корпусе, температура стенок которого 20°C , мощности рассеяния основных элементов платы равны половинным значениям, что примерно соответствует реальной нагрузке на устройство, тепло-выделение разъемов и пассивных элементов (за исключением индуктивности) отсутствует. Для материала FR-4 получено изображение распределения температуры, приведенное на рис. 7.

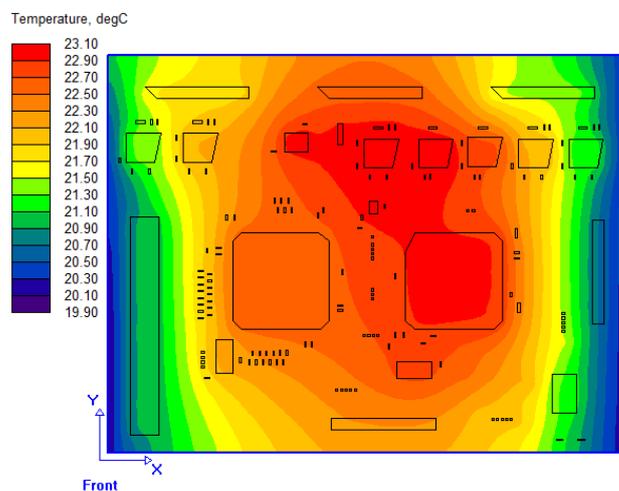


Рис. 7. Распределение температуры для материала FR-4

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при заданных условиях моделирования максимум температуры в $23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ возникает между правым микроконтроллером и интерфейсными микросхемами, что вызвано их тепловыделением и расположением элементов на плате. Данный микроконтроллер с трех сторон окружен другими выделяющими тепло микросхемами, не дающими теплу распространяться по площади печатной платы, ограничивая способность накапливаемого тепла к рассеянию во всех направлениях, что и создает данную область относительно повышенной температуры.

Если провести моделирование с теми же параметрами, используя материал типа IMS-20 (рис. 8), то можно увидеть, что площадь области наибольшей температуры расширилась, а температура при этом возросла.

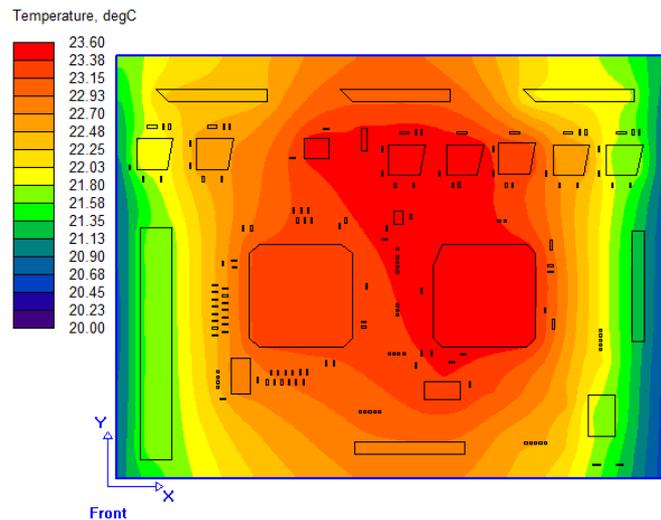
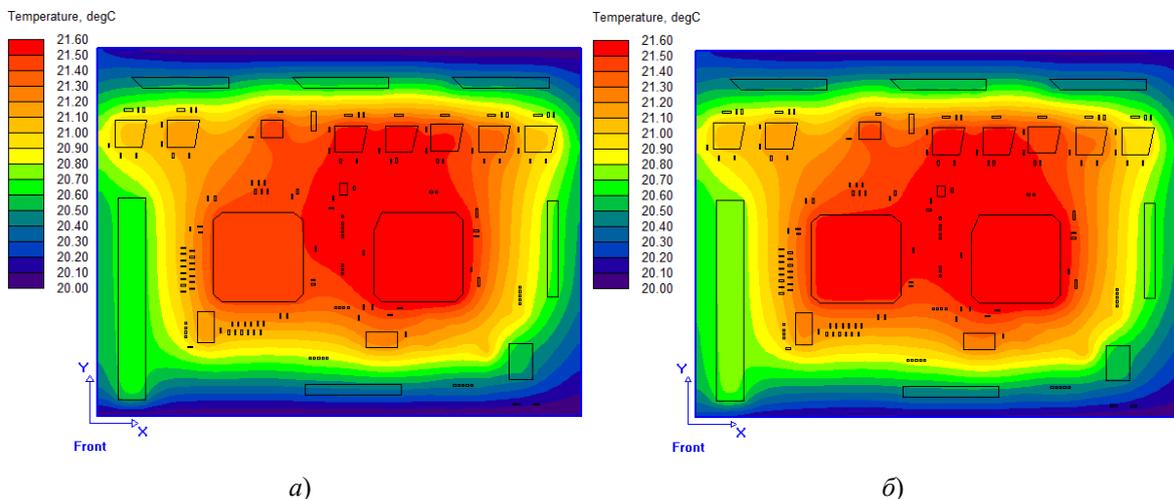


Рис. 8. Распределение температуры для материала типа IMS-20

Причинами такого явления при возросшей теплопроводности материала диэлектрика является его изоляция на подавляющем протяжении печатной платы от внешней среды, что приводит к накоплению тепла на внутренних слоях.

Таким образом, данные результаты можно рассматривать как предостережение от использования материала с большей теплопроводностью, особенно при наличии элементов, рассеивающих значительные мощности.

Выполнено исследование распределения температуры на печатной плате с различными диэлектриками в условиях обдувания потоком воздуха. Скорость воздуха 400 см/с в направлении $-X$ для материала FR-4 (рис. 9,а), для материала типа IMS-20 (рис. 9,б).



а)

б)

Рис. 9. Распределение температуры по печатной плате

В обоих случаях можно увидеть как изменение распределения «температурных фигур», так и падение общей температуры печатной платы до одинакового значения в 21,6 °С, что говорит о значительном влиянии наличия воздушного потока на результирующую температуру устройства.

Получены изображения распределения температуры по печатной плате при наличии помимо исследуемой платы в одном корпусе дополнительных, например платы питания, при отсутствии воздушного потока внутри устройства. На рис. 10 приведено изображение печатной платы, которая содержит силовую плату с мощностью 30 Вт (слева) и информационную плату с мощностью 4 Вт (справа) для материала FR-4 (рис. 10,а), для материала типа IMS-20 (рис. 10,б).

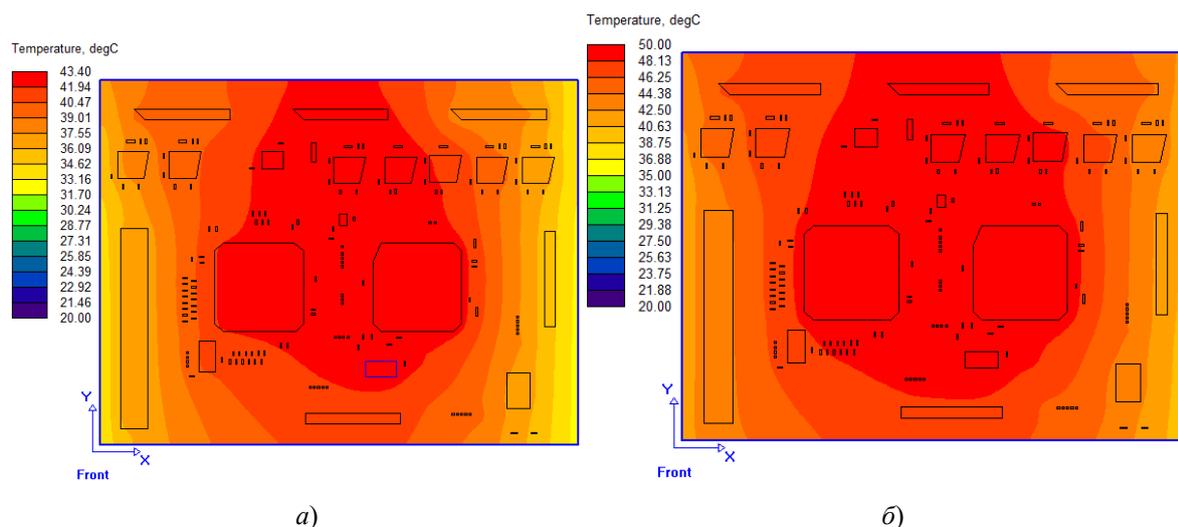


Рис. 10. Распределение температуры по печатной плате

Таким образом, результаты моделирования на рис. 10 свидетельствуют о том, что наличие дополнительных печатных плат иного функционала или других устройств в непосредственной близости от исследуемого образца приведет к резкому повышению температуры устройства. Возможными последствиями этого может быть изменение формы передаваемых сигналов, деградация материалов, тепловое расширение элементов платы и, как следствие, разрыв или повреждение медных дорожек на стыке «наружный слой – переходное отверстие».

Предупредить данное явление можно использованием, во-первых, простейших радиаторов на элементах, выделяющих большое количество теплоты, обеспечивая дополнительный путь исходящему от них тепловому потоку, применением диэлектриков с металлическим основанием на одной из сторон платы. Другим способом является использование заполненных теплопроводными материалами переходных отверстий и винтов, через которые тепловые потоки смогут циркулировать и рассеиваться как на другие части платы, так и в окружающее пространство.

Заключение

Проведено моделирование печатной платы ячейки защиты информации в программе HyperLynx с учетом влияния диэлектрических и тепловых параметров используемых материалов. Оценено влияние диэлектрической постоянной материала на скорость распространения сигналов и их амплитуду. Приведены изображения теплового распределения для одиночной платы с учетом реальных потребляемых мощностей с используемым диэлектриком и моделью диэлектрика с повышенной теплопроводностью на основе материала IMS-20. Проведено моделирование плат с учетом наличия теплового потока, а также печатных плат с различным количеством выделяемого тепла, даны некоторые советы по уменьшению температуры печатной платы и ее элементов.

Список литературы

1. Джонсон Г., Грэхем М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. М. : Вильямс, 2006. 624 с.
2. Collin R. E. Foundations for microwave engineering. 2 ed. New York : McGraw-Hill, 1992. 924 p.
3. Трундов А. В. Практические рекомендации по проектированию печатных плат. М. : Издательские решения, 2020. 180 с.
4. Hnatiuc M., Iov C. J. Cooling with Mentor Graphics HyperLynx Thermal // IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Bucharest, 2014. P. 250–265.
5. Jinhui Li, Huabo Duan, Keli Yu, Siting Wang. Interfacial and Mechanical Property Analysis of Waste Printed Circuit Boards Subject to Thermal Shock // Journal of the Air & Waste Management Association. 2010. Vol 60. P. 229–236.
6. Jiang N., Novak J., Li X. [et al.]. Power Electronics PCB Concept Supports Thermal Management // Power Electronics Technology. 2012. Vol 39. P. 23–27.
7. Coonrod J. The Impact of Electrical and Thermal Interactions on Microwave PCB Performance // Microwave Journal. 2014. Vol. 57. P. 68–78.
8. Zhang H. HyperLynx Simulation and PCB Design. Beijing : Mechanical Industry Press, 2005. 257 p.
9. Yang M., Liang S. Application of HyperLynx in the Development of High Speed Signal Processing Circuits // IEEE 5th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, 2019. P. 743–751.
10. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx // Electronic Devices. 2009. Vol. 32. P. 445–451.

References

1. Dzhonson G., Grekhem M. *Konstruirovaniye vysokoskorostnykh tsifrovyykh ustroystv = Designing high-speed digital devices*. Moscow: Vil'yams, 2006:624. (In Russ.)
2. Collin R.E. *Foundations for microwave engineering*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1992:924.
3. Trundov A.V. *Prakticheskie rekomendatsii po proektirovaniyu pechatnykh plat = Practical recommendations for the design of printed circuit boards*. Moscow: Izdatel'skie resheniya, 2020:180. (In Russ.)
4. Hnatiuc M., Iov C.J. Cooling with Mentor Graphics HyperLynx Thermal. *IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. Bucharest, 2014:250–265.
5. Jinhui Li, Huabo Duan, Keli Yu, Siting Wang. Interfacial and Mechanical Property Analysis of Waste Printed Circuit Boards Subject to Thermal Shock. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010;60:229–236.
6. Jiang N., Novak J., Li X. [et al.]. Power Electronics PCB Concept Supports Thermal Management. *Power Electronics Technology*. 2012;39:23–27.
7. Coonrod J. The Impact of Electrical and Thermal Interactions on Microwave PCB Performance. *Microwave Journal*. 2014;57:68–78.
8. Zhang H. *HyperLynx Simulation and PCB Design*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005:257.
9. Yang M., Liang S. Application of HyperLynx in the Development of High Speed Signal Processing Circuits. *IEEE 5th International Conference on Computer and Communications*. Chengdu, 2019:743–751.
10. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx. *Electronic Devices*. 2009;32:445–451.

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Андреевич Максимов

инженер-программист,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: agdvs8880@gmail.com

Pavel A. Maksimov

Software engineer,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Антон Сергеевич Ишков

кандидат технических наук,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Anton S. Ishkov

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

Максим Константинович Маркелов

старший преподаватель кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Maksim K. Markelov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 12.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2021

Принята к публикации/Accepted 28.05.2021

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРА

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², В. И. Кондрашин³,
В. С. Александров⁴, Г. В. Козлов⁵, А. И. Левин⁶

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

³ ООО «Парадигма», Пенза, Россия

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ vlad_kondrashin@mail.ru,

⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ gvkl7@yandex.ru, ⁶ levin.alescha2013@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность цели.* Традиционным методам синтеза прозрачных проводящих оксидов – перспективным материалам опто- и полупроводниковых приборов и устройств присущи серьезные недостатки, обусловленные использованием вакуума, высокой стоимостью производства. Цель работы заключается в исследовании влияния на свойства прозрачных проводящих оксидов параметров раствора при использовании метода спрей-пиролиза, который позволяет устранить указанные недостатки. *Материалы и методы.* В качестве материала для получения прозрачных проводящих оксидов выбран оксид олова, легированный сурьмой, который обладает следующими преимуществами: химическая инертность, устойчивость при высоких температурах и в атмосферных условиях, достаточно высокие показатели прозрачности и проводимости. Синтез покрытия осуществлен методом спрей-пиролиза, который позволяет устранить недостатки других методов, требующих наличие вакуума, а следовательно, имеющих высокую стоимость производства. *Результаты.* Исследовано влияние объема раствора, концентрации примеси, концентрации прекурсоров на свойства прозрачных проводящих покрытий (поверхностное сопротивление, удельную проводимость, концентрацию носителей, длину свободного пробега). *Выводы.* В результате исследования синтезированных образцов показано, что при увеличении объема раствора наблюдается уменьшение поверхностного сопротивления и повышение удельной проводимости. Определено, что оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ для достижения минимального поверхностного сопротивления образцов с покрытием SnO_2 составляет 0,25 моль/л.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, прозрачный проводящий оксид, прекурсор, примесь, объем раствора, поверхностное сопротивление

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Александров В. С., Козлов Г. В., Левин А. И. Управление свойствами прозрачных проводящих оксидов в зависимости от параметров раствора // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-8

CONTROL OF THE PROPERTIES OF TRANSPARENT CONDUCTING OXIDES DEPENDING ON THE SOLUTION PARAMETERS

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², V.I. Kondrashin³,
V.S. Aleksandrov⁴, G.V. Kozlov⁵, A.I. Levin⁶

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

³ Paradigm LLC, Penza, Russia

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ vlad_kondrashin@mail.ru,

⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ gvkl7@yandex.ru, ⁶ levin.alescha2013@yandex.ru

Abstract. *Background.* Traditional methods of synthesis of transparent conducting oxides—a promising material for opto- and semiconductor devices and devices—have serious disadvantages due to the use of vacuum and high production costs. The aim of the work is to study the effect of the solution parameters on the properties of transparent conducting

oxides when using the spray-pyrolysis method, which eliminates these disadvantages. *Materials and methods.* As a material for the production of transparent conducting oxides, tin oxide doped with antimony is selected, which has the following advantages: chemical inertia, stability at high temperatures and in atmospheric conditions, sufficiently high transparency and conductivity. The coating was synthesized by spray pyrolysis, which eliminates the disadvantages of other methods that require a vacuum, and therefore have a high production cost. *Results.* The influence of the solution volume, impurity concentration, and precursor concentration on the properties of transparent conductive coatings (surface resistance, specific conductivity, carrier concentration, and free path length) is studied. *Conclusions.* As a result of the study of the synthesized samples, it is shown that with an increase in the volume of the solution, a decrease in the surface resistance and an increase in the specific conductivity are observed. It is determined that the optimal concentration of the precursor $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ to achieve the minimum surface resistance of samples coated with SnO_2 is 0,25 mol/l.

Keywords: pyrolysis spray, transparent conductive oxide, precursor, impurity, solution volume, surface resistance

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the RFBR as part of a scientific project № 20-38-90044.

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I., Alexandrov V.S., Kozlov G.V., Levin A.I. Control of the properties of transparent conducting oxides depending on the solution parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-8

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) широко используются в опто- и полупроводниковых приборах и устройствах. Современному этапу развития технологий присуща тенденция замены оксида индия – олова на альтернативные материалы, такие как оксид олова-сурьмы, оксид цинка-алюминия, оксид олова-фтора и ряд других. При легировании примесью таким оксидам присущи высокие уровни проводимости и прозрачности. Благодаря легированию достигается возрастание концентрации носителей заряда образующихся в зонной структуре MeO неглубоких примесных уровней. При этом валентность атома примеси должна быть выше, чем у атома металла, образующего оксидное соединение [1, 2]. При этом ППО присуща проводимость *n*-типа.

Кроме высокой проводимости, в видимой и ближней инфракрасной части электромагнитного спектра излучения ППО присуще высокое значение коэффициента пропускания $T > 80\%$. Область пропускания ППО характеризуется длиной волны λ в диапазоне от 400 до 1500 нм. При повышении длины волны имеет место отражение света ввиду наличия плазменного края. При этом частота света ω совпадает с плазменной частотой ω_p коллективных колебаний носителей заряда в материале. Напротив, при понижении длины волны в ультрафиолетовой области ($\lambda < 350$ нм) наблюдается поглощение фотонов с энергией $\hbar\omega > E_g$, поэтому светопередача ограничена запрещенной зоной. Для получения таких оксидов может использоваться несколько методов: реактивное испарение, МОСVD, высокочастотное распыление и химическое осаждение из паровой фазы и др. Однако традиционные методы обладают рядом недостатков, один из наиболее существенных – использование вакуума, что усложняет производство прозрачных проводящих оксидов и отражается на стоимости таких покрытий.

В настоящей статье представлены результаты анализа технологических режимов, в том числе параметров раствора при получения прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза. В качестве материала использован оксид олова, легированный сурьмой, который обладает следующими преимуществами: химическая инертность, устойчивость при высоких температурах и в атмосферных условиях, достаточно высокие показатели прозрачности и проводимости.

Постановка задачи

Цель – теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров раствора на свойства прозрачных проводящих оксидов, поскольку параметры раствора, такие как его объем, концентрация прекурсора, концентрация примеси напрямую влияют на проводимость

и пропускную способность ППО. Особенно стоит учитывать, что оптические и электрические свойства напрямую связаны с плазменной частотой. Достигнутые результаты целесообразно использовать при создании информационно-управляющей системы (ИУС) синтеза методом спрей-пиролиза ППО, применяемых в производстве солнечных элементов, умных стекол, органических светодиодов, чувствительных элементов для газовых сенсоров, покрытия для LCD-экрана, сенсорных экранов [3–6].

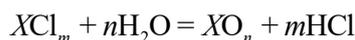
Для получения прозрачных проводящих оксидов использованы натриево-кальциево-силикатные стекла, квадратной формы размером 2,5 на 2,5 см. Технология получения прозрачных проводящих оксидов включает следующие основные этапы:

- этап подготовки поверхности стеклянных подложек;
- этап подготовки растворов прекурсоров;
- этап осаждения на поверхности подложек пленок диоксида олова (как чистых, так и легированных сурьмой) [7].

В статье наибольшее внимание уделено исследованию прекурсоров, поскольку параметры раствора оказывают существенное влияние на параметры качества покрытий при производстве прозрачных проводящих оксидов методом пиролиза аэрозолей.

Использованы следующие вещества: первый прекурсор – тетрахлорид олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); второй прекурсор – трихлорид сурьмы (SbCl_3); растворитель – этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Для получения оксида олова выбран в качестве прекурсора тетрахлорид пентагидрат олова. Формирование пленки оксида металла на примере хлорида описывается известной формулой



где X – металл, например, Cu, Zn, Sn.

Что касается трихлорида сурьмы, то выбор прекурсора обусловлен возможностью получения сурьмы чистотой 99,999 %. При этом сурьма в чистом виде является токсичным материалом, указанной проблеме посвящен ряд работ [8, 9].

Сурьма в качестве примеси выбрана в связи с тем, что результаты проводимости и прозрачности покрытий оксида олова с сурьмой имеют достаточно высокие показатели для использования в качестве прозрачных проводящих оксидов [10].

Также следует отметить, что в качестве растворителя необходимо использовать спиртовые растворы, поскольку водные растворы могут вызвать растрескивание подложек [11].

Далее представлены основные аспекты подготовки раствора первого прекурсора для осуществления синтеза пленок диоксида олова без примесей. При приготовлении раствора объемом $V_{\text{rast}} = 60$ мл и молярной концентрацией $C_M = 0,25$ моль/л, для расчета массы данного прекурсора m_{prec1} применено выражение

$$m_{\text{prec1}} = C_m \cdot V_{\text{rast}} \cdot M_{\text{prec1}},$$

где M_{prec1} – молярная масса первого прекурсора.

Расчетным путем получено значение $m_{\text{prec1}} = 5,26$ г, для взвешивания прекурсора использованы электронные весы. Данная масса порошка тетрахлорида пентагидрата олова помещена в емкость с этанолом объемом 30 мл и перемешана магнитной мешалкой на протяжении 10 мин, что способствовало быстрому растворению прекурсора. Затем в емкость был добавлен этанол до получения общего объема смеси 60 мл, после чего раствор повторно был перемешан на протяжении 30 мин. Приготовление раствора осуществляется непосредственно перед его использованием, в это же время выполнена сушка подложек.

Методика подготовки раствора, содержащего первый и второй прекурсора для получения легированных сурьмой пленок диоксида олова. Первый прекурсор массой m_{prec1} растворен в этаноле объемом 30 мл. Затем в смесь добавлен порошок трихлорида сурьмы, имеющий массу m_{prec2} ; полученный раствор на протяжении 10 мин перемешан магнитной мешалкой. После этого в емкость добавлен этанол до получения объема 60 мл и повторно перемешан на протяжении 90 мин.

Для синтеза пленок диоксида олова, имеющих разный уровень легирования, использован второй прекурсор с разной мольной долей N_{prec2} трихлорида сурьмы, $N_{prec2} = (0,001; 0,0005; 0,00025)$. Масса второго прекурсора m_{prec2} рассчитана по формуле

$$m_{prec2} = n_{prec2} \cdot M_{prec2},$$

где n_{prec2} – количество вещества второго прекурсора; M_{prec2} – молярная масса второго прекурсора.

Для определения количества вещества второго прекурсора n_{prec2} использовано выражение

$$n_{prec2} = \frac{N_{prec2} (n_{C_2H_5OH} + n_{prec1})}{1 - N_{prec2}},$$

где $n_{C_2H_5OH}$ – количество вещества этанола, n_{prec1} – количество вещества первого прекурсора.

При этом учтено, что мольная доля компонента раствора представляет собой отношение количества вещества компонента к суммарному количеству вещества всех компонентов в растворе.

Вычисленные значения массы второго прекурсора m_{prec2} при соответствующих концентрациях данного прекурсора сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения масс при соответствующих концентрациях второго прекурсора

$m_{prec2}, \text{Г}$	$N_{prec2}, \%$
0,055	0,025
0,11	0,05
0,22	0,1

Результаты экспериментов

Значения технологических параметров синтеза образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова сведены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры процесса синтеза ППО

Технологический параметр	Значение параметра
Материал подложек	Натриево-кальциево-силикатное стекло
Первый прекурсор	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Второй прекурсор	SbCl_3
Растворитель	Этанол
Газ-носитель	Сжатый воздух
Молярная концентрация первого прекурсора, C_M	0,25 моль/л
Концентрация второго прекурсора, N_{prec2}	0,1 % 0,05 % 0,025 %
Объем растворов, V_{rast}	От 5 до 20 мл
Расстояние между распылителем и подложкой, l	300 мм
Входное давление воздуха в распылителе, p	2 бар
Температура нагревателя, T_S	450 °С

Рисунок 1 демонстрирует, каким образом концентрация тетрахлорида пентагидрата олова оказывает влияние на поверхностное сопротивление покрытий на основе диоксида олова. В результате многократных экспериментов, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления R_S образцов с покрытием SnO_2 , получен результат – оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – это 0,25 моль/л, также необходимо отметить, что оптимальные значения параметров T_S , C_M , l , p тоже подобраны таким способом [12–14].

В результате выполненных исследований синтезированы пленки ППО при различных условиях, которые систематизированы в табл. 3.

Таблица 3

Условия синтеза экспериментальных образцов

Порядковый номер образца ППО	Концентрация второго прекурсора, $N_{prec2}, \%$	C_M , моль/л	V , мл
1	0	0,1	5
2			10
3			15
4			20
5			5
6		10	
7		15	
8		20	
9		0,25	5
10			10
11			15
12			20
13			5
14		10	
15		15	
16	0,025	0,25	5
17			10
18			15
19		0,1	5
20			10
21			15
22		0,25	20
23			5
24			10
25	15		
26	20		

Обсуждение результатов

В процессе экспериментов получены результаты измерения зависимостей электрофизических параметров (поверхностного сопротивления, удельной проводимости, подвижности носителей заряда, длины свободного пробега) от объема раствора при разных значениях концентрации примеси, что соответственно демонстрируют рис. 1–4.

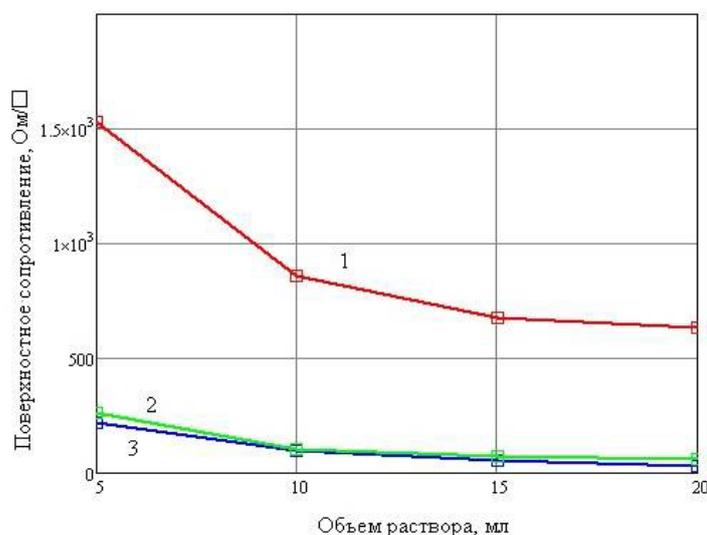


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от объема раствора:
 1 – примесь отсутствует; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

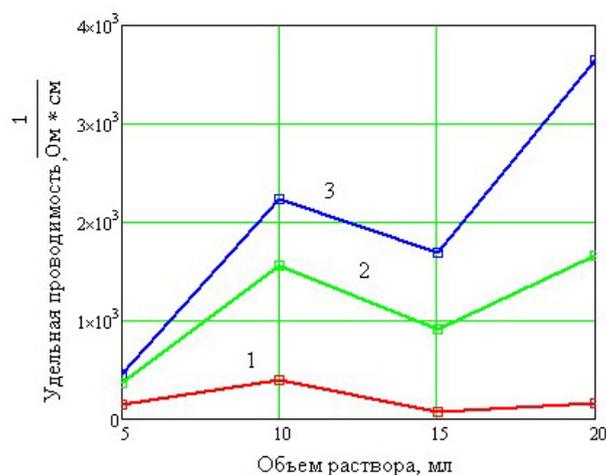


Рис. 2. Функция зависимости удельной проводимости от объема раствора:
 1 – примесь отсутствует; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

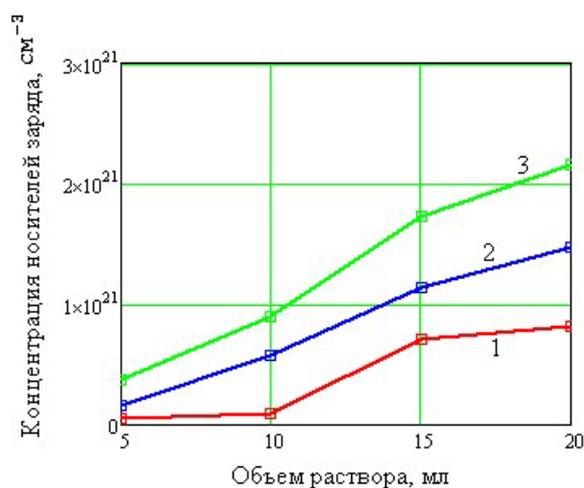


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей заряда от объема раствора:
 1 – образец без примеси; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

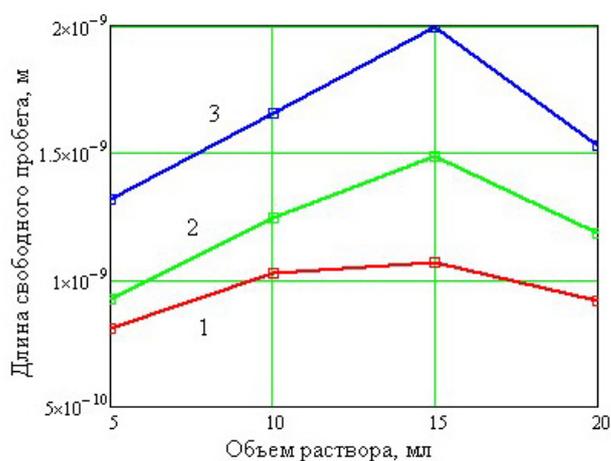


Рис. 4. Влияние объема раствора на длину свободного пробега:
 1 – образцы без примеси; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

Проанализируем влияние объема раствора на свойства ППО: согласно рис. 1 при увеличении объема раствора имеет место снижение поверхностного сопротивления и рост удельной проводимости. Это обусловлено увеличением толщины пленки при увеличении объема раствора. В свою очередь, с ростом толщины пленки снижается ее сопротивление, поскольку имеет место увеличение количества свободных носителей заряда. Данный факт подтверждает график влияния объема на концентрацию носителей заряда при концентрации прекурсора $C_M = 0,25$ моль/л (см. рис. 3). С увеличением объема раствора до определенного значения подвижность носителей уменьшается, а затем возрастает (см. рис. 4), что обусловлено рассеянием носителей, которое существенно вплоть до определенного значения объема раствора, а затем явление рассеяния снижается.

Заключение

Представлены результаты исследования влияния параметров раствора (объема, концентрации примеси, концентрации прекурсоров) на свойства прозрачных проводящих оксидов, что позволило заключить, что при увеличении объема раствора наблюдается уменьшение поверхностного сопротивления и повышение удельной проводимости. Это объясняется ростом толщины пленки при увеличении объема раствора. На основе проведения результате многократных экспериментов, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления R_s образцов с покрытием SnO_2 , получено оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ это 0,25 моль/л.

Поверхностное сопротивление прозрачной проводящей пленки снижается с увеличением концентрации примеси сурьмы, которая замещает в решетке атомы олова. Таким образом, атомы сурьмы являются донорами, а следовательно, способствуют появлению избыточного количества свободных электронов. Анализ проведенных экспериментов доказал, что наиболее высокие показатели проводимости достигаются при использовании раствора со следующими параметрами: объем раствора 10 мл и концентрация примеси 0,05 %.

Список литературы

1. Kawazoe H., Yanagi H., Ueda K. [et al.]. Transparent p-type conducting oxides: design and fabrication of p-n heterojunctions // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 28–36.
2. Gordon R. G. Criteria for choosing transparent conductors // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 52–57.
3. Lewis B. G., Paine D. C. Applications and processing of transparent conducting oxides // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 22–27.
4. Porch A., Morgan D. V., Perks R. M. [et al.]. Electromagnetic absorption in transparent conducting films // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 4734–4737.
5. Tiwari A. N., Khrypunov G., Kurdzesau F. [et al.]. CdTe solar cell in a novel configuration // Prog. Photovoltaics. 2004. Vol. 12. P. 33–38.
6. Hamberg I., Granqvist C. G. Evaporated Sn-doped In_2O_3 films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. P. R123–R160.
7. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis // IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng. 2017. Vol. 225. P. 012255.
8. Biswas P., Wu C. Y. Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: a review // J. Air Waste Manage. 1998. Vol. 48. P. 113–127.
9. Linak W. P., Wendt J. O. L. Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control // Prog. Energ. Combust. 1993. Vol. 19. P. 145–185.
10. Elangovan E., Ramamurthi K. A study on low cost-highly conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films // Appl. Surf. Sci. 2005. Vol. 249. P. 183–196.
11. Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S. [et al.]. Electric and optical properties of semiconductor films based on SnO_2 and SiO_2 // Russ. Electr. Eng. 2004. Vol. 75. P. 11–15.
12. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 258–260.
13. Кондрашин В. И., Печерская Е. А. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ппп (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодеж. науч. школы-семинара. Ульяновск, 2016. С. 175–176.

14. Печерская Р. М., Печерская Е. А., Метальников А. М. [и др.]. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 4. С. 237–241.

References

1. Kawazoe H., Yanagi H., Ueda K. [et al.]. Transparent p-type conducting oxides: design and fabrication of p-n heterojunctions. *MRS Bull.* 2000;25:28–36.
2. Gordon R.G. Criteria for choosing transparent conductors. *MRS Bull.* 2000;25:52–57.
3. Lewis B.G., Paine D.C. Applications and processing of transparent conducting oxides. *MRS Bull.* 2000;25:22–27.
4. Porch A., Morgan D. V., Perks R. M. [et al.]. Electromagnetic absorption in transparent conducting films. *J. Appl. Phys.* 2004;95:4734–4737.
5. Tiwari A.N., Khrypunov G., Kurdzesau F. [et al.]. CdTe solar cell in a novel configuration. *Prog. Photovoltaics.* 2004;12:33–38.
6. Hamberg I., Granqvist C.G. Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows. *J. Appl. Phys.* 1986;60:R123–R160.
7. Zinchenko T.O., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng.* 2017;225:012255.
8. Biswas P., Wu C.Y. Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: a review. *J. Air Waste Manage.* 1998;48:113–127.
9. Linak W.P., Wendt J.O.L. Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control. *Prog. Energ. Combust.* 1993;19:145–185.
10. Elangovan E., Ramamurthi K. A study on low cost-high conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films. *Appl. Surf. Sci.* 2005;249:183–196.
11. Rembeza S.I., Svistova T.V., Rembeza E.S. [et al.]. Electric and optical properties of semiconductor films based on SnO₂ and SiO₂. *Russ. Electr. Eng.* 2004;75:11–15.
12. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of methods for obtaining transparent conductive coatings. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific art. Vseros. inter-university. sci.- practical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2018:258–260. (In Russ.)
13. Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. Investigation of the effect of the impurity concentration on the surface resistance in PPTs (obtained by spray pyrolysis) based on tin dioxide. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 19-y Vseros. molodezh. nauch. shkoly-seminara = Actual problems of physical and functional electronics : Materials of the 19th All-Russian. youth. sci. seminar schools.* Ulyanovsk, 2016:175–176. (In Russ.)
14. Pecherskaya R.M., Pecherskaya E.A., Metal'nikov A.M. [et al.]. Synthesis and properties of nanocrystalline tin dioxide films obtained by aerosol pyrolysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2012;(4):237–241. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

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

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Владислав Игоревич Кондрашин

генеральный директор
ООО «Парадигма»
(Россия, г. Пенза, ул. Кирова, 51)
E-mail: vlad_kondrashin@mail.ru

Vladislav I. Kondrashin

General director,
LLC "Paradigma"
(51 Kirova street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Alexandrov

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

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the polytechnic institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Игоревич Левин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: levin.alescha2013@yandex.ru

Alexey I. Levin

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.09.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

УДК 684.4.05
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-9

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², Г. В. Козлов³,
В. И. Кондрашин⁴, Ю. А. Вареник⁵, В. С. Александров⁶

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

⁴ ООО «Парадигма», Пенза, Россия

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,

⁴ vlad_kondrashin@mail.ru, ⁵ yurik_ru@mail.ru, ⁶ vsalexrus@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является анализ влияния параметров раствора на электрофизические параметры прозрачных проводящих оксидов при их синтезе методом спрей-пиролиза. *Материалы и методы.* В рассмотренной технологии синтеза прозрачных проводящих оксидов спрей-пиролизом использован метод гидролиза растворов хлорного олова удобен для апробации и подбора количества и вида легирующих добавок к SnO₂. Образование пленки оксида осуществляется на нагретой поверхности подложки посредством поверхностного гидролиза хлорида металла. *Результаты.* Показано, что на один из важных параметров качества прозрачных проводящих оксидов (удельное сопротивление, а следовательно, и проводимость) существенное влияние оказывают характеристики раствора (объем, примесь и ее концентрация, прекурсоры и их концентрация). *Выводы.* Результаты экспериментов и их анализ подтвердили, что с целью снижения поверхностного сопротивления ППО необходимо увеличить объем раствора, концентрацию примеси сурьмы, концентрацию прекурсоров. Атомы сурьмы, замещающая атомы олова в решетке, являются донорами и приводят к образованию избыточных свободных электронов и повышению проводимости.

Ключевые слова: параметры раствора, пентагидрат тетрахлорид олова, трихлорид сурьмы, прекурсор, примесь, удельное сопротивление, проводимость

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Козлов Г. В., Кондрашин В. И., Вареник Ю. А., Александров В. С. Анализ влияния характеристик раствора на электрофизические параметры прозрачных проводящих оксидов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 73–79. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-9

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLUTION CHARACTERISTICS ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², G.V. Kozlov³,
V.I. Kondrashin⁴, Yu.A. Varenik⁵, V.S. Alexandrov⁶

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

⁴ Paradigm LLC, Penza, Russia

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,

⁴ vlad_kondrashin@mail.ru, ⁵ yurik_ru@mail.ru, ⁶ vsalexrus@gmail.com

Abstract. *Background.* The aim of the study is to analyze the effect of the solution parameters on the electrophysical parameters of transparent conducting oxides during their synthesis by spray pyrolysis. *Materials and methods.* In the considered technology for the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis, the method of hydrolysis of solutions of chlorine tin is used. It is convenient for testing and selecting the amount and type of alloying additives to SnO₂. The formation of the oxide film is carried out on the heated surface of the substrate by surface hydrolysis of metal chloride. *Results.* It is shown that one of the important quality parameters of transparent conducting oxides (resistivity, and hence conductivity) is significantly affected by the characteristics of the solution (volume, impurity and its concentration, precursors and their concentration). *Conclusions.* The results of the experiments and their analysis confirmed

that in order to reduce the surface resistance of PPO, it is necessary to increase the volume of the solution, the concentration of antimony impurities, and the concentration of precursors. Antimony atoms, replacing tin atoms in the lattice, are donors and lead to the formation of excess free electrons and an increase in conductivity.

Keywords: solution parameters, tin tetrachloride pentahydrate, antimony trichloride, precursor, impurity, resistivity, conductivity

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the RFBR as part of a scientific project № 20-38-90044.

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V., Kondrashin V.I., Varenik Yu.A., Alexandrov V.S. Analysis of the effect of solution characteristics on the electrophysical parameters of transparent conductive oxides. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):73–79. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-9

Введение

В работах [1–4] показано, что метод спрей-пиролиза позволяет синтезировать прозрачные проводящие оксиды (ППО) без применения вакуума. Кроме того, указанный метод имеет преимущества по технико-экономическим показателям, поскольку при меньших затратах на производство показатели качества прозрачных проводящих пленок не ухудшаются. В то же время распространение технологии спрей-пиролиза в промышленном производстве сталкивается с проблемой влияния множества факторов различной природы на свойства прозрачных проводящих оксидов. В частности, в статье [4] описаны результаты применения инструментов контроля качества к описанию влияния технологических режимов (температура нагрева подложки; расстояние от подложки до распылителя; геометрические параметры подложки; давление распылителя; объем раствора; скорость распыления раствора) на электрофизические, а также оптические и морфологические параметры синтезированных ППО.

В работе [5] представлены основные модели взаимосвязей между технологическими режимами и свойствами ППО:

- модель взаимосвязи между технологическими режимами спрей-пиролиза и свойствами ППО в виде ориентированного графа;
- математическая модель, описывающая влияние факторов на свойства ППО в виде системы дифференциальных уравнений;
- аналитические модели на основе регрессионного и корреляционного анализа зависимостей свойств оксидов от технологических параметров.

Экспериментальные исследования влияния объема раствора, концентрации примеси и прекурсоров на проводимость оксидов

В экспериментальных исследованиях применен раствор на основе прекурсоров – пентагидрат тетрагидрид олова и трихлорид сурьмы. Формирование оксидной пленки происходит за счет поверхностного гидролиза хлорида металла на нагретой поверхности подложки.

В данной статье детально рассмотрены функциональные зависимости электрофизических параметров ППО от объема раствора, а также концентрации прекурсоров (рис. 1–6).

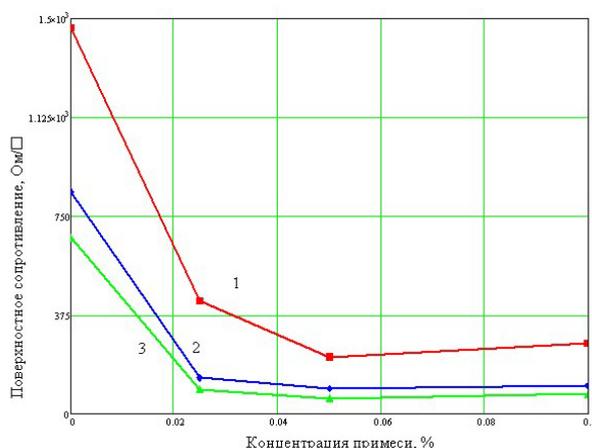


Рис. 1. Влияние концентрации примеси на поверхностное сопротивление ППО при разных значениях объема раствора V :
1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

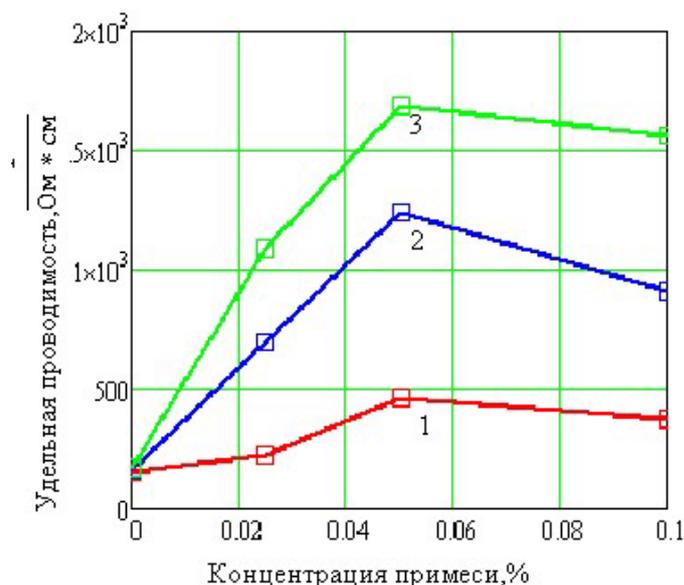


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости от концентрации примеси при разных значениях объема раствора V :

1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

Результаты экспериментов (рис. 2) показывают, что с целью снижения поверхностного сопротивления ППО необходимо увеличить объем раствора, концентрацию примеси сурьмы, концентрацию прекурсоров. Атомы сурьмы, замещая атомы олова в решетке, являются донорами и приводят к образованию избыточных свободных электронов. Свыше определенного значения концентрации легирования наблюдается следующее: избыточные атомы сурьмы не занимают правильные позиции в решетке. Ввиду этого происходит нарушение структуры и, как следствие, увеличение поверхностного сопротивления.

Согласно графикам, представленным на рис. 3, удельное сопротивление снижается с ростом примеси, что также объясняется увеличением числа свободных электронов.

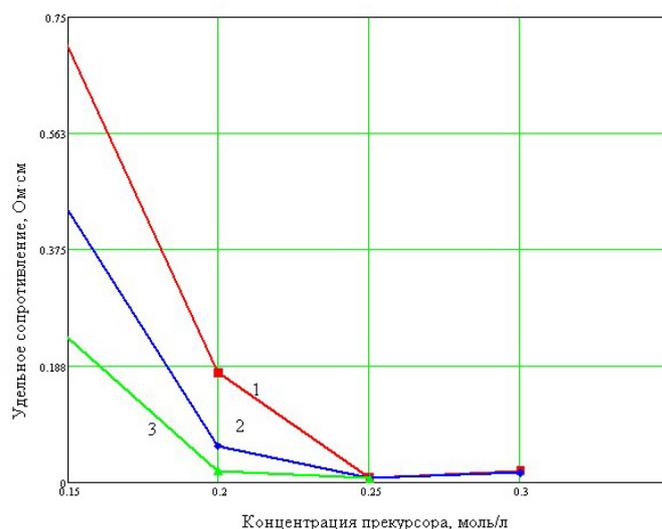


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от концентрации прекурсора при разных значениях объема раствора V :

1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

С увеличением концентрации примеси, начиная с определенного значения, подвижность носителей заряда уменьшается (см. рис. 4), поскольку при этом возрастает рассеяние носителей заряда, приводящее к снижению подвижности.

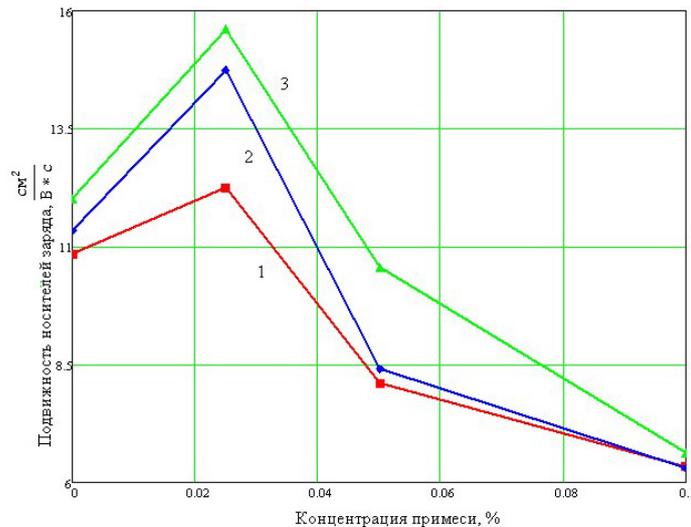


Рис. 4. Влияние концентрации примеси на подвижность носителей заряда при разных значениях объема раствора V :
 1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

На рис. 5 представлена зависимость длины свободного пробега от концентрации примеси. В результате при введении примеси до $0,05\%$ идет рост, в дальнейшем при увеличении процента легирования происходит понижение показателя. Это связано прежде всего с тем, что при концентрации примеси выше $0,05\%$ происходит нарушение структуры из-за большого количества примесных атомов, что приводит к рассеянию носителей заряда, что в свою очередь сказывается на длине свободного пробега.

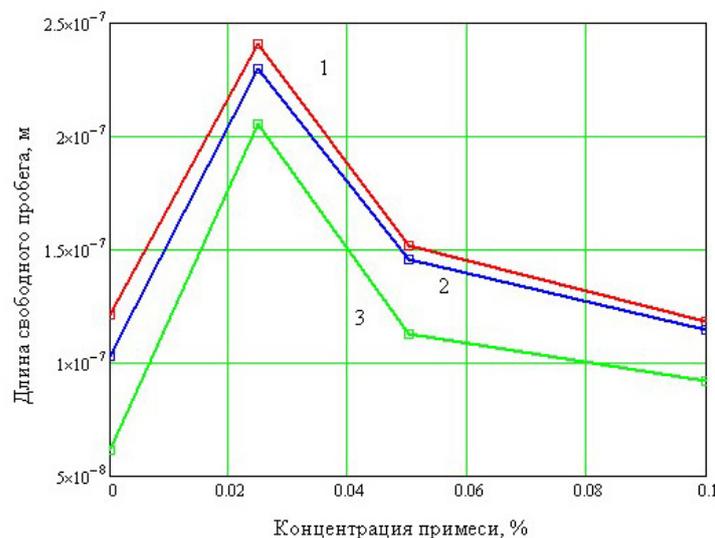


Рис. 5. Влияние концентрации примеси на длину свободного пробега при разных значениях объема раствора V :
 1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

Концентрация носителей заряда увеличивается с увеличением концентрации примеси сурьмы (рис. 6). Сурьма может находиться в состояниях Sb^{5+} или Sb^{3+} . При внесении в пленку сурьмы (Sb^{5+}) в качестве примеси атомы олова (Sn^{4+}) замещаются сурьмой в решетке [13]. В этом случае атомы сурьмы являются донорами, что приводит к появлению избыточных электронов и повышению концентрации носителей.

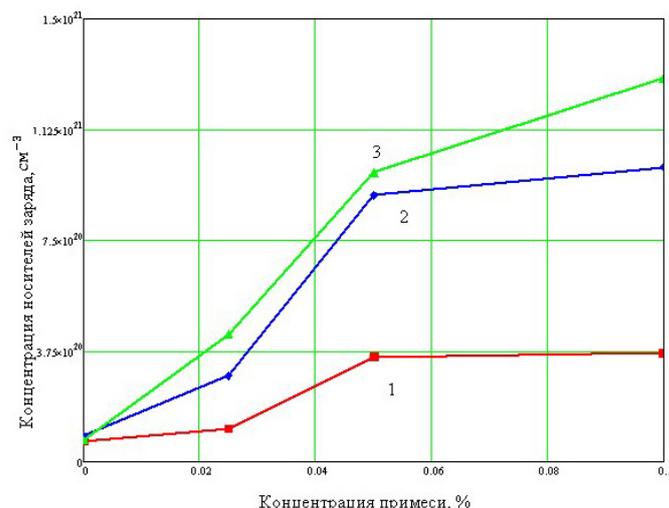


Рис. 6. Влияние концентрации примеси на объемную концентрацию носителей заряда при разных значениях объема раствора V :
 1 – объем раствора $V = 5$ мл; 2 – объем раствора $V = 10$ мл; 3 – объем раствора $V = 15$ мл

Заключение

Анализ зависимостей электрофизических параметров от концентрации примеси, концентрации прекурсора, объема раствора позволил установить следующие закономерности влияния факторов на технологические режимы синтеза ППО методом спрей-пиролиза с заданными свойствами:

- при увеличении концентрации примеси наблюдается снижение поверхностного сопротивления (рост проводимости);
- увеличение объема раствора способствует снижению поверхностного сопротивления;
- при увеличении концентрации легирования сурьмой имеет место повышение проводимости ППО, однако при превышении определенного значения концентрации примеси избыточные атомы сурьмы не занимают правильные позиции в решетке, что приводит к нарушению структуры, а следовательно, к снижению проводимости.

Список литературы

1. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72.
2. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н. [и др.]. Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 4. С. 92–103.
3. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ электрофизических параметров пленок прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 1. С. 73–80.
4. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Печерский А. В. [и др.]. Анализ параметров качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 100–109.
5. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Антипенко В. В. [и др.]. Моделирование взаимосвязей технологических режимов и свойств оксидного покрытия, синтезированного методом спрей-пиролиза // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 3. С. 69–77.
6. Шамин А. А., Николаев К. О., Печерская Е. А., Купцов А. Н. Методики получения и исследование функциональных слоев солнечных элементов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 2. С. 279–286.
7. Dudnik E. V., Lakiza S. N., Tishchenko Y. S. [et al.]. Phase diagrams of refractory oxide systems and microstructural design of materials // Powder Metall. Met. 2014. Vol. 53. P. 303–311.

References

1. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I. [et al.]. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):64–72. (In Russ.)
2. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Kravtsov A.N. [et al.]. Development of spray pyrolysis technology for the synthesis of transparent conductive coatings based on tin dioxide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2020;(4):92–103. (In Russ.)
3. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I. [et al.]. Analysis of electrophysical parameters of transparent conductive oxide films. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(1):73–80. (In Russ.)
4. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Pecherskiy A.V. [et al.]. Analysis of the quality parameters of the technological process of synthesis of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):100–109. (In Russ.)
5. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Antipenko V.V. [et al.]. Modeling of the interrelationships of technological modes and properties of an oxide coating synthesized by spray pyrolysis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = .* 2020;(3):69–77. (In Russ.)
6. Shamin A.A., Nikolaev K.O., Pecherskaya E.A., Kuptsov A.N. Methods of obtaining and studying the functional layers of solar cells. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = .* 2017;(2):279–286. (In Russ.)
7. Dudnik E.V., Lakiza S.N., Tishchenko Y.S. [et al.]. Phase diagrams of refractory oxide systems and microstructural design of materials. *Powder Metall. Met.* 2014;53:303–311.

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

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

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the polytechnic institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Игоревич Кондрашин

генеральный директор
ООО «Парадигма»
(Россия, г. Пенза, ул. Кирова, 51)
E-mail: vlad_kondrashin@mail.ru

Vladislav I. Kondrashin

General director,
LLC "Paradigma"
(51 Kirova street, Penza, Russia)

Юрий Александрович Вареник

кандидат технических наук, доцент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurik_ru@mail.ru

Yuriy A. Varenik

Candidate of technical sciences, associate professor,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Alexandrov

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.09.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.934

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-10

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОПЕРАТОРА ТИГЕРА

А. К. Алимуратов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

alansapfir@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегментация речевых сигналов представляет собой обнаружение границ начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз. Точное обнаружение границ не только повышает качество сегментации речевого сигнала, но и уменьшает количество вычислительных операций. Целью работы является повышение эффективности сегментации на основе энергетического анализа речевых сигналов с помощью энергетического оператора Тигера. *Материалы и методы.* В работе использовался дифференциальный энергетический оператор Тигера 2-го порядка, позволяющий вычислять энергетические характеристики сигнала. Оператор Тигера обладает простотой, эффективностью и хорошей восприимчивостью к изменению амплитуды и частоты сигнала. Программная реализация способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). *Результаты.* Разработан модернизированный способ сегментации речевых сигналов, обеспечивающий повышение эффективности обнаружения вокализованных, невокализованных участков и пауз. Суть способа заключается в энергетическом анализе фрагментов речевого сигнала с помощью энергетического оператора Тигера; анализе количества пересечений через нулевую ось и кратковременной энергии функции энергетической характеристики. Проведено исследование, в рамках которого оценивалась эффективность и помехоустойчивость модернизированного способа в сравнении с известными способами сегментации. *Выводы.* В соответствии с полученными результатами исследований выявлено, что за счет хорошей восприимчивости энергетического оператора Тигера к резким изменениям амплитуды и частоты сигнала модернизированный способ обеспечивает повышение эффективности сегментации на 2,97 и 2,49 % для ошибок 1-го и 2-го рода соответственно.

Ключевые слова: обработка речи, сегментация речи, вокализованная и невокализованная речь, паузы, энергетический оператор Тигера

Для цитирования: Алимуратов А. К. Повышение эффективности сегментации речевых сигналов на основе энергетического оператора тигера // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 80–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-10

ENHANCEMENT OF SPEECH SIGNAL SEGMENTATION USING TEAGER ENERGY OPERATOR

A. K. Alimuradov

Penza State University, Penza, Russia

alansapfir@yandex.ru

Abstract. *Background.* Speech signal segmentation is detection of the boundaries of the beginning and the end of sections of voiced and unvoiced speech, and pauses. Accurate detection of the boundaries both improves the quality of

speech signal segmentation, and reduces the number of computational operations. The aim of the work is to improve the efficiency of segmentation based on the energy analysis of speech signals using the Teager energy operator. *Materials and methods.* The second-order differential Teager energy operator, which makes it possible to estimate the energy characteristics of a signal, was used in this work. The Teager operator is simple, efficient, and highly susceptible to changes in signal amplitude and frequency. The software implementation of the method was performed in ©MATLAB (MathWorks) mathematical modeling environment. *Results.* An improved method for speech signal segmentation, providing an increase in the efficiency of detecting voiced and unvoiced areas, and pauses, has been developed. The nature of the method is the energy analysis of speech signal fragments using the Teager energy operator; analysis of zero-crossing rate and short-term energy of the energy characteristic function. Research to assess the efficiency and noise robustness of the improved method over the known segmentation methods, was carried out. *Conclusions.* In accordance with the obtained research results, it was revealed that due to the good susceptibility of the Teager energy operator to sharp changes in signal amplitude and frequency, the improved method provides an increase in the segmentation efficiency by 2.97 % and 2.49 % for the 1st and 2nd kind errors, respectively.

Keywords: speech processing, speech segmentation, voiced and unvoiced speech, pauses, Teager energy operator

For citation: Alimuradov A.K. Enhancement of speech signal segmentation using teager energy operator. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 80–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-10

Введение

Сегментация речевых сигналов представляет собой обнаружение границ начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз. На сегодняшний день задача сегментации речевых сигналов решается разными способами, которые можно разделить на частотные и временные. К временным относятся способы на основе анализа количества пересечения через нулевую ось (Zero-Crossing Rate, ZCR) [1], отклонения автокорреляционной функции (Autocorrelation Function, ACR) [2], кратковременной энергии (Short Time Energy, STE) [3], а также одномерного расстояния Махаланобиса (One Dimensional Mahalanobis Distance, ODM) [4]. К частотным относятся способы на основе анализа мел-частотных кепстральных коэффициентов (Mel-Frequency Cepstral Coefficients, MFCC) [5] и линейно-частотных кепстральных коэффициентов (Linear-Frequency Cepstral Coefficients, LFCC) [6].

В статье представлен способ, позволяющий повысить эффективность сегментации речевых сигналов за счет применения энергетического оператора Тигера (Teager Energy Operator, TEO). Предлагаемый способ представляет собой модернизацию существующего способа сегментации на основе анализа ZCR и STE. Модернизация включает в себя вычисление энергетической характеристики фрагментов речевых сигналов на основе TEO с последующим анализом значений ZCR и STE.

Статья является результатом научной работы, посвященной разработке эффективных алгоритмов и способов обработки речевых сигналов на основе новых частотно-временных методов анализа [7–9].

Структурно статья состоит из семи разделов. Второй и третий разделы посвящены краткому обзору известных способов сегментации речевых сигналов, а также вычислению энергетической характеристики речи с помощью TEO. Четвертый и пятый разделы посвящены описанию и исследованию модернизированного способа. В шестом разделе представлен анализ результатов исследований. Последний раздел посвящен выводам и перспективам дальнейшей научной работы.

Сегментация речевых сигналов

Способы сегментации речевых сигналов на основе анализа ZCR и STE применяются ограниченно. Ограничения связаны с выбором и обоснованием корректных пороговых значений, соответствующих вокализованной, невокализованной речи и паузам.

Функция ZCR основана на сравнении знаков соседних дискретных отсчетов времени и определяется по следующей формуле:

$$ZCR_s = 0,5 \sum_{n=1}^{N-1} \left| \operatorname{sgn}(x(s-1)N+n+1) - \operatorname{sgn}(x(s-1)N+n) \right|, \quad (1)$$

где $x(n)$ – исследуемый сигнал; n – дискретный отсчет времени; s – номер фрагмента; N – количество дискретных отсчетов в исследуемом фрагменте; $\text{sgn}(x)$ – знаковая функция ($\text{sgn}(x) = 1$ при $x \geq 0$ и $\text{sgn}(x) = -1$ при $x \leq 0$).

Функция STE представляет собой сумму квадратов амплитуд дискретных отсчетов сигнала для короткой последовательности (фрагмента) и определяется по следующей формуле:

$$E_s = \sum_{n=1}^N [x(s-1)N+n]^2. \quad (2)$$

Анализ ZCR построен на предположении, что количество пересечений функции сигнала с нулевой осью для пауз с фоновым шумом больше по сравнению с вокализованной и невокализованной речью. Аналогично построен способ на основе анализа STE – кратковременная энергия вокализованной и невокализованной речи больше, чем энергия пауз с фоновым шумом. Однако данные предположения не совсем корректны. Не решен главный вопрос – насколько текущие значения ZCR и STE должны быть больше, чем пороговые для корректной сегментации речевых сигналов. Кроме того, известно, что пороговые значения могут варьироваться для каждого конкретного анализируемого речевого сигнала. В работе [10] была принята попытка выбрать и обосновать пороговые значения ZCR и STE, соответствующие вокализованной, невокализованной речи и паузам. В соответствии с выводами в работе [10] точность сегментации составила 65 % в сравнении с сегментацией, осуществленной вручную.

Способ сегментации речевых сигналов на основе анализа ODMD построен на статистических свойствах фонового шума [4]. В соответствии с физиологией воспроизведения речи человек перед произношением выдерживает вынужденную начальную паузу, длительностью не менее 200 мс, которая соответствует фоновому шуму. Предполагается, что фоновый шум, регистрируемый во время начальной паузы, имеет Гауссовский характер, а остальные информативные участки вокализованной и невокализованной речи имеют другое распределение. В этом случае функция плотности вероятности распределения фонового шума является критерием сегментации речевых сигналов.

В основе вычисления ODMD лежит функция плотности вероятности нормального распределения [4]:

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (3)$$

где μ и σ – математическое ожидание и стандартное отклонение независимых случайных величин y .

Аналитическое выражение ODMD имеет следующий вид:

$$r = \frac{|y-\mu|}{\sigma}, \quad (4)$$

где выражение $|y-\mu|$ является естественной мерой расстояния от y к среднему значению μ .

В работе [11] представлен подробный сравнительный анализ результатов сегментации речевых сигналов, полученных с помощью способов на основе анализа ZCR, STE и ODMD. В соответствии с выводами в работе [11] способ на основе анализа ODMD эффективнее для отдельных словосочетаний, чем вышеупомянутые способы на 5,6 и 13,18 % соответственно. Для слитной речи повышение эффективности составляет на 8,88 и 9,59 % соответственно.

В соответствии с вышеупомянутым математическим описанием проведены исследования способов, основанных на анализе ZCR, STE и ODMD. В табл. 1 представлены усредненные данные ошибок 1-го (α) и 2-го рода (β), полученные по результатам сегментации с помощью вышеупомянутых способов. Основной задачей сегментации является точное обнаружение границ начала и окончания информативных участков вокализованной и невокализованной речи, поэтому ошибкой 1-го рода считалось ошибочное присваивание речевому фрагменту статуса «пауза». Ошибкой 2-го рода считалось ошибочное присваивание фрагменту паузы статуса «речь». Ошибки 1-го и 2-го рода определялись в сравнении с результатом сегментации, осуществленной вручную.

Таблица 1

Усредненные данные ошибок 1-го и 2-го рода, полученные по результатам сегментации способами на основе анализа ZCR, STE и ODMD

Способ сегментации речевых сигналов	Ошибки 1-го и 2-го рода, %	
	α	β
Способ на основе анализа ODMD	21,97	0,89
Способ на основе анализа ZCR	23,11	3,02
Способ на основе анализа STE	10,53	3,2
Способ на основе анализа ZCR и STE	7,32	5,33

В соответствии с полученными результатами в табл. 1 сделан вывод, что целесообразным является модернизация способа сегментации речевых сигналов на основе анализа ZCR и STE.

Энергетический оператор Тигера

ТЕО – это дифференциальный энергетический оператор 2-го порядка, позволяющий вычислять энергетические характеристики сигнала [12]. ТЕО обладает простотой, эффективностью и хорошей восприимчивостью к изменению амплитуды и частоты сигнала.

Для дискретных сигналов аналитическое выражение ТЕО имеет следующий вид:

$$\text{ТЕО}(n) = x(n)^2 - x(n-1)x(n+1). \quad (5)$$

На сегодняшний день ТЕО получил широкое практическое применение в задачах обработки речевых сигналов [13, 14]. Задача сегментации речевых сигналов с помощью ТЕО частично решается в работах [15, 16]. Алгоритм на основе вейвлет-преобразования и ТЕО с высокой точностью сегментирует речь на вокализованные, невокализованные и переходные участки [15]. Применение ТЕО позволяет улучшить различимость вокализованной речи в присутствии сильного фонового шума [16].

Описание модернизированного способа сегментации речевых сигналов

На рис. 1 структурно представлен модернизированный способ сегментации речевых сигналов на основе энергетического анализа фрагментов речевого сигнала с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE. Суть работы способа заключается в линейном разделении речевого сигнала на фрагменты (блок 1), вычислении энергетической характеристики речевого сигнала с помощью ТЕО (блок 2), вычислении значений ZCR и STE фрагментов энергетической характеристики (блок 3, 4) и определении статуса «речь/пауза» фрагментов (блок 7) на основе вычисленных пороговых значений ZCR и STE (блок 5, 6). Блоки 8 и 9 не относятся к модернизированному способу и предназначены для постобработки ошибок сегментации, а также для сравнения результатов с сегментацией, осуществленной вручную. Рассмотрим подробнее некоторые этапы обработки модернизированного способа.

Блок 1. Фрагментирование представляет собой линейное деление речевого сигнала на отрезки (фрагменты) равной длительности. Фрагментирование основано на кратковременном анализе, в рамках которого фрагменты обрабатываются так, как если бы они были короткими речевыми сигналами с отличающимися свойствами. Фрагментирование речевого сигнала осуществляется по следующим формулам:

$$S = \frac{x(n)}{L}, \quad (6)$$

где S – количество фрагментов в исследуемом речевом сигнале $x(n)$; L – количество дискретных отсчетов времени в одном фрагменте;

$$x_{s+1}[n_{first} : n_{final}] = x[(sL) + 1 : (s+1)L], \quad (7)$$

где $s = 0, 1, 2, \dots$ S – номер фрагмента, n_{first} – первый дискретный отсчет фрагмента; n_{final} – последний дискретный отсчет фрагмента.



Рис. 1. Структура модернизированного способа сегментации речевых сигналов на основе энергетического анализа фрагментов речевого сигнала с помощью ТЕО и последующего анализа ZCR и STE

Блоки 2–4. Вычисление энергетической характеристики фрагментов речевого сигнала с помощью ТЕО, а также значений ZCR и STE фрагментов энергетической характеристики осуществляется по формулам (1), (2) и (5) соответственно.

Особенностью модернизации способа является анализ значений ZCR и STE фрагментов энергетической характеристики речевого сигнала, вычисленной с помощью ТЕО. Известно, что ТЕО обеспечивает хорошую восприимчивость к изменению амплитуды и частоты сигнала, поэтому предполагается, что энергетическая характеристика содержит полную и достоверную информацию о значениях ZCR и STE.

На рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий результат вычисления энергетической характеристики вокализованного участка и участка паузы с помощью ТЕО. На рис. 2, а, б представлены осциллограммы участков длительностью 30 мс (240 дискретных отсчета при частоте дискретизации 8000 Гц). На рис. 2, в, г представлены соответствующие участки функции энергетической характеристики. Как видно из рис. 2, функция энергетической характеристики в действительности обеспечивает полную информативность значений ZCR и STE, анализ которых позволит повысить эффективность сегментации речевых сигналов. Особенно полнота информации наблюдается при анализе значений ZCR для участка паузы. Осциллограмма участка паузы представляет собой фоновый шумовой сигнал с резким изменением значений амплитуды дискретных отсчетов времени (рис. 2, б). Значение ZCR для осциллограммы сигнала равно 8. Амплитудные значения дискретных отсчетов функции энергетической характеристики участка паузы также имеют резкие перепады (рис. 2, г), однако значение ZCR в этом случае равно 59.

Также необходимо отметить разницу значений ZCR, STE вокализованного участка и паузы, полученных для функции энергетической характеристики речевого сигнала. Если для значений ZCR разница между вокализованным участком ($ZCR = 30$) и паузой ($ZCR = 59$) примерно вдвое, то для значений STE разница составляет шесть порядков ($STE = 9,82 \cdot 10^{-3}$ и $STE = 7,83 \cdot 10^{-9}$). Таким образом, предположительно анализ значений ZCR и STE энергетической характеристики речевого сигнала, вычисленной с помощью ТЕО, должен обеспечить повышение эффективности сегментации речевых сигналов.

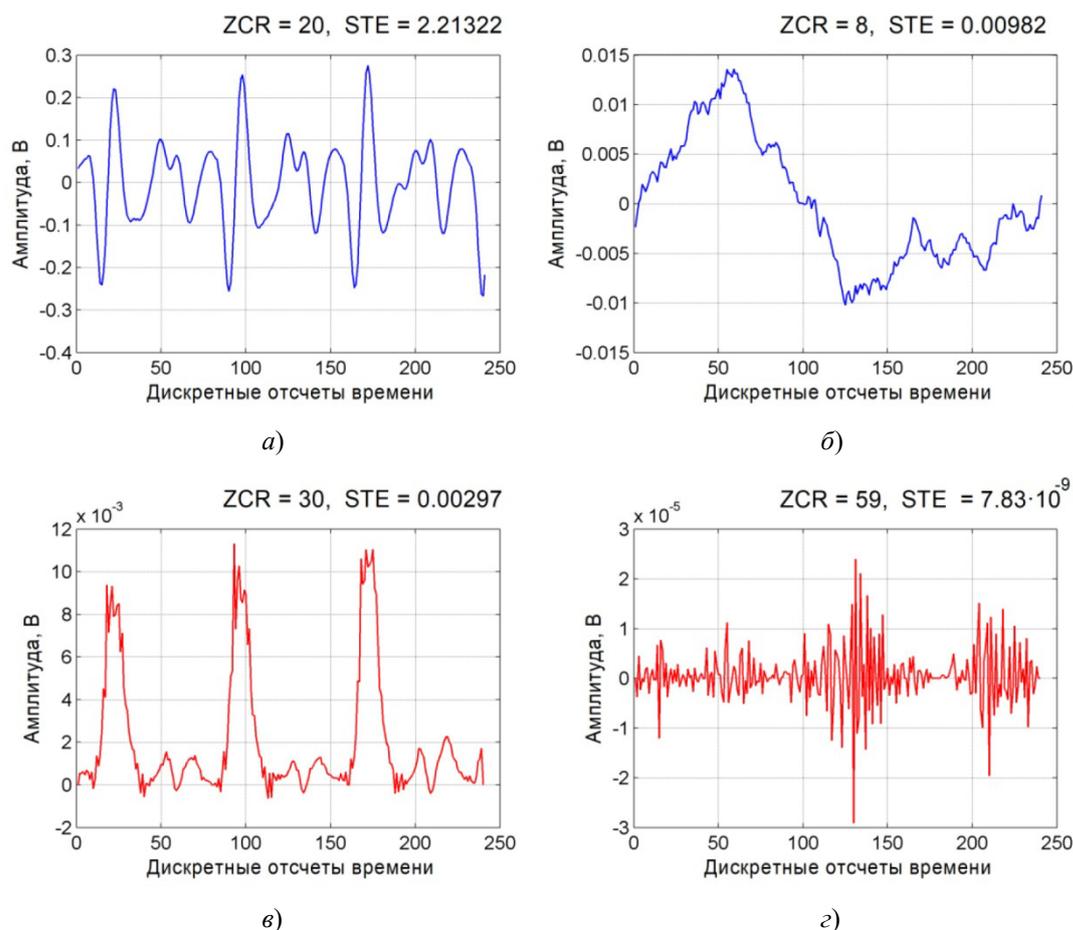


Рис. 2. Результат вычисления энергетической характеристики вокализованного участка и участка паузы с помощью ТЕО:

a, б – осциллограммы вокализованного участка и паузы соответственно;

в, г – функция энергетической характеристики вокализованного участка и паузы соответственно

Блоки 5, 6. Для корректной сегментации речевых сигналов в модернизированном способе представлено решение проблемы выбора пороговых значений ZCR и STE. По аналогии со способом [11] предлагается использовать начальную паузу в качестве исходных данных для формирования пороговых значений ZCR и STE. В соответствии с методикой в работе [11] вычисляются математическое ожидание μ_E , μ_{ZCR} и дисперсия σ_E , σ_{ZCR} значений ZCR и STE для фрагментов, соответствующих начальной паузе 200 мс (фоновому шуму):

$$\mu_{ZCR} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S ZCR_s; \quad (8)$$

$$\mu_E = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S E_s; \quad (9)$$

$$\sigma_{ZCR} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (ZCR_s - \mu_{ZCR})^2}; \quad (10)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (E_s - \mu_E)^2}, \quad (11)$$

где ZCR_s , E_s – значения ZCR и STE исследуемого фрагмента соответственно; S – количество фрагментов, соответствующих фоновому шуму.

Блок 7. Определение статуса «речь/пауза» фрагментов заключается в проверке следующих условий:

Таблица 3

Усредненные значения ошибок 1-го и 2-го рода, полученные по результатам сегментации зашумленных речевых сигналов классическим способом на основе анализа ZCR, STE и модернизированным способом на основе энергетического анализа с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE

Отношение сигнал/шум, дБ	Ошибка, %	Значение коэффициента порога														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Классический способ																
20	α	4,81	8,01	10,76	11,90	12,59	13,27	14,19	16,02	17,62	18,31	18,99	19,22	19,91	20,37	20,60
	β	29,31	4,09	1,95	1,24	1,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
15	α	2,06	8,47	10,53	11,90	13,27	14,19	15,10	16,48	18,31	18,76	18,99	20,14	20,37	21,28	21,51
	β	50,27	4,80	1,60	1,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
10	α	2,52	8,01	10,53	12,82	14,65	16,48	17,16	17,62	18,99	20,14	20,60	21,05	21,51	22,20	22,43
	β	56,84	5,15	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
5	α	7,09	11,90	14,42	17,85	19,22	19,91	21,28	22,20	22,43	22,88	23,57	24,03	24,26	24,26	24,71
	β	42,81	1,78	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
0	α	2,52	15,10	21,28	24,26	26,09	27,23	29,98	31,81	33,18	35,01	36,16	37,07	37,76	39,36	40,50
	β	83,30	28,60	5,51	1,07	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
-5	α	7,78	31,35	37,99	44,85	49,89	53,78	57,90	60,18	62,24	67,96	70,48	74,14	75,29	78,26	84,21
	β	60,75	4,80	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Модернизированный способ																
20	α	0,69	2,52	4,58	7,09	7,78	8,92	9,61	10,07	11,44	11,90	12,36	12,59	12,82	13,73	13,96
	β	33,93	8,35	1,60	1,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
15	α	2,97	8,24	10,53	12,13	12,36	13,50	15,10	16,02	17,16	17,39	18,54	18,99	19,68	20,14	20,82
	β	40,32	3,55	1,24	1,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
10	α	2,75	8,01	12,36	13,50	14,19	17,85	19,22	20,37	20,37	21,74	22,20	22,20	22,43	22,65	22,88
	β	71,23	9,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
5	α	6,41	11,21	13,50	15,33	17,39	18,08	19,91	20,60	20,82	21,51	21,74	21,97	22,20	22,20	22,88
	β	52,58	2,31	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
0	α	5,26	18,31	22,88	24,49	27,00	31,12	32,04	33,18	33,41	35,24	36,38	39,13	40,05	40,96	41,42
	β	64,65	5,51	1,24	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
-5	α	6,41	22,65	33,18	38,22	43,25	48,28	50,11	53,78	56,06	56,98	59,50	60,64	61,56	64,07	66,13
	β	71,76	15,45	1,42	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89

Анализ результатов исследований

В соответствии с данными из табл. 2 на рис. 3 представлены кривые зависимости ошибок 1-го и 2-го рода от коэффициента порога.

Анализ полученных результатов в табл. 2 и кривых зависимостей на рис. 3 выявил, что наиболее оптимальные значения ошибок 1-го и 2-го рода достигаются модернизированным способом – 2,06 и 1,95 % соответственно при значении коэффициента порога равном 10.

Наиболее оптимальные значения ошибок 1-го и 2-го рода для классического способа на основе анализа ZCR и STE – 5,03 и 4,44 % соответственно достигаются при значении коэффициента порога равном 3.

На рис. 4 представлен пример, иллюстрирующий результаты сегментации речевого сигнала длительностью 10 с, представляющего собой сочетание следующих слов на русском языке: шанс, шар, баян, Лара, нормально. Слова подобраны таким образом, чтобы в них содержались разные по способу образования звуки: гласные, сонорные, шумные смычные (взрывные, фрикативные) и шумные щелевые.

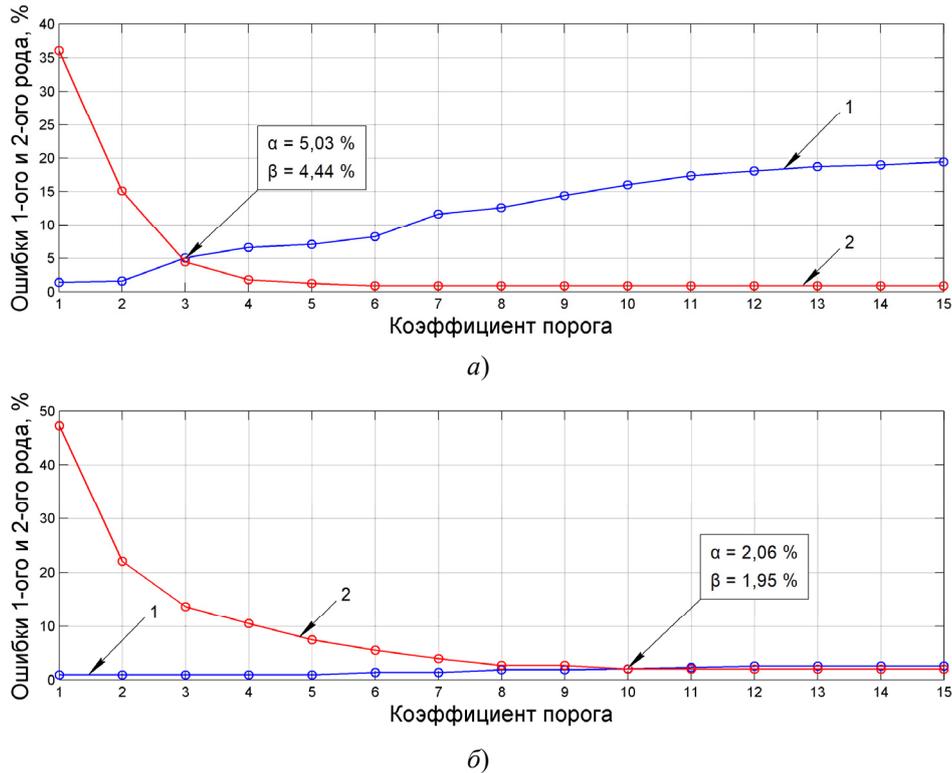


Рис. 3. Зависимость ошибок 1-го и 2-го рода от коэффициента порога:
a – классический способ сегментации речевых сигналов на основе анализа ZCR и STE;
б – модернизированный способ сегментации речевых сигналов на основе энергетического анализа с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE;
1 – значения ошибок 1-го рода; *2* – значения ошибок 2-го рода

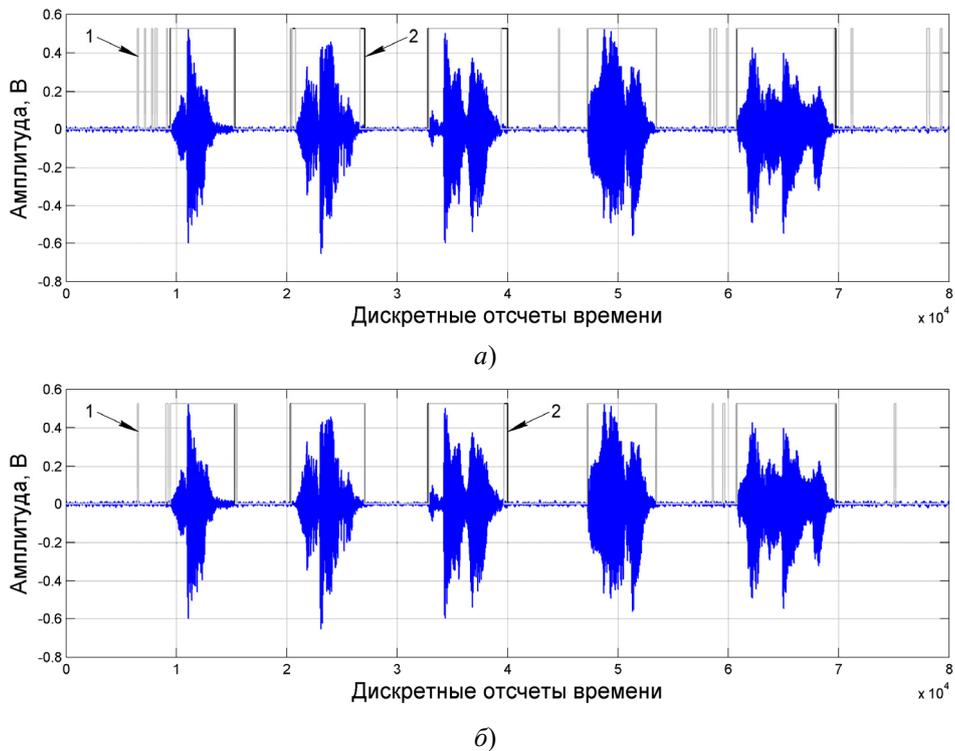


Рис. 4. Пример, иллюстрирующий результаты сегментации речевого сигнала:
a – классический способ сегментации речевых сигналов на основе анализа ZCR и STE;
б – модернизированный способ сегментации речевых сигналов на основе энергетического анализа с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE; *1* – достигнутые результаты сегментации; *2* – результат сегментации, осуществленной вручную

В соответствии с данными в табл. 3, полученными по результатам сегментации зашумленных речевых сигналов, оптимальные значения ошибок 1-го и 2-го рода достигаются при значениях коэффициента порога от 1 до 3. В табл. 4 представлены детализированные усредненные значения ошибок 1-го и 2-го рода для коэффициента порога от 1,5 до 2,5 с шагом 0,1. Как видно из результатов в табл. 4, оптимальные значения ошибок 1-го и 2-го рода достигаются при разных значениях коэффициента порога. Для классического и модернизированного способов оптимальные значения коэффициента порога находятся в пределах от 1,9 до 2,2.

Таблица 4

Детализированные усредненные значения ошибок 1-го и 2-го рода, полученные по результатам сегментации зашумленных речевых сигналов классическим способом на основе анализа ZCR, STE и модернизированным способом на основе энергетического анализа с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE

Отношение сигнал/шум, дБ	Ошибка, %	Значение коэффициента порога										
		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Классический способ												
20	α	7,09	7,78	7,78	7,78	8,01	8,01	8,01	9,15	9,38	9,61	10,07
	β	9,41	7,46	6,04	4,80	4,09	4,09	3,37	3,37	2,84	1,95	1,95
15	α	5,95	7,09	8,01	8,01	8,47	8,47	8,47	8,47	8,70	9,15	9,61
	β	14,92	11,19	8,17	7,46	5,15	4,80	3,37	3,37	3,37	3,37	2,84
10	α	5,95	6,18	6,41	7,32	7,55	8,01	8,70	9,38	9,38	9,84	9,84
	β	21,85	17,23	13,32	9,77	6,75	5,15	4,62	4,09	3,02	2,66	2,31
5	α	9,84	10,30	10,53	10,98	11,90	11,90	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36
	β	10,12	5,33	4,62	2,66	2,49	1,78	1,78	1,42	1,24	1,24	1,24
0	α	17,39	17,85	19,45	19,68	20,60	21,28	21,28	21,74	22,20	22,43	22,43
	β	15,10	14,39	9,95	9,95	7,10	6,04	5,51	3,73	3,55	3,55	2,66
-5	α	23,11	24,49	26,32	29,06	30,44	31,35	32,72	33,87	35,01	35,47	35,93
	β	24,69	15,99	13,50	8,17	7,46	4,80	4,26	2,31	1,60	1,42	1,42
Модернизированный способ												
20	α	1,83	1,83	2,52	2,52	2,52	2,52	2,75	2,97	3,66	1,83	1,83
	β	13,85	13,50	11,37	9,95	9,59	8,35	6,22	5,68	4,97	13,85	13,50
15	α	5,49	6,64	7,09	8,01	8,01	8,24	8,24	8,47	8,92	5,49	6,64
	β	11,01	8,53	6,93	4,97	4,09	3,55	2,84	2,13	2,13	11,01	8,53
10	α	6,64	6,64	7,09	7,55	7,78	8,01	9,15	9,38	9,61	6,64	6,64
	β	30,20	28,77	22,20	14,57	12,08	9,24	6,75	4,62	4,09	30,20	28,77
5	α	8,70	8,92	9,84	10,07	10,53	11,21	11,21	11,67	12,36	8,70	8,92
	β	13,14	11,72	7,46	4,26	4,26	2,31	2,31	1,60	1,42	13,14	11,72
0	α	12,36	14,42	15,56	17,16	18,31	18,31	20,60	20,82	21,28	12,36	14,42
	β	19,54	15,45	13,50	8,70	6,93	5,51	4,09	3,37	2,49	19,54	15,45
-5	α	12,13	14,65	16,48	17,16	21,05	22,65	24,71	26,09	26,55	12,13	14,65
	β	37,48	32,68	29,31	25,22	15,99	15,45	13,50	9,95	7,99	37,48	32,68

В табл. 5 представлены усредненные данные значений ошибок 1-го и 2-го рода, полученные по результатам сегментации чистого и зашумленных речевых сигналов. В соответствии с данными в табл. 5 практически для всех значений ОСШ модернизированный способ демонстрирует лучшую помехоустойчивость в сравнении со способами на основе анализа ZCR, STE и ODMD. Необходимо отметить, что в зависимости от требований к точности сегментации речевых сигналов, модернизированный способ обеспечивает вариативность значений ошибок 1-го и 2-го рода за счет изменения коэффициента порога (см. табл. 4).

Таблица 5

Усредненные данные значений ошибок 1-го и 2-го рода, полученные по результатам сегментации чистого и зашумленных речевых сигналов способами на основе анализа ZCR, STE, ODMD, а также модернизированным способом на основе энергетического анализа с помощью ТЕО и последующего анализа значений ZCR и STE

Способ сегментации речевых сигналов	Чистый сигнал		Зашумленный речевой сигнал													
			Отношение сигнал/шум, дБ													
			20		15		10		5		0		-5			
	Ошибка, %															
		α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	
Способ на основе анализа ODMD			21,97	0,89	22,88	0,89	35,01	0,89	41,19	0,89	59,50	0,89	99,77	0,89	99,77	0,89
Способ на основе анализа ZCR			23,11	3,02	27,23	2,13	71,85	1,42	65,90	1,95	75,29	1,07	97,48	0,89	90,85	1,78
Способ на основе анализа STE			10,53	3,20	9,61	1,95	7,09	4,97	9,38	3,55	12,59	1,42	16,25	22,20	37,07	1,42
Способ на основе анализа ZCR и STE			5,03	4,44	8,01	3,37	8,47	3,37	8,01	5,15	11,90	1,78	21,74	3,73	31,35	4,80
Модернизированный способ			2,06	1,95	2,75	6,22	8,24	2,84	8,01	9,24	11,67	1,60	18,31	5,51	21,05	15,99

Заключение

Подводя итоги анализа результатов исследований, можно сделать следующие выводы:

1. При сравнении оптимальных значений ошибок 1-го и 2-го рода модернизированный способ обеспечивает повышение эффективности сегментации на 2,97 и 2,49 % соответственно. Это обеспечивается за счет хорошей восприимчивости ТЕО к резкому изменению амплитуды и частоты речевых сигналов.

2. За счет применения ТЕО модернизированный способ обеспечивает наилучшие результаты сегментации зашумленной речи. В сравнении с наиболее помехоустойчивым классическим способом сегментации на основе анализа ZCR и STE отмечаются следующие изменения значений ошибок 1-го и 2-го рода:

- ОСШ = 20 дБ улучшение на 5,26 % и ухудшение на 2,85 %;
- ОСШ = 15 дБ улучшение на 0,23 % и 0,53 %;
- ОСШ = 10 дБ без изменений и ухудшение на 4,09 %;
- ОСШ = 5 дБ улучшение на 0,23 % и 0,18 %;
- ОСШ = 0 дБ улучшение на 3,43 % и ухудшение на 1,78 %;
- ОСШ = -5 дБ улучшение на 10,3 % и ухудшение на 11,19 %.

3. В зависимости от приоритета решаемой задачи сегментации речевых сигналов, у исследователей имеется возможность выбирать между необходимыми значениями коэффициента порога, обеспечивающими необходимые значения ошибок 1-го и 2-го рода.

В перспективе планируется провести дополнительное исследование быстрейшего модернизированного способа сегментации речевых сигналов.

Список литературы

1. Atal B., Rabiner L.R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1976. Vol. 24, № 3. P. 201–212.
2. Huang X., Acero A., Hon H.-W. Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development. New Jersey : Prentice Hall, 2001. 980 p.
3. Childers D. G., Hand M., Larar J. M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech // IEEE Transaction on ASSP. 1989. Vol. 37, № 11. P. 1771–1774.
4. Duda R. O., Hart P. E., Strok D. G. Pattern Classification. 2nd ed. New Jersey : A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 688 p.

5. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing : proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001). Salt Lake City, UT, USA, 2001. Vol. 1. P. 237–240.
6. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T. [et al.]. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. 13 p.
7. Алимуратов А. К., Квитка Ю. С., Чураков П. П., Тычков А. Ю. Повышение точности измерения частоты основного тона на основе оптимизации процесса декомпозиции речевых сигналов на эмпирические моды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4. С. 53–65.
8. Алимуратов А. К. Исследование частотно-избирательных свойств методов декомпозиции на эмпирические моды для оценки частоты основного тона речевых сигналов // Труды МФТИ. 2015. Т. 7, № 3. С. 56–68.
9. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю. Применение метода декомпозиции на эмпирические моды для исследования вокализованной речи в задаче обнаружения стрессовых эмоций человека // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 3. С. 7–29.
10. Greenwood M.A., Kinghorn A. SUVing: automatic silence/unvoiced/voiced classification of speech // Undergraduate Coursework, Department of Computer Science, The University of Sheffield, UK, 1999. 4 p.
11. Saha G., Chakroborty S., Senapat S. A new silence removal and endpoint detection algorithm for speech and speaker recognition applications // Eleventh National Conference on Communications (NCC-2005) (Jan. 28–30, 2005). Kharagpur, India, 2005. P. 51–61.
12. Kaiser J. F. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (April 3–6, 1990). Albuquerque, NM, USA, 1990. Vol. 2. P. 381–384.
13. Abu-Shikhah N., Deriche M. A novel pitch estimation technique using the Teager energy // International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA) (IEEE Cat. No.99EX359) (Aug. 22–25, 1999). Brisbane, Queensland, Australia, 1999. Vol. 1. P. 135–138.
14. Kvedalen E. Signal Processing Using the Teager Energy Operator and Other Nonlinear Operators : PhD dissertation, Department of Informatics. Oslo : University of Oslo, 2003. 121 p.
15. Жуйков В. Я., Харченко А. Н. Алгоритм классификации сегментов речевого сигнала // Электроника и связь. Тем. вып. «Электроника и нанотехнологии». 2009. Ч. 1. С. 130–137.
16. Bahoura M., Rouat J. Wavelet speech enhancement based on the teager energy operator // IEEE Signal Processing Letter. 2001. Vol. 8, № 1. P. 10–12.

References

1. Atal B., Rabiner L.R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1976;24(3):201–212.
2. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development*. New Jersey: Prentice Hall, 2001:980.
3. Childers D.G., Hand M., Larar J.M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech. *IEEE Transaction on ASSP*. 1989;37(11):1771–1774.
4. Duda R.O., Hart P.E., Strok D.G. *Pattern Classification*. 2nd ed. New Jersey: A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001:688.
5. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing: proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001)*. Salt Lake City, UT, USA, 2001;1:237–240.
6. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T. [et al.]. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder. *Scientific Reports*. 2017;7:13.
7. Alimuradov A.K., Kvitka Yu.S., Churakov P.P., Tychkov A.Yu. Improving the accuracy of measuring the pitch frequency based on optimizing the process of decomposition of speech signals into empirical modes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018; (4):53–65. (In Russ.)
8. Alimuradov A.K. Investigation of frequency-selective properties of decomposition methods into empirical modes for estimating the frequency of the fundamental tone of speech signals. *Trudy MFTI = Works of MIPT*. 2015;7(3):56–68. (In Russ.)
9. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu. Application of the method of decomposition into empirical modes for the study of vocalized speech in the task of detecting stressful human emotions. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye*

- tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. 2020;(3):7–29. (In Russ.)*
10. Greenwood M.A., Kinghorn A. *SUVing: automatic silence/unvoiced/voiced classification of speech*. Undergraduate Coursework, Department of Computer Science, The University of Sheffield, UK, 1999:4.
 11. Saha G., Chakroborty S., Senapat S. A new silence removal and endpoint detection algorithm for speech and speaker recognition applications. *Eleventh National Conference on Communications (NCC-2005) (Jan. 28–30, 2005)*. Kharagpur, India, 2005:51–61.
 12. Kaiser J.F. On a simple algorithm to calculate the ‘energy’ of a signal. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (April 3–6, 1990)*. Albuquerque, NM, USA, 1990;2:381–384.
 13. Abu-Shikhah N., Deriche M. A novel pitch estimation technique using the Teager energy. *International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA) (IEEE Cat. No.99EX359) (Aug. 22–25, 1999)*. Brisbane, Queensland, Australia, 1999;1:135–138.
 14. Kvedalen E. *Signal Processing Using the Teager Energy Operator and Other Nonlinear Operators: PhD dissertation, Department of Informatics*. Oslo: University of Oslo, 2003:121.
 15. Zhuykov V.Ya., Kharchenko A.N. Algorithm for classification of speech signal segments. *Elektronika i svyaz'. Tem. vyp. «Elektronika i nanotekhnologii» = Electronics and Communications. Topic. issue. "Electronics and nanotechnology"*. 2009;1:130–137. (In Russ.)
 16. Bahoura M., Rouat J. Wavelet speech enhancement based on the teager energy operator. *IEEE Signal Processing Letter*. 2001;8(1):10–12.

Информация об авторах / Information about the authors

Алан Казанферович Алимуратов

кандидат технических наук,
директор студенческого
научно-производственного бизнес-инкубатора,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Candidate of technical sciences,
director of student research
and production business incubator,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 12.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 19.05.2021

Принята к публикации/Accepted 20.05.2021

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЖИЗНЕОПАСНЫХ АРИТМИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

А. Т. Бекбай¹, К. А. Ожикенов², О. Н. Бодин³, А. А. Туякбаев⁴

^{1,2,4}Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ainura_b.t@mail.ru, ²k.ozhikenov@satbayev.university, ³bodin_o@inbox.ru, ⁴a.tuyakbayev@satbayev.university

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прогнозирование жизнеопасных аритмий необходимо для анализа состояния сердца пациента, предвидения сердечно-сосудистых осложнений (ССО), выявления основных проблем в функционировании сердца пациента и оценки риска ССО. Внедрение систем поддержки принятия врачебных решений в состав информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики, является актуальной задачей, направленной на выявление и анализ факторов риска ССО и прогнозирование жизнеопасных аритмий. Целью статьи является разработка алгоритмов выявления жизнеопасных аритмий и оценка риска сердечно-сосудистых осложнений. *Материалы и методы.* Рассмотрены алгоритмы выявления таких жизнеопасных аритмий, как атриовентрикулярная блокада, гемодинамическая значимая аритмия и механизм re-entry (риэнтри). *Результаты и выводы.* Предлагается для реализации рассмотренных алгоритмов использовать мультиагентные технологии, которые позволяют повысить эффективность информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики и оптимизировать с точки зрения индивидуализации оказание лечебно-диагностической медицинской помощи. Агентно-ориентированный подход к построению информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики позволяет функционально распределить задачи, решаемые отдельными интеллектуальными агентами, и затем интегрировать полученные результаты. Разработана стратификация по группам риска жизнеопасных аритмий, согласно которой пациенты делятся на следующие группы: высокий риск, умеренный риск, низкий риск.

Ключевые слова: жизнеопасные аритмии, алгоритмы выявления жизнеопасных аритмий, мультиагентные технологии, информационно-измерительная система электрокардиодиагностики, стратификация по группам риска жизнеопасных аритмий

Для цитирования: Бекбай А. Т., Ожикенов К. А., Бодин О. Н., Туякбаев А. А. Прогнозирование жизнеопасных аритмий в информационно-измерительной системе электрокардиодиагностики // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 93–102. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-11

PREDICTION OF LIFE-THREATENING ARRHYTHMIAS IN THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF ELECTROCARDIODIAGNOSTICS

A. T. Bekbay¹, K. A. Ozhikenov², O. N. Bodin³, A. A. Tuyakbayev⁴

^{1,2,4}K. I. Satpayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan

³Penza State University, Penza, Russia

¹ainura_b.t@mail.ru, ²k.ozhikenov@satbayev.university, ³bodin_o@inbox.ru, ⁴a.tuyakbayev@satbayev.university

Abstract. *Background.* Prediction of life-threatening arrhythmias is necessary to analyze the patient's heart condition, anticipate cardiovascular complications (ACC), identify the main problems in the functioning of the patient's heart and assess the risk of ACC. The introduction of medical decision support systems as part of the information and measurement system of electrocardiodiagnostics is an urgent task aimed at identifying and analyzing risk factors of and predicting. The purpose of the article is to develop algorithms for detecting life-threatening arrhythmias and to assess the risk of cardiovascular complications. *Materials and methods.* Algorithms for detecting life-threatening arrhythmias such as atrioventricular block, hemodynamically significant arrhythmia, and the re-entry mechanism are considered. *Results and conclusions.* It is proposed to use multi-agent technologies for the implementation of the considered algorithms, which make it possible to increase the efficiency of the information and measurement system of electrocardiodiagnostics and optimize the provision of therapeutic and diagnostic medical care from the point of view of individu-

alization. An agent-based approach to the construction of an information and measurement system of electrocardiodiagnostics allows us to functionally distribute the tasks solved by individual intelligent agents (IA), and then integrate the results obtained. A stratification by risk groups of life-threatening arrhythmias has been developed, according to which patients are divided into the following groups: high risk, moderate risk, low risk.

Keywords: life-threatening arrhythmias, algorithms for detecting life-threatening arrhythmias, multi-agent technologies, information and measurement system of electrocardiodiagnostics, stratification by risk groups of life-threatening arrhythmias

For citation: Bekbay A.T., Ozhikenov K.A., Bodin O.N., Tuyakbayev A.A. Prediction of life-threatening arrhythmias in the information and measurement system of electrocardiodiagnostics. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):93–102. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-11

Постановка проблемы

В настоящее время считается, генезис жизнеопасных аритмий (ЖА) обусловлен структурными и функциональными нарушениями в работе сердца [1]. При этом определяющими признаками для возникновения летальных аритмий являются [2–4]:

- инфаркт миокарда, гипертрофия и дилатация желудочков, воспаление и отек миокардиальной ткани;
- «классические» факторы риска (ФР), такие как возраст, сахарный диабет, пол, курение, семейный анализ сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), артериальная гипертензия (АГ).

Эти признаки, по данным многих исследователей, составляют анатомическую основу для возникновения ЖА с различными механизмами. К сожалению, нет общепринятого алгоритма обследования больных после пациентов, перенесших инфаркт миокарда (ИМ), позволяющего оценивать риск ЖА у таких пациентов.

Существующие методы и средства стратификации риска ЖА не позволяют точно определить группы риска и корректно рекомендовать лечение. Таким образом, актуальность разработки новых методов и системы стратификации населения на предмет предрасположенности к ЖА не вызывает сомнений.

Материалы и методы

В связи с тем, что предсказательная значимость каждого признака *в отдельности* невысока, за исключением критического состояния сердца, требующего оказания немедленной экстренной кардиологической помощи [5], авторами предлагается использовать комбинацию признаков [6]. При этом основными показателями, указывающими на целесообразность включения параметров в перечень контролируемых, являются его способность дать информацию о состоянии сердца и качество этой информации. На рис. 1 показаны признаки жизнеопасных аритмий (а) и информативность причин их возникновения (б) [7, 8].



а)

Номер	Признак	Летальность	Повторный ИМ	Госпиталь
11	Курение (<10 лет)	0,142	0,08	0,594
22	Курение (>10 лет)	0,199	0,041	0,891
13	АГ	0,797	0,627	1,460
44	СД	0,120	1,203	0,087
55	ХС > 6,5	0,283	0,158	1,397
66	ЛПНП > 5,1	0,262	0,001	0,560
77	ЛПВП > 0,9	0,520	0,070	0,190
88	ИА > 3,0	0,567	0,014	0,928
99	ЭКГ (Q+ИМ)	0,419	0,012	0,534
110	ЖЭ > 10/сут	0,385	0,602	0,192
111	УО < 60 мл	0,567	0,500	0,050
112	ФВ < 55 %	0,794	0,973	0,570
113	ММ < 180 гр	0,519	0,639	0,044

б)

Рис. 1. Признаки жизнеопасных аритмий

Прогнозирование ЖА является математической задачей выбора одной из гипотез, к которым могут быть отнесены такие классы: высокий – средний – низкий риск ЖА [3, 9]. Выбор одной из гипотез осуществляется интеллектуальным агентом (ИА), представляющим собой аппаратно-программный объект, автономно функционирующий для достижения целей, поставленных перед ним пользователем, и обладающий определенными интеллектуальными способностями [10]. ИА используются для содействия пользователю в получении, сборе, обработке и анализе информации. Структурная схема мультиагентной системы (МАС) в составе информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики приведена на рис. 2 [11].

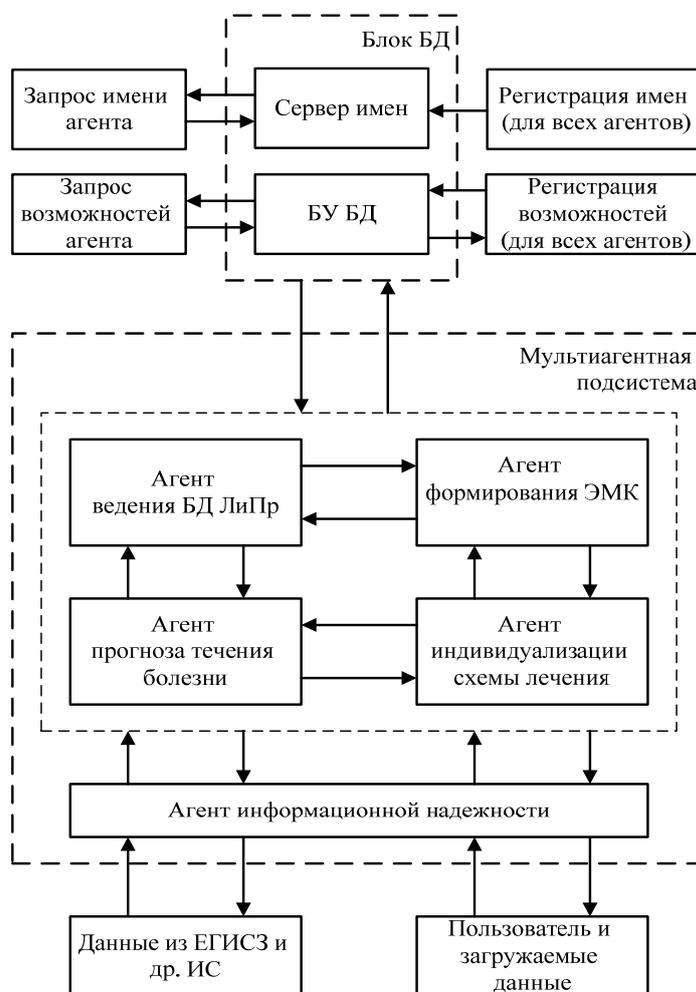


Рис. 2. Структурная схема мультиагентной системы

Работа МАС состоит в том, чтобы разбить решение сложной задачи, решаемой одним объектом – централизованной информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики – на более мелкие, более простые задачи, обрабатываемые несколькими объектами – распределенной системой ИА.

Результаты и обсуждение

1. Прогнозирование АВ-блокад I, II и III степени

Прогнозирование частот возникновения АВ-блокад крайне важно [12]. Нарушение атриовентрикулярной проводимости характеризуется задержкой или прекращением проведения импульсов из предсердий через атриовентрикулярный узел, пучок Гиса и его ножки к желудочкам [13]. Одной из причин атриовентрикулярных блокад (АВ-блокад) является нарушение проводимости в атриовентрикулярном соединении. Выделяют атриовентрикулярную блокаду I степени (проявляется удлинением интервала между предсердными и желудочковыми сокращениями), II степени (проявляется увеличением числа сокращений предсердий по отношению

к числу сокращений желудочков из-за блокированного проведения некоторых предсердных импульсов) и III степени (полное отсутствие координации между предсердными и желудочковыми ритмами).

На рис. 3 приведена иллюстрация процесса возникновения АВ-блокад: *a* – приведена иллюстрация периодической стимуляции синусовым узлом сердечной мышцы; *b* – представлена зависимость распространения потенциала действия от рефрактерности возбуждаемых клеток.

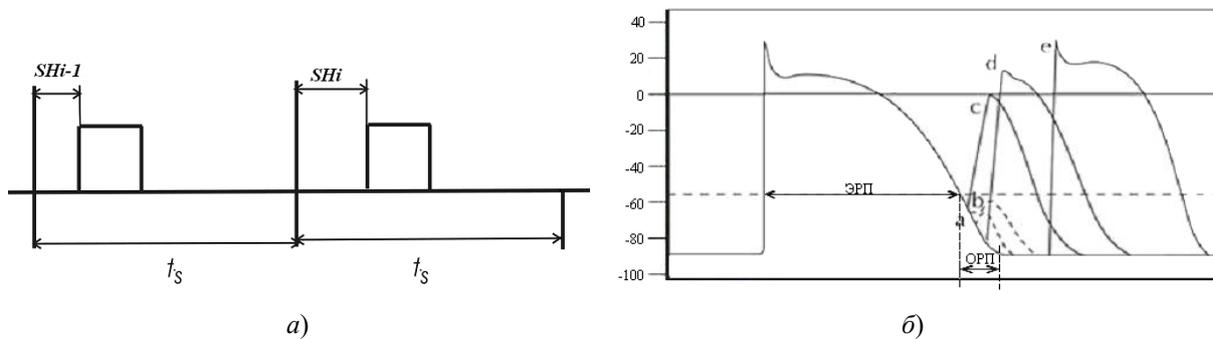


Рис. 3. Процесс возникновения АВ-блокад

Физико-химические процессы, протекающие в миокарде, влияют на скорость восстановительных реакций, что выражается в зависимости продолжительности интервалов распространения импульсов HS (интервал времени от пучка Гиса до синусового узла) и SH (интервал времени от синусового узла до пучка Гиса). При невысоких значениях частоты генерации импульсов синусовым узлом значение интервала SH изменяется незначительно в ограниченных пределах.

Относительный рефрактерный период (ОРП) оценивается по максимальному интервалу сцепления между двумя последующими импульсами, при котором происходит задержка проведения импульса в АВ-узле. Такое состояние соответствует условиям возникновения АВ-блокады I степени. Эффективный рефрактерный период (ЭРП) АВ-узла соответствует максимальному интервалу сцепления между двумя последовательными импульсами, при котором второй импульс на желудочки не проводится. Данное состояние соответствует условиям развития АВ-блокады III степени.

Кривая восстановления сердца [14] позволяет провести анализ зависимости периода t_s между импульсами от интервала времени HS:

$$t_s = HS + f_{VG}(HS) + SH_{\min}. \quad (1)$$

Зависимость частоты сердечных сокращений λ от интервала HS примет вид

$$\lambda = \frac{1}{HS + f_{VG}(HS) + SH_{\min}}. \quad (2)$$

На рис. 4 приведен результат прогнозирования АВ-блокад I, II и III степени.

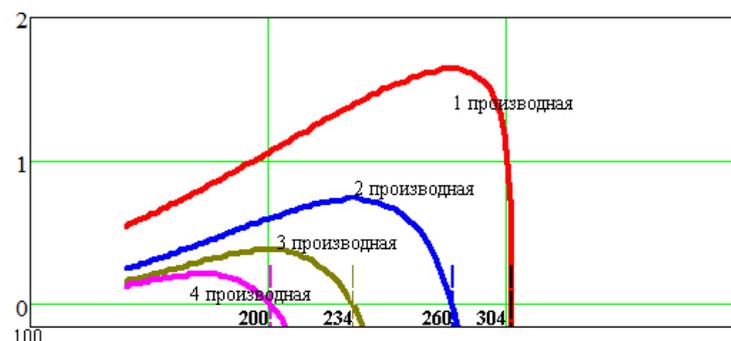


Рис. 4. Результат прогнозирования АВ-блокад

Таким образом, прогнозирование АВ-блокад позволяет оценить атриовентрикулярную проводимость и «тренированность» сердца пациента.

2. Прогнозирование гемодинамически значимой аритмии

Авторами предлагается определение гемодинамически значимой аритмии (ГЗА) осуществлять по результатам анализа ЭКС. Применение только электрокардиографического метода при определении ГЗА позволяет использовать его в реальном масштабе времени и в условиях свободной активности. На рис. 5 приведены временные диаграммы (а) и алгоритм определения ГЗА [5].

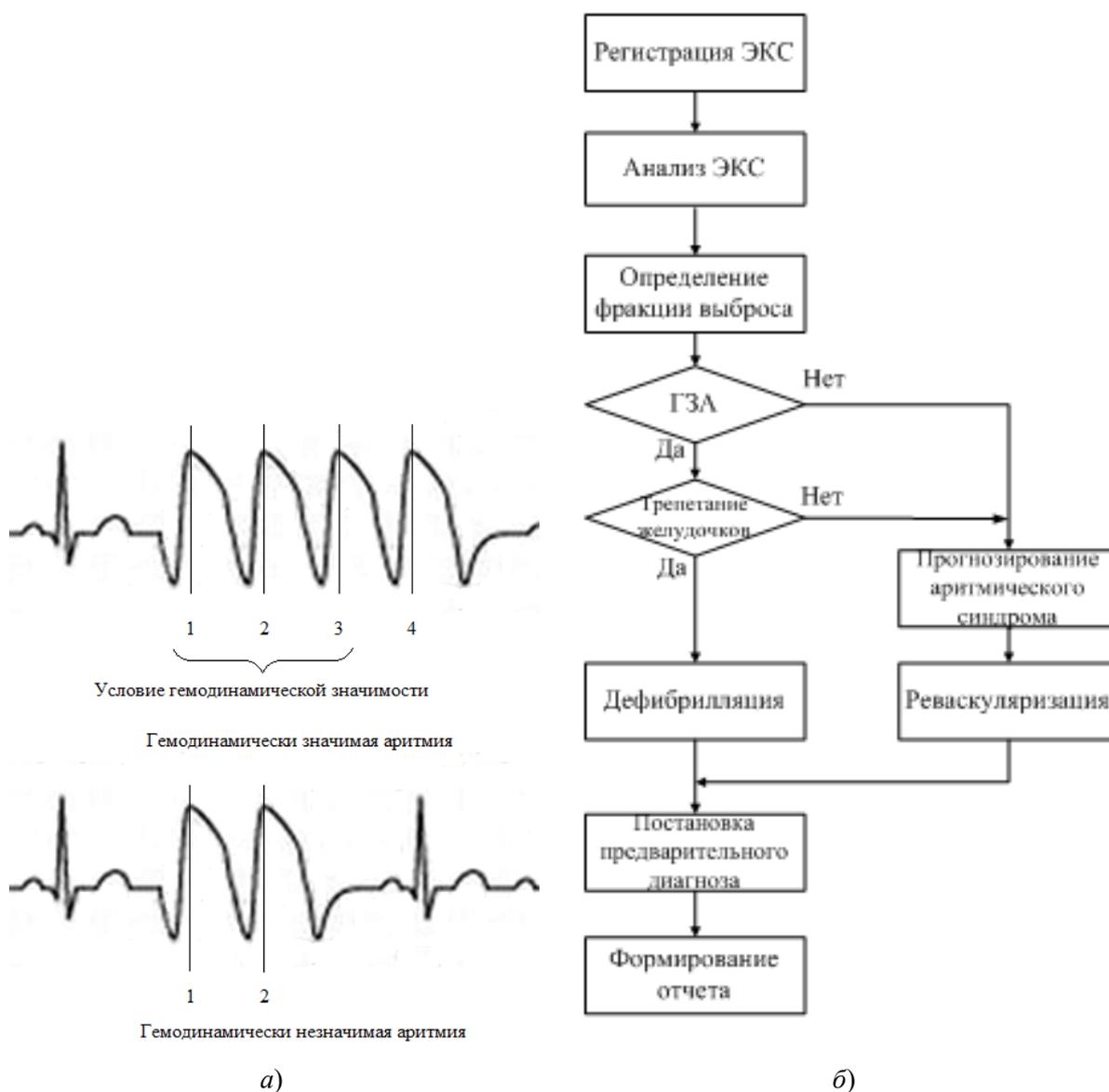


Рис. 5. Временные диаграммы (а) и алгоритм определения гемодинамически значимой аритмии (б)

Предвестником ГЗА служат как врожденные, так и приобретенные формы удлинения интервала QT на ЭКС, являющиеся предикторами фатальных нарушений ритма, которые, в свою очередь, приводят к внезапной смерти больных.

Авторы считают, что одновременное выполнение двух условий:

- 1) установление факта удлинения интервала QT на ЭКС;
 - 2) определение фракции выброса (ФВ) $< 50\%$ для не менее трех последующих кардиоциклов,
- позволит выявить ГЗА.

Длительность интервала QT зависит от частоты сердечных сокращений и пола пациента. Поэтому используют не абсолютную, а скорректированную величину интервала QT (QT_c), которую рассчитывают по формуле Базетта [15–17]:

$$QT_c = k\sqrt{R_1R_2}.$$

При ГЗА на ЭКС регистрируются отсутствие зубцов P и наличие небольших по амплитуде волн; нерегулярность желудочных комплексов нормальной или измененной конфигурации; сопутствующая блокада ножек пучка Гиса, иногда полная атриовентрикулярная блокада (феномен Фредерика)[13].

3. Моделирование re-entry

Наиболее распространенным механизмом начала фатальных аритмий является механизм повторного входа импульса re-entry (риэнтри). Необходимыми условиями для его реализации являются наличие замедления проведения импульса из-за большого ОРП (см. рис. 3) и однонаправленной блокады в каком-либо участке миокарда.

Моделирование распространения возбуждения в сердце с использованием двухкомпонентной модели Алиева – Панфилова, которая воспроизводит основные свойства волн возбуждения в сердечной мышце [6]. Данная модель представляет собой систему дифференциальных уравнений параболического типа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -ku(u-a)(u-1) - uv + \Delta u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\left(\varepsilon_0 + \frac{\mu_1 v}{u + \mu_2} \right) (v + ku(u-a-1)), \end{aligned}$$

где $\varepsilon_0 \ll 1$, k , a , μ_1 , μ_2 – параметры модели.

Для решения данной системы дифференциальных уравнений в частных производных используется метод сеток (метод конечных разностей) [18].

При моделировании учитывается пространственно-временная организация процесса возбуждения в миокарде. Первоначально проводится моделирование распространения возбуждения в миокарде на плоскости. Для этого поверхность модели сердца проецируется на плоскость, т.е. получается «развертка» поверхности модели сердца пациента на сетку решений модели Алиева – Панфилова (см. рис. 6) [19]. Однако поверхность сердца, как поверхность, гомеоморфную сфере, нельзя развернуть на плоскости без разрыва или смятия.

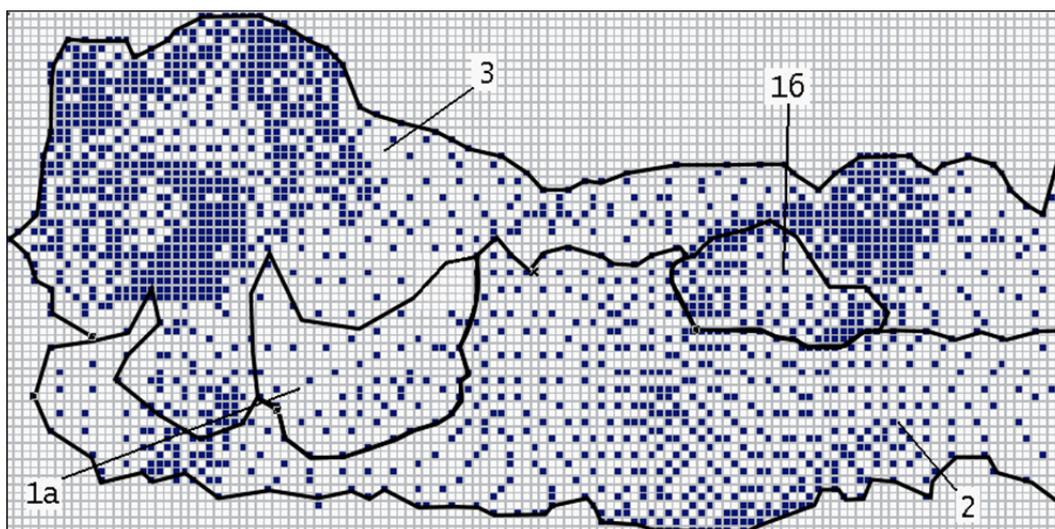


Рис. 6. «Развертка» поверхности модели сердца пациента на сетку решений модели Алиева – Панфилова:
 1а – область точек правого предсердия; 1б – область точек левого предсердия;
 2 – область точек желудочков; 3 – область точек артерий и вен

Суть проекции состоит в том, чтобы наилучшим образом «спроектировать» реальную поверхность модели сердца на плоскость, учитывая при этом все искажения и сводя их к минимуму. Главное при построении «развертки» поверхности модели сердца пациента на сетку решений модели Алиева – Панфилова, чтобы каждой исходной точке на поверхности модели сердца пациента соответствовала только одна точка на сетке решений модели Алиева – Панфилова карте. Результаты моделирования распространения волны возбуждения на «развертке» поверхности модели сердца (а) и соответствующие им участки на компьютерной модели сердца (б) приведены на рис. 7.

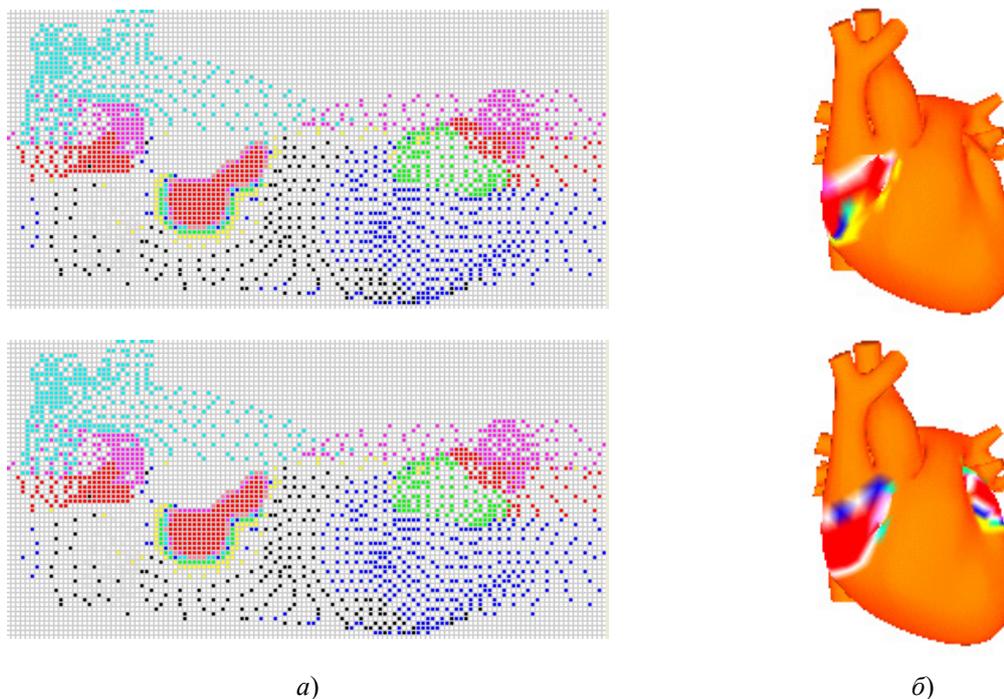


Рис. 7. Моделирование распространения волны возбуждения:
а – на «развертке» поверхности модели сердца; б – на компьютерной модели сердца

Для моделирования распространения возбуждения в сердце по результатам анализа электрокардиосигнала (ЭКС) представляется информация о временных отсчетах начала и окончания процессов деполяризации и реполяризации анатомических частей сердца, а также информация о поврежденных зонах на поверхности сердца. На основании этих данных корректируются параметры модели Алиева – Панфилова для разных точек поверхности сердца.

Заключение и выводы

По мнению авторов, оценка состояния сердца пациента в реальном времени по данным анализа ЭКС является востребованной услугой, так как риск жизнеопасных аритмий, приводящих к внезапной сердечной смерти, остается одной из нерешенных задач современного здравоохранения [20]. Распространенность летальности от ВСС, произошедшей за пределами стационара, в Европе составляет 38 случаев на 100 000 населения [21, 22]. Этому риску подвержены как люди пожилого возраста с известными болезнями сердца, так и молодые люди, не подозревающие о наличии у них проблем со здоровьем. Отдельной категорией являются люди, подверженные риску для здоровья из-за специфики своей работы, а также спортсмены.

Для снижения рисков жизненно опасных состояний сердца требуется, во-первых, совершенствование способов диагностики состояния сердца и, во-вторых, развитие портативных систем мониторинга состояния сердца в условиях свободной активности.

Своевременная диагностика и оказание экстренной кардиологической помощи имеет первостепенное значение.

Таким образом, оснащение информационно-измерительной системы электрокардиодиагностики методами и средствами прогнозирования ЖА обеспечивает стратификацию тяжести аритмического синдрома и позволяет вовремя оказать экстренную кардиологическую помощь.

Список литературы

1. Аритмии сердца: механизмы, диагностика, лечение : монография : в 3 т. / под ред. В. Дж. Мандела ; пер. с англ. М. : Медицина, 1996. Т. 2. 464 с.
2. Смирнова М. Д. [и др.]. Какие «новые» факторы целесообразно учитывать при оценке сердечно-сосудистого риска? // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2018. № 17. С. 77–85.
3. Серегин С. П. [и др.]. Математические модели прогнозирования и профилактики рецидивов инфаркта миокарда в реабилитационном периоде : монография / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. А. Корневского. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. 166 с.
4. Горохова С. [и др.]. Новые технологии прогнозирования риска развития ИБС // Врач. 2011. № 14. С. 22–25.
5. Патент № 2644303 Российская Федерация, А61В 5/0402 (2006.01), А61В 5/0456 (2006.01). Способ оказания экстренной кардиологической помощи / Бодин О. Н., Аржаев Д. А., Бодин А. Ю., Ожикенов К. А., Полосин В. Г., Рахматуллоев А. Ф., Рахматуллоев Р. Ф., Рахматуллоев Ф. К., Сафронов М. И., Сергеенков А. С., Убиенных А. Г. № 2016145352 ; заявл. 18.11.2016 ; опубл. 08.02.2018. 26 с.
6. Патент № 2719467 Российская Федерация, G06F 17/10 (2020.01). Способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации / Баранов В. А., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Герасимов А. И., Печерская Е. А., Шерстнев В. В. № 2019134726 ; заявл. 11.11.2019 ; опубл. 17.04.2020. 44 с.
7. Гурьева М. Э., Журавлева М. В., Алеева Г. Н. Критерии качества жизни в медицине и кардиологии // Русский медицинский журнал. 2006. Т. 14, № 10. С. 761–763.
8. Гайнулин Ш. М. [и др.]. Табакокурение и риск сердечно-сосудистых заболеваний среди трудоспособного населения г. Москвы // Российский кардиологический журнал. 2006. № 1. С. 5–7.
9. Белялов Ф. И. Алкоголь и профилактика сердечно-сосудистых заболеваний // Кардиология. 2004. Т. 44, № 4. С. 78–82.
10. Безбородова О. Е., Крамм М. Н., Ожикенов К. А., Ожикенова А. К. Мультиагентные технологии в медицинских информационных системах / под ред. О. Н. Бодина. Алматы : Лантар Трейд, 2021. 314 с.
11. Заявка на патент РФ № 2020121332. Способ и система оптимизации лечебно-диагностической медицинской помощи / Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Крамм М. Н. ; рег. 26.06.2020, решение о выдаче патента от 06.05.2021.
12. Рахматуллоев Ф. К. Чреспищеводная электрокардиостимуляция сердца и клиническая электрофизиология антиаритмических средств : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006, 112 с.
13. Орлов В. Н. Руководство по электрокардиографии. М. : Медицина, 1984. 528 с.
14. Патент № 2591839 Российская Федерация, А61В 5/0402. Способ прогнозирования АВ-блокады I, II и III степени / Бодин О. Н., Полосин В. Г., Рахматуллоев Ф. К., Логинов Д. С. Балахонова С. А. № 2015127839/14 ; заявл. 10.07.2015 ; опубл. 20.07.2016. 15 с.
15. Бокерия Л. А., Ревиншвили А. Ш., Проничева И. В. Синдром удлиненного интервала QT – клиника, диагностика, лечение // Анналы аритмологии. 2005. Т. 2, № 4. С. 7–17.
16. Афанасьева Т. Ю., Ослопова Ю. В., Терегулов Ю. Э., Ослопов В. Н. Долгий QT : монография. Казань : МеДДоК, 2013. 208 с.
17. Bazett H. C. An analysis of the time-relations of electrocardiograms // Heart. 1920. Vol. 7. P. 353–370.
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984.
19. Патент № 2358646 Российская Федерация, А61В 5/0402 (2006.01). (54) Способ моделирования и визуализации распространения возбуждения в миокарде / Бодин О. Н., Гладкова Е. А., Кузьмин А. В., Митрохина Н. Ю., Мулюкина Л. А., Строкова И. В. № 2007123430/14 ; заявл. 27.12.2008 ; опубл. 20.06.2009. 23 с.
20. Бокерия О. Л., Биниашвили М. Б. Внезапная сердечная смерть и ишемическая болезнь сердца // Анналы аритмологии. 2013. Т. 10, № 2. С. 69–79.
21. Goldstein S., Bayes-de-Luna A., Guindo-Soldevila J. Sudden cardiac death. Armonk, Futura, 1994. P. 13–26.
22. Israel C. W. Mechanisms of sudden cardiac death // Indian Heart J. 2014. № 66. P. 10–17.

References

1. Mandel V.Dzh. [ed.]. *Aritmii serdtsa: mekhanizmy, diagnostika, lechenie: monografiya: v 3 t. = Cardiac arrhythmias: mechanisms, diagnosis, treatment : monograph : in 3 vols.* Transl. from Engl. Moscow: Meditsina, 1996;2:464. (In Russ.)
2. Smirnova M.D. [et al.]. What "new" factors should be taken into account when assessing cardiovascular risk? *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular therapy and prevention.* 2018; (17):77–85. (In Russ.)

3. Seregin S.P. [et al.]. *Matematicheskie modeli prognozirovaniya i profilaktiki retsidivov infarkta miokarda v reabilitatsionnom periode: monografiya = Mathematical models of prediction and prevention of recurrent myocardial infarction in the rehabilitation period : monograph*. Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2015:166. (In Russ.)
4. Gorokhova S. [et al.]. New technologies for predicting the risk of coronary heart disease. *Vrach = Doctor*. 2011;(14):22–25. (In Russ.)
5. Patent 2644303 Russian Federation, A61B 5/0402 (2006.01), A61B 5/0456 (2006.01). Method of providing emergency cardiological care. Bodin O.N., Arzhaev D.A., Bodin A.Yu., Ozhikenov K.A., Polosin V.G., Rakhmatullov A.F., Rakhmatullov R.F., Rakhmatullov F.K., Safronov M.I., Sergeenkov A.S., Ubiennykh A.G. No. 2016145352; appl. 18.11.2016; publ. 08.02.2018. (In Russ.)
6. Patent 2719467 Russian Federation, G06F 17/10 (2020.01). A method for complex control of the state of a multiparametric object based on heterogeneous information. Baranov V.A., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Gerasimov A.I., Pecherskaya E.A., Sherstnev V.V. No. 2019134726; appl. 11.11.2019; publ. 17.04.2020. (In Russ.)
7. Guryleva M.E., Zhuravleva M.V., Aleeva G.N. Quality of life criteria in medicine and cardiology. *Russkiy meditsinskiy zhurnal = Russian Medical Journal*. 2006;14(10):761–763. (In Russ.)
8. Gaynulin Sh.M. [et al.]. Tobacco smoking and the risk of cardiovascular diseases among the able-bodied population of Moscow. *Rossiyskiy kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2006; (1):5–7. (In Russ.)
9. Belyalov F.I. Alcohol and prevention of cardiovascular diseases. *Kardiologiya = Cardiology*. 2004;44(4):78–82. (In Russ.)
10. Bezborodova O.E., Kramm M.N., Ozhikenov K.A., Ozhikenova A.K. *Mul'tiagentnye tekhnologii v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh = Multi-agent technologies in medical information systems*. Almaty: Lantar Treyd, 2021:314. (In Russ.)
11. Patent 2020121332 Russian Federation. Method and system of optimization of therapeutic and diagnostic medical care. Bodin O.N., Bezborodova O.E., Kramm M.N.; reg. 26.06.2020, the decision to grant a patent dated 06.05.2021. (In Russ.)
12. Rakhmatullov F.K. *Chrespishchevodnaya elektrokardiostimulyatsiya serdtsa i klinicheskaya elektrofiziologiya antiaritmicheskikh sredstv: monografiya = Transesophageal cardiac pacing and clinical electrophysiology of antiarrhythmic drugs : monograph*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2006:112. (In Russ.)
13. Orlov V.N. *Rukovodstvo po elektrokardiografii = Electrocardiography Manual*. Moscow: Meditsina, 1984:528. (In Russ.)
14. Patent 2591839 Russian Federation, A61B 5/0402. A method for predicting AV blockades of I, II and III degrees. Bodin O.N., Polosin V.G., Rakhmatullov F.K., Loginov D.C. Balakhonova S.A. No. 2015127839/14; appl. 10.07.2015; publ. 20.07.2016. (In Russ.)
15. Bokeriya L.A., Revishvili A.Sh., Pronicheva I.V. Long QT syndrome - clinic, diagnosis, treatment. *Annaly aritmologii = Annals of Arrhythmology*. 2005;2(4):7–17. (In Russ.)
16. Afanas'eva T.Yu., Oslopova Yu.V., Teregulov Yu.E., Oslopov V.N. *Dolgiy QT: monografiya = Long QT : a monograph*. Kazan: MeDDoK, 2013:208. (In Russ.)
17. Bazett H.C. An analysis of the time-relations of electrocardiograms. *Heart*. 1920;7:353–370.
18. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov = Handbook of Mathematics for researchers and Engineers*. Moscow: Nauka, 1984. (In Russ.)
19. Patent 2358646 Russian Federation, A61B 5/0402 (2006.01). (54) A method for modeling and visualizing the propagation of excitation in the myocardium. Bodin O.N., Gladkova E.A., Kuz'min A.V., Mitrokhina N.Yu., Mulyukina L.A., Strokova I.V. No. 2007123430/14; appl. 27.12.2008; publ. 20.06.2009. (In Russ.)
20. Bokeriya O.L., Biniashvili M.B. Sudden cardiac death and coronary heart disease. *Annaly aritmologii = Annals of Arrhythmology*. 2013;10(2):69–79. (In Russ.)
21. Goldstein S., Bayes-de-Luna A., Guindo-Soldevila J. *Sudden cardiac death*. Armonk, Futura, 1994:13–26.
22. Israel C.W. Mechanisms of sudden cardiac death. *Indian Heart J*. 2014;(66):10–17.

Информация об авторах / Information about the authors

Айнур Тоқтарғалиқызы Бекбай

докторант,

Казахский национальный исследовательский

университет имени К. И. Сатпаева

(Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)

E-mail: ainura_b.t@mail.ru

Ainur T. Bekbay

Doctoral student,

K. I. Satpayev Kazakh National Research University

(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Касымбек Адильбекович Ожикенов

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой робототехники
и технических средств автоматизации,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: k.ozhikenov@satbayev.university

Олег Николаевич Бодин

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

Алтай Алишерович Туякбаев

кандидат технических наук, доцент,
ассистент-профессор кафедры робототехники
и технических средств автоматизации,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: a.tuyakbayev@satbayev.university

Kassymbek A. Ozhikenov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of robotics and technical
means of automation,
K. I. Satpayev Kazakh National Research University
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Oleg N. Bodin

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

Altay A. Tuyakbayev

Candidate of technical sciences, associate professor,
assistant-professor of sub-department
of robotics and technical means of automation,
K. I. Satpayev Kazakh National Research University
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

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

Поступила в редакцию/Received 16.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 23.06.2021

Принята к публикации/Accepted 24.06.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 629.7.058

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ДЛЯ САМОЛЕТНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

И. В. Аксенов¹, В. М. Чайковский²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является самолетная радионавигационная система, обеспечивающая его безопасность в ходе полета. Предметом предлагаемого исследования является методика построения самолетной радионавигационной системы, основанной на использовании эффекта Доплера. Непосредственной целью работы является разработка цифрового частотного дискриминатора, являющегося основным, наиболее ответственным узлом в описываемой методике применения эффекта Доплера при построении подобных измерителей путевой скорости и угла сноса самолета. *Материалы и методы.* Описание процесса определения путевой скорости самолета и его угла сноса базируется на методике, в основе реализации которой лежит использование эффекта Доплера. Введено понятие цифрового частотного дискриминатора и сформулированы основные требования, предъявляемые к его работе. *Результаты.* На основе предложенного подхода показан процесс разработки цифрового частотного дискриминатора на микроконтроллере (МК) для широко используемых на практике четырех-лучевых двухчастотных доплеровских навигационных самолетных систем (ДНСС) с двойным преобразованием частоты. *Выводы.* Практическая реализация предложенного дискриминатора особенно актуальна при построении беспилотных летательных аппаратов, поскольку наряду с высокой точностью измерения значений их основных навигационных параметров, таких как: путевая скорость и угол сноса, обладает еще низким энергопотреблением и высокой отказоустойчивостью, достигаемой за счет использования цифровой микро схемотехники.

Ключевые слова: МК, эффект Доплера, самолет, частотный дискриминатор, навигационная система

Для цитирования: Аксенов И. В., Чайковский В. М. Частотный дискриминатор для самолетной радионавигационной доплеровской системы на микроконтроллере // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 103–109. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

FREQUENCY DISCRIMINATOR FOR AIRCRAFT RADIONAVIGATION DOPPLER SYSTEM BASED ON MICROCONTROLLER

I.V. Aksenov¹, V.M. Chaikovsky²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is an aircraft radio navigation system. The subject of this research is the methodology for constructing an airborne radio navigation system based on the Doppler effect. The aim of the work

is to develop a digital frequency discriminator, which is the main unit in the method of applying the Doppler effect in the construction of a speed and drift meter. *Materials and methods.* A technique based on the Doppler effect was used to describe the process of determining the speed of an aircraft and its drift angle. The concepts of digital frequency discriminator are introduced. *Results.* The proposed approach shows the development process of a four-beam dual-frequency DSS with double frequency conversion, including a digital frequency discriminator based on the MC. *Conclusion.* This implementation is especially relevant for unmanned aerial vehicles, since it has a high measurement and calculation accuracy, low power consumption, and fault tolerance.

Key words: microcontroller, Doppler effect, plane, frequency discriminator, navigation system

For citation: Aksenov I.V., Chaykovskiy V.M. Frequency discriminator for aircraft radionavigation Doppler system based on microcontroller. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 103–109. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

Передатчик навигационной системы самолета – летательного аппарата (ЛА) облучает земную поверхность высокочастотными электромагнитными колебаниями под углом визирования β_0 (рис. 1), между значением частоты излучаемых колебаний и частотой принимаемых самолетным приемником отраженных от земной поверхности колебаний возникает сдвиг, обусловленный проявлением эффекта Доплера и называемый доплеровским приращением частоты.

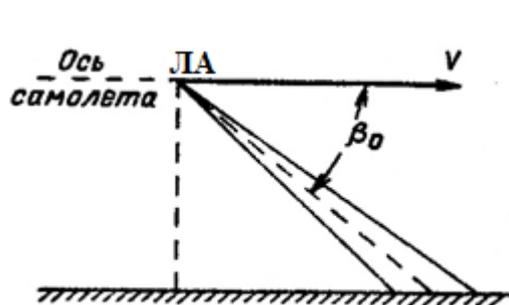


Рис. 1. Облучение земной поверхности

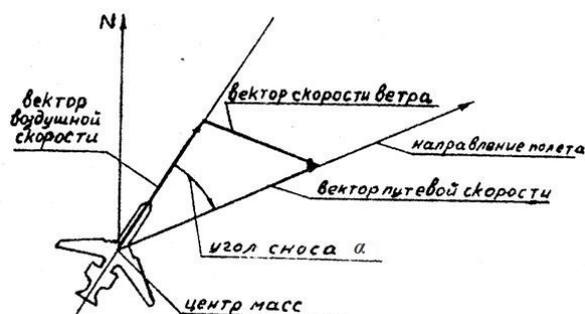


Рис. 2. Угол сноса

Для измерения путевой скорости ЛА передатчик через антенну облучает земную поверхность под углом β_0 высокочастотными гармоническими колебаниями с фиксированным значением частоты, которые в результате отражения изменяют значение своей частоты на уровень доплеровского приращения, пропорционального значению путевой скорости ЛА. При этом, если ось диаграммы направленности антенны совпадает с направлением вектора путевой скорости, т.е. при отсутствии угла сноса α , данное приращение частоты принимаемого сигнала, по отношению к частоте излученного будет иметь максимальное значение, которое фиксируется с помощью специального устройства, выдающего это значение на цифровой прибор [1]. Оценка значения угла сноса α , образуемого между направлением вектора путевой скорости и продольной (строительной) осью ЛА, происходит путем поворота на тот или иной угол ось диаграммы направленности антенны до момента достижения максимального значения уровня доплеровского приращения частоты, при этом произведенный угол поворота антенны будет равняться углу сноса ЛА (рис. 2).

Цифровой частотный дискриминатор (ЦЧД) можно реализовать путем подачи оцифрованных значений напряжения с выхода частотного дискриминатора, предложенного в работе [2]. Альтернативным и в то же время более грамотным подходом является построение данной схемы, которая обеспечивает оценку значений путевой скорости и угла сноса ЛА с большей точностью.

Доплеровские навигационные самолетные системы (ДНСС) прошли свое развитие от однолучевых до многолучевых систем, идя по пути снижения степени влияния на оценку значений угла сноса и путевой скорости ЛА, которое непременно возникает в ходе совершения им полета с наличием у него тангажа или крена (рис. 3).



Рис. 3. Тангаж и крен ЛА

В настоящее время широкое практическое использование получили четырехлучевые с X-образным пересечением строго под углом 90° двух пар лучей (A1–A3) и (A2–A4) двухчастотные ДНСС с двойным преобразованием частоты (ДЧ ДНСС с ДПЧ), специфику построения которых поясняет рис. 4. Тогда при условии нахождения лучей A1 и A3 в одной вертикальной плоскости и согласно проявлению эффекта Доплера [3], значение доплеровской частоты выходного сигнала первого канала будет равно $F_{v1} = \frac{2V}{\lambda} \cos\beta_0 \cos(\theta - \alpha)$, а третьего канала, соответственно, $F_{v3} = \frac{2V}{\lambda} \cos\beta_0 \cos(\theta + \alpha)$. При этом значение разностного сигнала между ними $F_{v1,3} = F_{v1} - F_{v3}$ будет оставаться неизменным при наличии как крена, так и тангажа у ЛА, возникновение которых равносильно изменению начального значения угла β_0 , что приводит к возникновению значительного искажения результата оценки значений навигационных параметров ЛА. Однако в данном случае происходит следующее, на сколько возраст/уменьшится значение величины F_{v1} , на столько произойдет уменьшение/возрастание значения величины F_{v3} , т.е. тогда значение разностного сигнала не изменится. Аналогичное будет происходить и с сигналами F_{v2} , F_{v4} , которые формируют сигнал второй разностной частоты $F_{v2,4}$. Значение путевой скорости будет пропорционально абсолютному значению любой из полученных разностных частот $F_{v1,3}$, $F_{v2,4}$, причем для получения более точной оценки значения путевой скорости последнюю можно оценить путем нахождения среднего арифметического значения данных разностных частот.

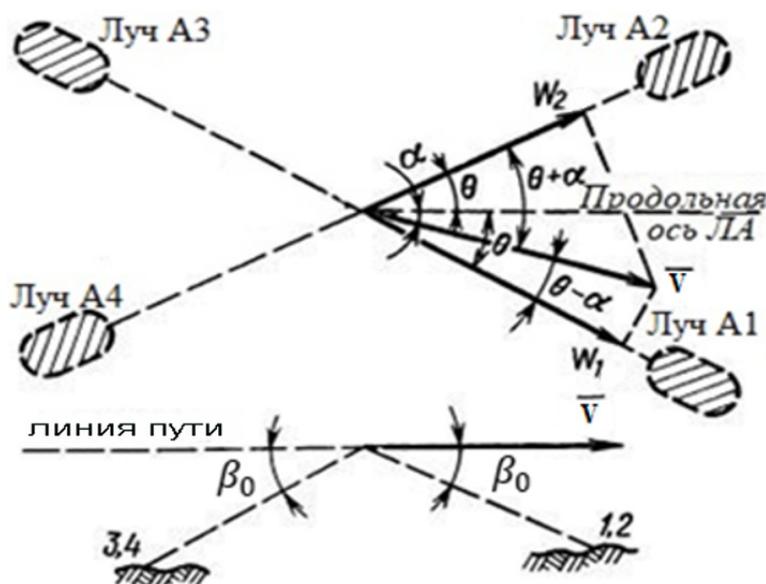


Рис. 4. Вид проекций на земную поверхность диаграмм направленностей 4-лучевой навигационной системы

Значение угла сноса α будет пропорционально разности значений разностных частот, а знак угла лево/право будет определяться знаком данной разности. Следует заметить, что отсчет значения путевой скорости необходимо отсчитывать только после установки нулевого значения угла α , путем совмещения оси диаграммы направленности антенны с направлением вектора скорости V ЛА.

Выделение сигналов частот $F_{\nu 1} \dots F_{\nu 4}$ осуществляется с помощью балансного смесителя (БС), на один из входов которого поступает «слабый» излучаемый сигнал, являющийся «просочившимся» сигналом, обусловленным наличием как монтажной емкости, так и наличием боковых лепестков у приемопередающих антенн. В обобщенном виде структурная схема четырехлучевой двухчастотной ДНСС с ДПЧ представлена на рис. 5.

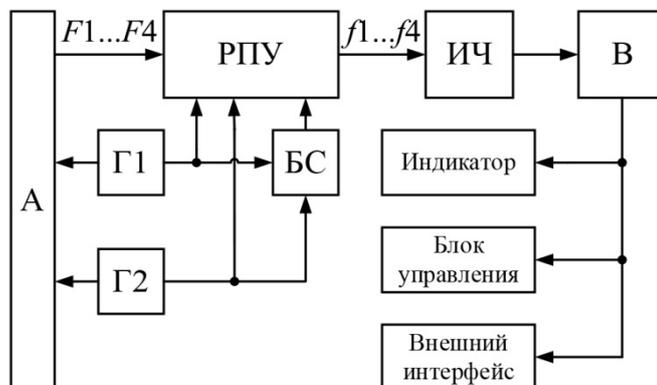


Рис. 5. Структурная схема ДНСС:

А – приемопередающая антенна; РПУ – радиоприемное устройство;
ИЧ – измеритель частоты; В – вычислитель

Структурная схема РПУ показана на рис. 6, где генераторы сверхвысоких частот ГСВЧ1 и ГСВЧ2, реализованные по структуре: задающий кварцевый генератор – умножитель частоты, генерируют колебания с частотами f_{01} и f_{02} , разность значений которых будет равняться $f_{пр}$ значению промежуточной частоты, на которую настраиваются полосы пропускания всех УПЧ (1...4). При Х-образном расположении лучей антенны сигнал с частотой f_{01} излучается антеннами, формирующими передние лучи, а с частотой f_{02} – задние. При первом преобразовании частоты в качестве опорных сигналов используются: в каналах передних лучей – «ослабленный» сигнал ГСВЧ2, а в каналах задних лучей – «ослабленный» сигнал ГСВЧ1. Понятие «ослабленный» сигнал означает то, что поступление данного сигнала на соответствующий вход смесителя специально не организовывается, а осуществляется за счет наличия незначительной монтажной емкости, в различных устройствах фактически являющейся «паразитной», т.е. не желательной, но в данном случае с учетом мощности и значений частот выходных сигналов обеих ГСВЧ значения данной оказывается достаточно для обеспечения нормального функционирования соответствующих смесителей СМ1 ... СМ4. Однако следует заметить, что использование данного приема с целью исключения влияния выходного сигнала каждого ГСВЧ сразу на все смесители накладывает дополнительные конструктивные требования в виде организации специальных экранов из немагнитного материала типа пермаллоя при практической реализации всей навигационной системы. В результате преобразования частот спектры принятых сигналов переносятся в высокочастотную область промежуточной частоты, имеющей значение (10–30 МГц). Поскольку каналы в РПУ идентичны, их работа поясняется на примере первого. После усиления в УПЧ сигнал поступает на когерентный детектор (КД₁), на который в качестве опорного подается сигнал, имеющий значение частоты $f_{пр}$, полученной в результате вычитания частот выходных сигналов ГСВЧ1 и ГСВЧ2. С помощью КД осуществляется второе преобразование частоты – в область доплеровских частот. Полученные сигналы доплеровского приращения частоты $f_{д1} \dots f_{д4}$, соответственно, проходят фильтрацию в ФНЧ и усиление в усилителе сигнала доплеровской частоты УДЧ.

Поскольку весь процесс измерения в современных многолучевых доплеровских навигационных системах предполагает устранение влияния крена и тангажа, в первую очередь формируются сигналы разностных величин $\Delta f_1 = f_{д1} - f_{д3}$ и $\Delta f_2 = f_{д2} - f_{д4}$. Значение их разности $\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2$ будет пропорционально значению угла сноса α , а направление его отклонения относительно оси ЛА (лево/право) будет определяться знаком величины Δf [5]. Из сказанного следует, что ключевым узлом, отвечающим за достоверность результата работы всей навигационной системы ЛА, будет являться ЦЧД, выполняющий целый ряд сравнений значений частот тех или иных сигналов. Структурная схема разработанного цифрового частотного дискриминатора показана на рис. 7. Здесь облучение земной поверхности происходит сигналами

с разными значениями частот, поэтому для корректного вычисления в ВУ предварительно вводятся соответствующие коэффициенты масштабирования, учитывающие отличие между собой значений частот зондирующих сигналов.

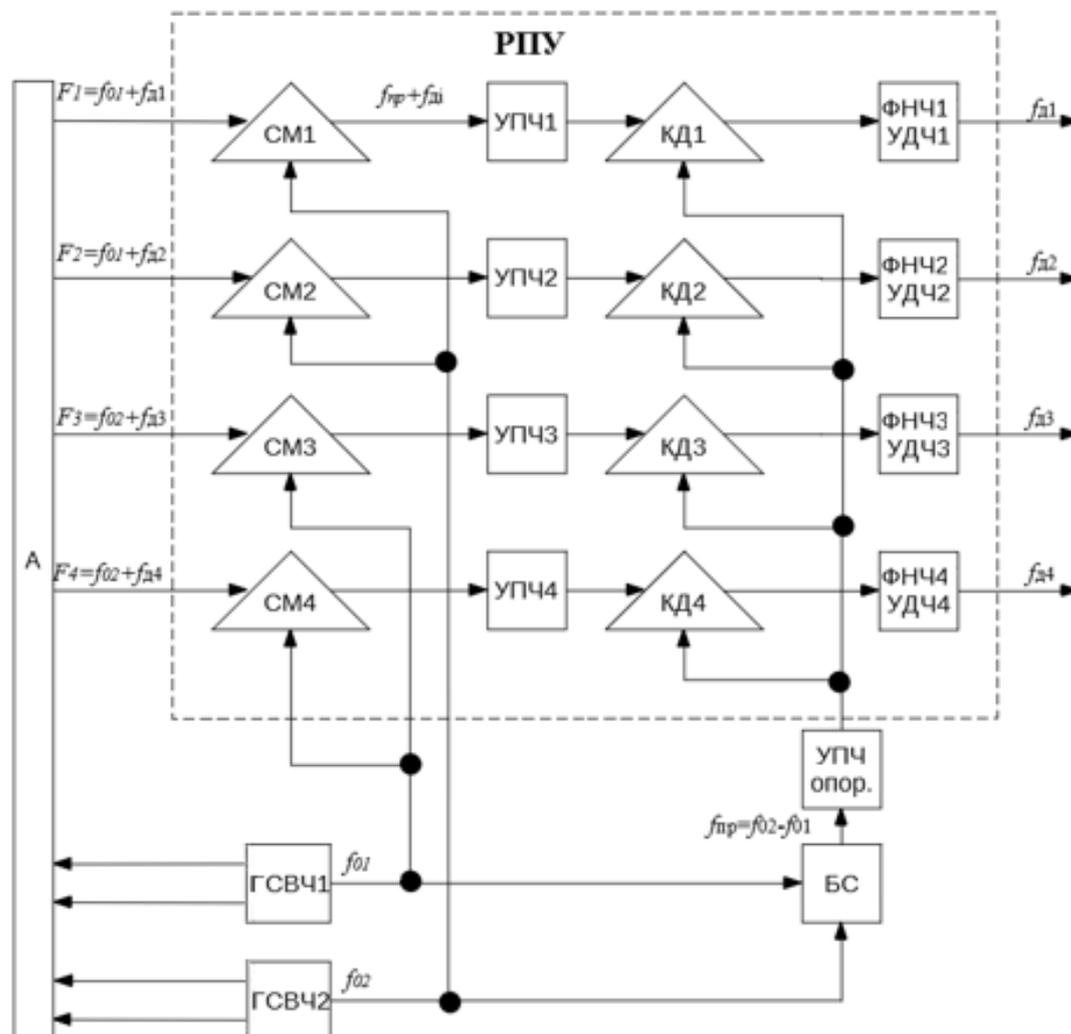


Рис. 6. Структурная схема РПУ

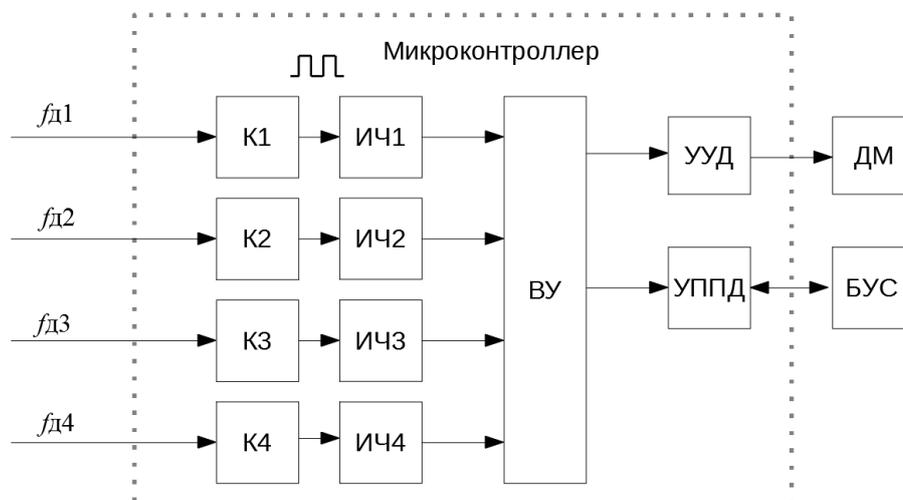


Рис. 7. Структурная схема ЦЧД:

УУД – устройство управления дисплеем; ДМ – дисплейный модуль;
УППД – устройство приема-передачи данных; БУС – блок управления самолетом

Компаратор K_1 формирует сигнал в виде импульсной последовательности с частотой повторения f_k , в результате срабатывает каждый раз при переходе сигнала с частотой доплеровского приращения f_{d1} через ноль. Измеритель частоты (ИЧ₁) выделяет интервал времени равный периоду повторения сигнала f_{d1} и заполняет его импульсами образцовой, опорной частоты с последующим подсчетом их количества, что позволяет определить значение частоты f_{d1} , оценка значений частот $f_{d2} \dots f_{d4}$ происходит аналогичным образом [6]. Затем вычислительное устройство (ВУ) осуществляет операцию вычисления.

Структурно-функциональная схема ЦЧД (рис. 8) разработана так, чтобы максимальное количество элементов входило в периферию микроконтроллера. Поскольку большинство микроконтроллеров не позволяют мультиплексировать аналоговые компараторы, используется 10-битный встроенный АЦП с мультиплексором (MUX).

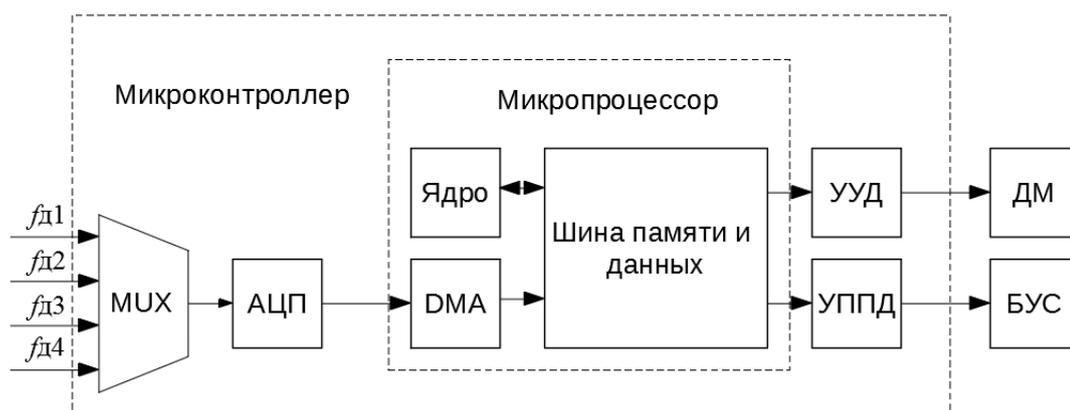


Рис. 8. Структурно-функциональная схема ЦЧД

При выборе микроконтроллера основной упор делался на наличие в его составе мультиплексора и АЦП с высокой разрешающей способностью. При этом учитывалось наличие у него встроенной памяти EEPROM, необходимой как для сохранения различных настроек, включая значения различных калибровочных и масштабирующих коэффициентов. Поэтому в качестве такого микроконтроллера используется STM8AL3L46T серии STM8AL от компании «ST». Данный контроллер является малопотребляющим 8-битным КМОП микроконтроллером для систем автоматизации, выполненным на основе CISC архитектуры [7]. Микроконтроллер построен по гарвардской архитектуре, что позволяет большинство инструкций выполнять за один такт. Производительность достигает 16MIPS. Данному МК, кроме обеспечения им высокой отказоустойчивости и обладания 12-битными АЦП и ЦАП, присущи все интерфейсы, необходимые для взаимодействия – все перечисленное позволяет ему производить измерение с повышенной точностью. Микроконтроллер STM8L31 является улучшенной версией STM8AL3L, поскольку обладает интерфейсом для взаимодействия с LCD дисплеем. Функционал контроллера был опробован и показал хорошие, стабильные результаты.

В данной работе рассматривается четырехлучевая двухчастотная ДНСС с двойным преобразованием частоты, включающая цифровой частотный дискриминатор на МК. Данная реализация особенно актуальна для беспилотных летательных аппаратов, поскольку помимо высокой точности измерения значений основных навигационных параметров, таких как путевая скорость и угол сноса ЛА, она обладает низким энергопотреблением и высокой отказоустойчивостью из-за использования элементов цифровой микросхемотехники. Применение высокостабильных малогабаритных СВЧ-генераторов позволяет значительно снизить требования к частотным свойствам антенн и резко упростить их конструкцию, исключив практику применения так называемых частотно-зависимых антенн, у которых нестабильность значения частоты зондирующего сигнала вызывает изменения значения угла визирования, что приводило к нарушению калибровки всей системы измерения, проводимой на заводе-изготовителе, что в конечном счете вызывало возникновение погрешности измерений.

Список литературы

1. Флеров А. Г., Тимофеев В. Г. Доплеровские устройства и системы навигации. М. : Транспорт, 1987. 191 с.
2. Аксенов И. В., Чайковский В. М. Частотный дискриминатор для автономной самолетной навигационной системы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 170–172.
3. Казаринов Ю. М., Коломенский Ю. А., Кутузов В. М. [и др.]. Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учеб. завед. / под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Академия, 2008.
4. Аксенов И. В. Частотный дискриминатор для радионавигационной доплеровской системы на микроконтроллере // Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2020 : сб. аннотаций конкурсных работ 12-го Всерос. конкурса (23–27 ноября 2020). М. : МАИ, 2020. 228 с.
5. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / под ред. В. Е. Колчинского. М. : Сов. радио, 1975. 432 с.
6. Чайковский В. М. [и др.]. Метеорологический радиолокатор // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 2. С. 3–5.
7. Матюшов Н. В. Начало работы с микроконтроллерами STM8. М. : СОЛОН-Пресс, 2016. 320 с.

References

1. Flerov A.G., Timofeev V.G. *Dopplerovskie ustroystva i sistemy navigatsii = Doppler devices and navigation systems*. Moscow: Transport, 1987:191. (In Russ.)
2. Aksenov I.V., Chaykovskiy V.M. Frequency discriminator for autonomous aircraft navigation system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:170–172. (In Russ.)
3. Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Kutuzov V.M. [et al.]. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zaved. = Radio engineering systems : textbook for students. higher. studies. institution..* Moscow: Akademiya, 2008. (In Russ.)
4. Aksenov I.V. Frequency discriminator for radio navigation Doppler system on microcontroller. *Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki – 2020: sb. annotatsiy konkursnykh rabot 12-go Vseros. konkursa (23–27 noyabrya 2020) = Youth and the future of aviation and cosmonautics – 2020 : collection of abstracts of competitive works of the 12th All-Russian. competition (November 23–27, 2020)*. Moscow: MAI, 2020:228. (In Russ.)
5. Kolchinskiy V. E. [ed.]. *Avtonomnye dopplerovskie ustroystva i sistemy navigatsii letatel'nykh apparatov = Autonomous Doppler devices and aircraft navigation systems*. Moscow: Sov. radio, 1975:432. (In Russ.)
6. Chaykovskiy V.M. [et al.]. Meteorological radar. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;2:3–5. (In Russ.)
7. Matyushov N.V. *Nachalo raboty s mikrokontrollerami STM8 = Getting Started with STM8 Microcontrollers*. Moscow: SOLON-Press, 2016:320. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Илья Владимирович Аксенов**

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Илья V. Aksenov

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

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Victor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 16.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 23.03.2021

Принята к публикации/Accepted 24.03.2021

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В. В. Шерстнев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является обеспечение безопасности полета беспилотных воздушных судов в составе гетерогенной группы в зоне чрезвычайной ситуации, предназначенных для локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Предметом исследования являются предлагаемые зоны, или сферы безопасности, которые строятся в базовой системе координат, начало которой привязано к определенной точке зоны чрезвычайных ситуаций, вокруг каждого беспилотного воздушного судна или потенциально опасного объекта. Целью работы является разработка концепции применения (и рекомендаций по применению), в том числе построения вокруг каждого беспилотного воздушного судна и потенциально опасных объектов зон, или сфер безопасности, учета взаиморасположения данных зон, или сфер безопасности, пересечение которых в процессе полета беспилотного воздушного судна недопустимо, за счет чего достигается обеспечение защиты того или иного беспилотного воздушного судна от столкновения с препятствиями. *Материалы и методы.* Для описания процесса перехода от локальных систем координат, привязанных к конкретному беспилотному воздушному судну, в базовой системе координат используются матрицы однородного преобразования. Введено понятие сфер безопасности, а также адаптивных сфер безопасности, динамических радиусов адаптивных сфер безопасности. *Результаты.* Предложен подход к обеспечению защиты беспилотных воздушных судов, движущихся в составе гетерогенной группы в зоне чрезвычайной ситуации, от столкновений с препятствиями, в том числе друг с другом. Данный подход может использоваться при организации движения и взаимодействия объектов, действующих в составе многоагентных систем. *Выводы.* Методы, применяемые для перехода от локальных систем координат, привязанных к тому или иному беспилотному воздушному судну (БВС), к базовой системе координат, позволяют организовать движение гетерогенной группы БВС в зоне чрезвычайной ситуации. Разработанные концепция и рекомендации по построению вокруг каждого действующего в составе гетерогенной группы БВС и вокруг потенциально опасных объектов зоны чрезвычайной ситуации, зон или сфер безопасности, а также по учету взаиморасположения данных зон, или сфер безопасности, защищают каждое БВС от столкновения с препятствиями, а также повышают безопасность движения гетерогенной группы БВС в целом.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, гетерогенная группа, сфера безопасности, динамический радиус адаптивной сферы безопасности

Для цитирования: Шерстнев В. В. Обеспечение безопасности полета гетерогенной группы беспилотных воздушных судов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 110–118. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

ENSURING THE SAFETY OF A HETEROGENEOUS GROUP OF UNMANNED AIRCRAFT

V.V. Sherstnev

Penza State University, Penza, Russia
iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is to ensure the safety of the flight of unmanned aircraft as part of a heterogeneous group in the emergency zone, designed for the localization and elimination of emergency situations. The subject of the study is the proposed zones, or areas of security, which are built in a basic coordinate system, the beginning of which is tied to a certain point in the emergency zone, around each unmanned aircraft or potentially dangerous object. The purpose of the work is to develop a concept of application (and recommendations for use), including the construction of zones or security areas around each unmanned aircraft and potentially dangerous objects, taking into account the relative position of these zones or security areas, the intersection of which is unacceptable during the flight

of an unmanned aircraft, thereby ensuring the protection of an unmanned aircraft from collision with obstacles. *Materials and methods.* To describe the process of transition from local coordinate systems associated with a specific unmanned aircraft to the base coordinate system, homogeneous transformation matrices are used. The concept of security spheres, as well as adaptive security spheres, dynamic radii of adaptive security spheres is introduced. *Results.* An approach to ensuring the protection of unmanned aircraft moving as part of a heterogeneous group in an emergency zone from collisions with obstacles, including each other, is proposed. This approach can be used to organize the movement and interaction of objects operating as part of multi-agent systems. *Conclusions.* The methods used for the transition from local coordinate systems linked to a particular unmanned aircraft (UAV) to the basic coordinate system allow you to organize the movement of a heterogeneous group of UAVs in the emergency zone. The developed concept and recommendations for the construction of an emergency zone, zones, or security areas around each operating as part of a heterogeneous group of UAVs and around potentially dangerous objects, as well as for taking into account the mutual location of these zones, or security areas, protect each UAV from collisions with obstacles, and also increase the traffic safety of a heterogeneous group of UAVs as a whole.

Keywords: unmanned aircraft, heterogeneous group, security sphere, dynamic radius of adaptive security sphere

For citation: Sherstnev V.V. Ensuring the safety of a heterogeneous group of unmanned aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 110–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

Идея применения БВС при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1] является актуальной. Так, в работе [2] предлагается использовать гетерогенную группу БВС, выполняющую задачи по локализации, ликвидации последствий ЧС, в том числе поиску и спасению пострадавших. Использование такой робототехнической системы, представляющей собой рой БВС, ставит актуальным решение следующих задач:

- задача управления движением БВС посредством автопилота;
- задача обхода БВС препятствий в процессе движения, в том числе избегания столкновений с другими БВС.

Задача управления движением конкретного БВС может сводиться к определению его текущего местоположения, а именно: координат в пространстве и ориентации (при этом могут использоваться, например, спутниковые системы навигации, инерциальные системы навигации и т.п.), задания конечной точки движения, выбора оптимального маршрута движения [3].

Затем в процессе движения БВС решается вторая из вышеупомянутых задач – обход препятствий. Большинство современных БВС вертикальных взлета и посадки оснащаются системами избегания столкновений, принцип действия которых основан на применении различных сенсорных устройств – ультразвуковые датчики, лидары, видеокамеры и т.п. Такие системы в отношении статичных препятствий (таких как, например, дерево, стена) справляются успешно: управляющие воздействия передаются силовым установкам заблаговременно и БВС успевает сменить траекторию и скорость своего движения.

Но что касается применения БВС в составе гетерогенной группы в условиях ЧС, то задача избегания столкновений с препятствиями усложняется следующими особенностями. Во-первых, зона ЧС нередко характеризуется наличием препятствий, представляющих повышенную опасность для БВС: это могут быть источники возгорания, фонтанирующие источники утечки жидкостей под большим давлением; приближение БВС на расстояние даже нескольких метров к препятствиям такого рода может являться небезопасным.

Во-вторых, для каждого конкретного БВС в роли препятствий выступают и другие воздушные суда из состава его группы, а также какие-либо иные летательные аппараты, присутствующие в зоне ЧС. В этом случае системы избегания столкновений с препятствиями, которыми изначально оснащается БВС, могут не успеть сработать: летательные аппараты нередко двигаются на достаточно больших скоростях, зигзагообразно меняя траекторию своего движения, что может привести к их столкновению друг с другом. Более того, даже два летательных аппарата, зависших в воздухе, могут оказывать друг на друга воздействие: более массивное БВС воздушными потоками, создаваемыми своими силовыми установками, будет «сдувать» в сторону легкое воздушное судно (что в результате может привести последнего к столкновению с каким-либо препятствием).

В связи с этим предлагается использовать единый пункт координации и управления движением БВС в составе гетерогенной группы в зоне ЧС, который будет выполнять задачи

по отслеживанию местоположения, траектории, скорости движения всех БВС в так называемой «глобальной», или базовой, системе координат, за начало которой может браться как сам пункт координации и управления движением, расположенный, например, в пределах зоны ЧС, так и какая-то опорная точка, выбранная оператором данного пункта.

Для управления процессом движения какого-либо БВС посредством автопилота требуется также использование и двух локальных систем координат, начала которых привязаны к данному судну: локальная неподвижная система координат, посредством использования которой задается направление движения БВС к пункту назначения, а также локальная подвижная система координат, направления осей которой зависят от фактической ориентации БВС в пространстве. На рис. 1 изображен вариант задания базовой системы координат $OX_0Y_0Z_0$, локальной неподвижной системы координат $oxyz$, локальной подвижной системы координат $ox'y'z'$. В процессе движения осуществляется «нацеливание» БВС на определенные точки траектории посредством совмещения локальной подвижной системы координат с неподвижной путем задания необходимых углов крена, тангажа и рыскания (представляющих собой углы Эйлера).

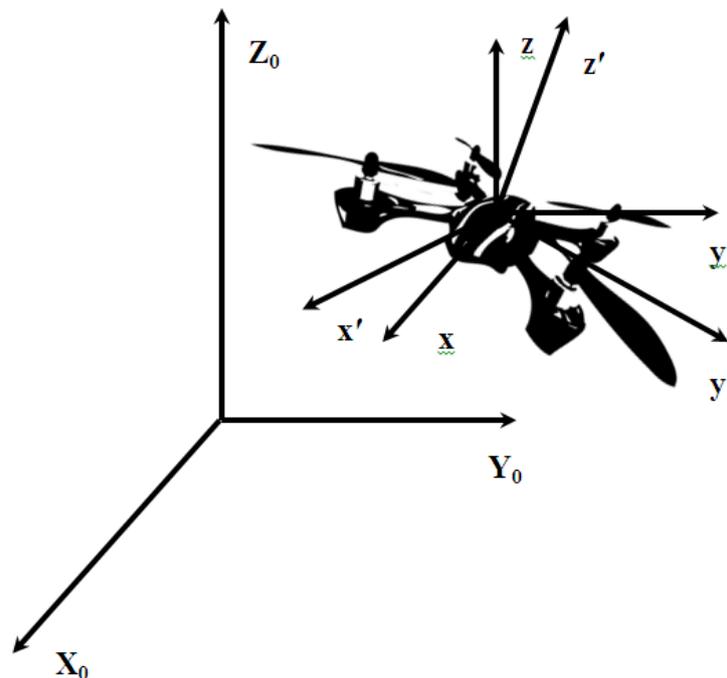


Рис. 1. Вариант задания систем координат

Переход от одной системы координат к другой может описываться через матрицы однородных преобразований [4, 5]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \lambda \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \mu \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – величины, характеризующие углы поворота конечной системы координат $Ox'y'z'$ относительно начальной системы координат $OXYZ$, а λ, μ, ν – величины, характеризующие смещение конечной системы координат вдоль осей Ox , Oy , Oz начальной системы координат соответственно.

Также (1) может описываться системой уравнений

$$x' = \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \lambda, \quad y' = \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 z + \mu, \quad z' = \gamma_1 x + \gamma_2 y + \gamma_3 z + \nu. \quad (2)$$

Алгоритм движения БВС выглядит следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм движения БВС

Шаг 1. Задание пункта назначения оператором.

Шаг 2. Определение координат пункта назначения в базовой системе координат.

Шаг 3. Задание локальных подвижной и неподвижной систем координат в базовой системе координат.

Шаг 4. Построение маршрута движения БВС к пункту назначения.

Шаг 5. Задание ориентации, или нацеливание БВС, т.е. придание необходимой ориентации локальным системам координат, при этом ориентация локальной неподвижной системы координат фиксируется и не изменяется в процессе следования БВС к пункту назначения (ориентация локальной подвижной системы координат перед началом выдвигания БВС к пункту назначения будет совпадать с ориентацией локальной неподвижной системы координат).

Шаг 6. Выдвигание БВС к пункту назначения.

Шаг 7. Постоянное отслеживание параметров движения путем вычисления скорости движения БВС и углов Эйлера, причем последние представляют собой разницу между ориентациями локальными системами координат БВС.

Шаг 8. Корректировка движения БВС в случае необходимости посредством выдачи управляющих воздействий силовым установкам БВС, предназначенных для контроля соответствия направления движения БВС заданной траектории.

Шаг 9. Постоянная передача информации о характеристиках движения автоматизированному рабочему месту оператора БВС.

Шаг 10. Прибытие в пункт назначения.

Шаги 7–9 данного алгоритма циклично повторяются вплоть до прибытия БВС в пункт назначения.

Определение скорости движения БВС может осуществляться как за счет системы спутниковой навигации, так и за счет установленных на БВС датчиков определения скорости (акселерометров). Определение углов Эйлера в процессе движения БВС может осуществляться за счет датчиков-гироскопов, установленных на БВС.

Так или иначе, если препятствия должны обгибаться на относительно большом расстоянии, целесообразным является контроль полета всех БВС единым управляющим центром, задающим безопасные для них зоны, или «сферы безопасности» (рис. 3), каждая из которых представляет собой геометрическое место точек, равноудаленных от центра объекта, вокруг которого она построена. Так, например, сферы безопасности, заданные индивидуально для каждого БВС, не должны друг с другом соприкасаться и тем более пересекаться. Такие же сферы безопасности можно строить и вокруг поражающих источников (ПИ) ЧС в зависимости от их характера: так, например, сфера безопасности какого-либо конкретного БВС не должна соприкасаться и пересекаться со сферой безопасности, построенной вокруг источника огня.

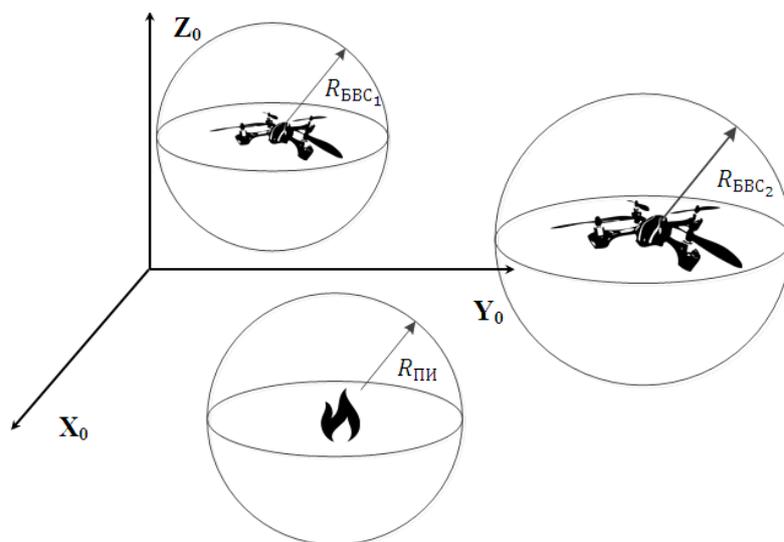


Рис. 3. Построение сфер безопасности

В зависимости от взаимного расположения двух БВС возможно выполнение одного из следующих условий:

1. Сферы безопасности двух БВС пересекаются, требуется их разместить на безопасное расстояние (рис. 4):

$$R_{\phi} < R_1 + R_2, \quad (3)$$

где R_{ϕ} – фактическое расстояние между БВС, определяемое с помощью систем навигации; R_1 – радиус сферы безопасности первого БВС; R_2 – радиус сферы безопасности второго БВС.

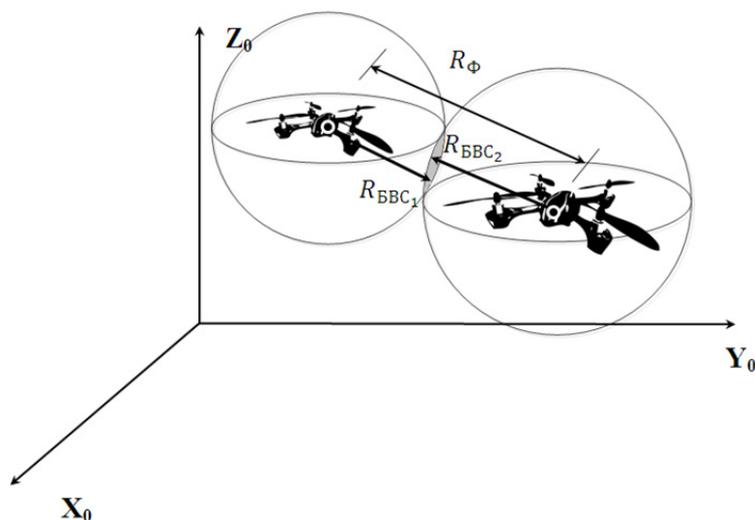


Рис. 4. Частный случай пересечения сфер безопасности

2. Сферы безопасности двух БВС пересекаются, т.е. имеют одну общую точку; аналогично предыдущей ситуации, требуется их размещение на безопасное расстояние (рис. 5):

$$R_{\Phi} = R_1 + R_2. \quad (4)$$

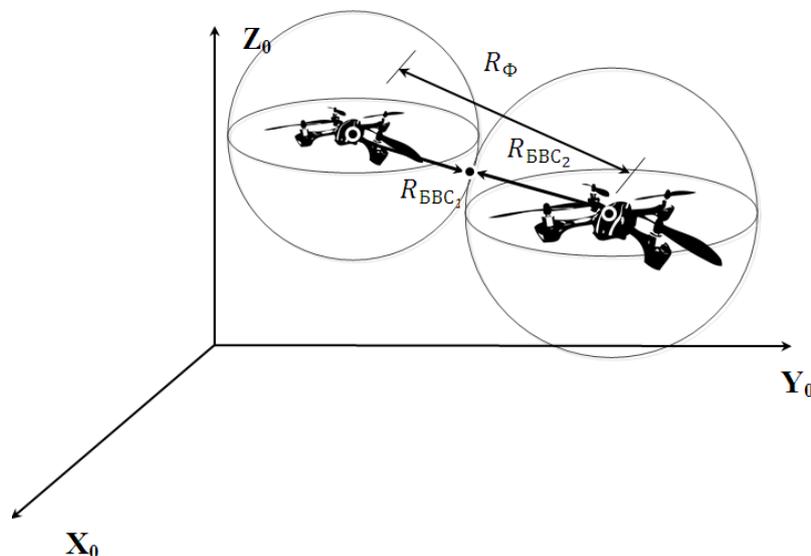


Рис. 5. Частный случай прикосновения сфер безопасности

3. БВС находятся на безопасном расстоянии, их сферы безопасности не пересекаются (рис. 6):

$$R_{\Phi} > R_1 + R_2. \quad (5)$$

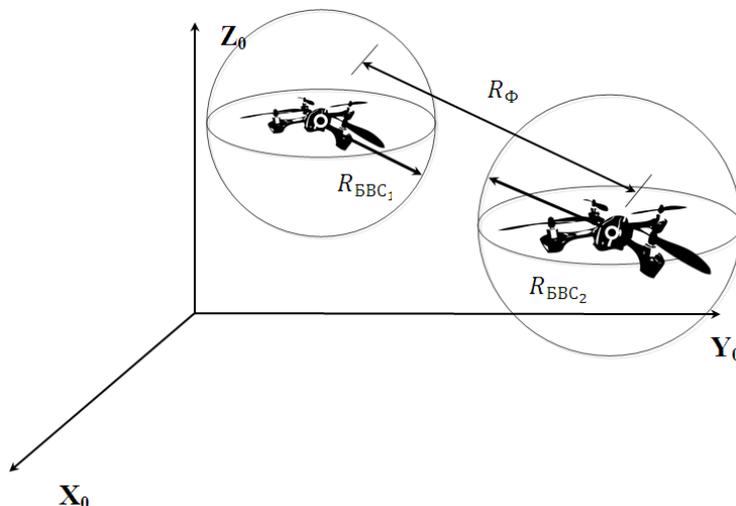


Рис. 6. Частный случай неприкосновения сфер безопасности

Подход к решению данной задачи, заключающийся в обработке информации о всех сферах безопасности единым управляющим центром и навигации им БВС, кроме того, позволяет рассчитывать траекторию движения каждого БВС «априорно», т.е. прокладывать их маршруты, заранее проверяя их на возможные случаи наличия точек касания сфер безопасности.

Кроме того, в целях «экономии» пространства целесообразно использовать адаптивные сферы безопасности с динамическим радиусом, т.е. изменяющимся в зависимости от условий, поскольку это позволит наиболее эффективно использовать рабочее пространство БВС. Так, если БВС неподвижно, то радиус его адаптивной сферы безопасности минимален, он обуславливает лишь его безопасность в случае подлета других БВС; если же БВС, например, дви-

жется к цели в условиях ограниченной видимости (дым), радиус его сферы безопасности должен быть увеличен, причем чем выше скорость его движения, тем больше путь его остановки в случае возникновения необходимости резкой остановки и соответственно, тем больше должен быть его радиус безопасности.

В качестве иллюстрации можно рассмотреть график зависимости величины пути остановки БВС от начальной скорости его движения непосредственно перед началом торможения. Предполагаются идеальные условия, когда движение БВС является равнозамедленным, а его ускорение (со знаком «минус») составляет -30 м/с^2 (рис. 7).

Величина пути
остановки, м

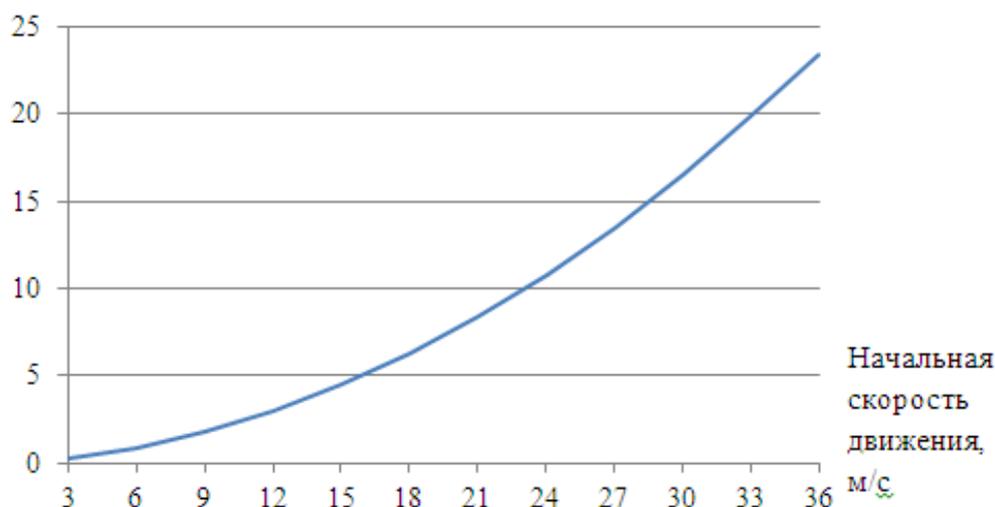


Рис. 7. График зависимости величины пути остановки БВС от начальной скорости его движения (вариант)

Так, согласно данному примеру динамический радиус адаптивной сферы безопасности при скорости движения БВС непосредственно перед началом его торможения, равной 24 м/с, должен превышать 10,8 м.

Предлагается производить расчет динамических радиусов безопасности БВС в зависимости от следующих факторов:

1. Скорость движения БВС: чем быстрее движется БВС, тем больше радиус безопасности (на высокой скорости БВС труднее остановиться). Кроме того, у каждого БВС свои масса (в связи с чем целесообразно градировать БВС, входящие в состав гетерогенной группы [2], по их массе: БВС поискового назначения – сверхлегкий, координирующего – легкий, медицинского и экологического назначения – средние, а БВС эвакуационной назначения – тяжелый), характеристики силовых установок, аэродинамика и т.д.

2. Взаимные размеры двух БВС: тяжелый и легкий БВС должны находиться на большем расстоянии друг от друга, чем, например, два тяжелых (массивные БВС могут «сдвигать» легкие БВС).

3. Характер препятствий, а именно их физико-химические свойства: вокруг таких препятствий, как например столб, не требуется строить отдельный радиус безопасности; вокруг источников открытого пламени или например источника утечки воды под большим давлением, наоборот, требуется.

4. Скорость и направление ветра: данные характеристики могут оказывать существенное влияние на скорость движения БВС.

5. Условия видимости: в условиях, например, большой задымленности, недостаточной освещенности снижается чувствительность сенсоров БВС, отвечающих за обнаружение препятствий (например, камера, ультразвуковой датчик); особенно опасна ситуация внезапного появления препятствий на пути движения БВС.

Таким образом, для учета вышеупомянутых факторов и расчета радиуса безопасности каждого отдельно взятого БВС предлагается использовать формулу

$$R = v \times x \times f \times w \times d \times c \times R_0, \quad (6)$$

где R – вычисляемый адаптивный радиус сферы безопасности; R_0 – радиус сферы безопасности неподвижного БВС; v – коэффициент, зависящий от скорости движения БВС; x – коэффициент, зависящий от расстояния между двумя соседними БВС; f – коэффициент, зависящий от характера препятствия (физико-химических свойств препятствия) рядом с БВС; w – коэффициент, зависящий от скорости ветра; d – коэффициент, зависящий от угла между направлением движения БВС и направлением ветра; c – коэффициент, зависящий от условий видимости.

Расчет вышеупомянутых коэффициентов зависит от характеристик конкретного БВС; порядок расчета является перспективной задачей, планируемой к решению.

Предполагается также возможным увеличивать сферу безопасности не равномерно, а лишь по направлению движения БВС (рис. 8), таким образом, БВС получает вокруг себя «эллипс безопасности».

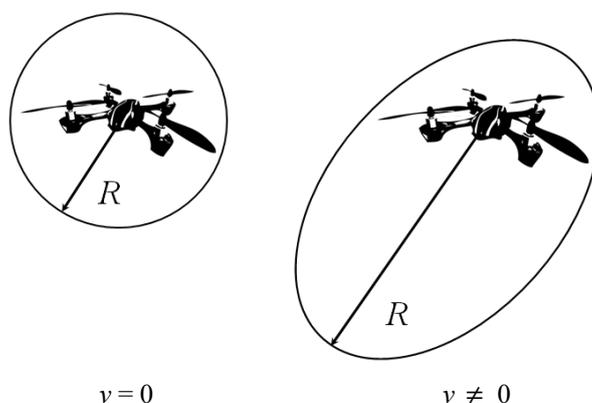


Рис. 8. Увеличение динамического радиуса адаптивной сферы безопасности в зависимости от скорости движения БВС

Безусловно, это усложнит расчеты, но позволит более эффективно использовать пространство вокруг данного воздушного судна.

Предложенный подход позволяет не только повысить защиту от столкновений с препятствиями БВС, движущихся в составе гетерогенной группы в зоне ЧС, но и может использоваться для обеспечения безопасности движения объектов в других подобных мультиагентных системах.

Список литературы

1. Шерстнев В. В., Бодин О. Н. Особенности использования беспилотных воздушных судов при проведении поисково-спасательных работ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 183–185.
2. Патент 2694528 Российская Федерация. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Рахматуллин Ф. К., Герасимов А. И. ; заявитель и правообладатель ООО «Кардиовид», г. Пенза. № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
3. Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Петухов В. И. Выбор траектории полета беспилотных воздушных судов при мониторинге окружающей среды // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2019» (г. Пенза, 28–30 октября 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 143–146.
4. Матрицы поворота, углы Эйлера и кватернионы (Rotation matrices, Euler angles and quaternions). URL: https://api-2d3d-cad.com/euler_angles_quaternions/ (дата обращения: 28.05.2021).
5. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 108 с.

References

1. Sherstnev V.V., Bodin O.N. Features of the use of unmanned aircraft during search and rescue operations. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:183–185. (In Russ.)
2. Patent 2694528 Russian Federation. Method of search and rescue operations. Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E., Rakhmatullof F.K., Gerasimov A.I.; the applicant and the copyright holder of LLC "Cardiovid", Penza. No. 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. No. 20. (In Russ.)
3. Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Petukhov V. I. Choosing the flight path of unmanned aircraft during environmental monitoring. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2019» (g. Penza, 28–30 oktyabrya 2019 g.) = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of the International Scientific and Technical conf. "Shlyandinsky readings - 2019" (Penza, October 28–30, 2019)*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:143–146. (In Russ.)
4. *Matritsy povorota, ugly Eylera i kvaterniony = Rotation matrices, Euler angles and quaternions*. (In Russ.). Available at: https://api-2d3d-cad.com/euler_angles_quaternions/ (accessed 28.05.2021).
5. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami = Methods of controlling robotic applications*. Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2016:108. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Владислав Вадимович Шерстнев**

соискатель,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav V. Sherstnev

Applicant,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**The authors declare no conflicts of interests.****Поступила в редакцию/Received 22.06.2021****Поступила после рецензирования/Revised 29.06.2021****Принята к публикации/Accepted 30.06.2021**