

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Дмитриенко А. Г., Пискаев К. Ю., Гудков К. В., Тюрин М. В.

МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭД-АЦП

5

Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М.

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МДП-СТРУКТУРЫ

17

Избасов А. Г., Головин П. Д., Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кочегаров И. И.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

25

Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е.,

Нелюцков М. А., Александров В. С., Журина А. Е.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР И ПРИБОРОВ

32

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Печерская Е. А., Карпанин О. В., Тузова Д. Е.,

Нелюцков М. А., Данилов А. А., Артамонов Д. В.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

41

Максов А. А., Семенов А. Д., Печерская Е. А., Голубков П. Е., Артамонов Д. В.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

47

Шафигина А. Э., Сойко А. И.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ
НАДЕЖНОСТИ РАСХОДОМЕРОВ И СЧЕТЧИКОВ ЖИДКОСТИ

54

Волков В. С., Базыкин С. Н., Трофимов А. А.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОГО ИЗГИБА 64

Ватутин М. А., Кошель И. Н., Бурмистров В. В., Петров Н. А.
ОБОСНОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ
ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АКСЕЛЕРОМЕТРА 71

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Гасанова В. А., Пушкарева А. В.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АРИТМИИ 81

Ксенофонтов М. А., Муйземнек А. Ю.
СОПОСТАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
УЗЛОВ ПОДВИЖНОСТИ ЭНДОПРОТЕЗА
ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ 88

Целикин К. Д., Крамм М. Н., Бодин А. Ю., Бодин О. Н.
ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕДАЧА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ 94

Богданов Е. В.
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО АЛГОРИТМА ПОЛУЧЕНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ МРТ ГОЛОВНОГО МОЗГА 111

Тычкова А. Н., Алимуратов А. К.
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПОВЫШЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕАБИЛИТАЦИИ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВЫХ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ 119

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 3, 2024

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Dmitrienko A.G., Piskaev K.Yu., Gudkov K.V., Tyurin M.V.*
METHODS FOR IMPROVING METROLOGICAL PARAMETERS OF $\Sigma\Delta$ -ADC 5
- Tashlintsev D.A., Tchaikovsky V.M.*
MEASUREMENT OF CHARGE INSTABILITY OF TIR STRUCTURE 17
- Izbasov A.G., Golovin P.D., Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I.*
ALGORITHMIC SUPPORT OF A MULTI-AGENT INFORMATION
AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR A GROUP
OF UNMANNED AERIAL VEHICLES 25
- Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E.,
Nelyutskov M.A., Aleksandrov V.S., Zhurina A.E.*
RESEARCH OF VOLTAMPER CHARACTERISTICS
OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND DEVICES 32

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

- Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Tuzova D.E.,
Nelyutskov M.A., Danilov A.A., Artamonov D.V.*
AUTOMATED INFORMATION-MEASURING SYSTEM
FOR MEASUREMENT OF VOLTAGE CHARACTERISTICS
OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES 41
- Maksov A.A., Semenov A.D., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Artamonov D.V.*
STRUCTURE OF A DECISION SUPPORT SYSTEM
IN THE PROCESS OF PRODUCING MICRO-ARC OXIDE COATINGS 47
- Shafigina A.E., Soyko A.I.*
CURRENT PROBLEMS OF ASSESSING METROLOGICAL
RELIABILITY OF FLOW METERS AND LIQUID METERS 54

Volkov V.S., Bazykin S.N., Trofimov A.A.

A METHOD FOR CALCULATING THE THICKNESS OF A RECTANGULAR MEMBRANE FOR A SEMICONDUCTOR PRESSURE PIEZORESISTIVE TRANSDUCER TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR BENDING

64

Vatutin M.A., Koshel I.N., Burmistrov V.V., Petrov N.A.

JUSTIFICATION OF CIRCUIT DESIGN SUGGESTIONS FOR IMPROVING ACCURACY PARAMETERS OF THE INTEGRATING ACCELEROMETER

71

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Gasanova V.A., Pushkareva A.V.

AUTOMATED PERSONALIZED ARRHYTHMIA MONITORING SYSTEM

81

Ksenofontov M.A., Muyzemnek A.Yu.

COMPARISON OF THE STRENGTH OF THE DESIGN OF THE MOBILITY UNIT OF THE HIP JOINT ENDOPROSTHESIS WITH MONOLITHIC AND NON-MONOLITHIC USB CARBOSITALL

88

Tselikin K.D., Kramm M.N., Bodin A.Yu., Bodin O.N.

NOISE-RESISTANT TRANSMISSION OF DIGITAL INFORMATION BASED ON CONVOLUTIONAL CODES

94

Bogdanov E.V.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE ALGORITHM FOR OBTAINING MRI IMAGES OF THE BRAIN

111

Tychkova A.N., Alimuradov A.K.

METHODOLOGICAL APPROACH TO IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE REHABILITATION PROCESS BASED ON THE ANALYSIS OF STREAMING SPEECH DATA

119

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 621.3.087.92

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-1

МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК $\Sigma\Delta$ -АЦП

А. Г. Дмитриенко¹, К. Ю. Пискаев², К. В. Гудков³, М. В. Тюрин⁴

^{1,4} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

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

¹ info@niifi.ru, ² piskaevk@gmail.com, ³ gudkovk.pgta@gmail.com, ⁴ penza045@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Аналого-цифровой/цифроаналоговый преобразователи (АЦП/ЦАП) являются одним из основных элементов современных технических систем и в общем случае большинства цифровых устройств, взаимодействующих с окружающей средой. Российская радиоэлектронная промышленность в настоящее время не может в полном объеме удовлетворить существующие требования ни по номенклатуре выпускаемых изделий, ни по метрологическим и технико-эксплуатационным свойствам преобразователей данных. *Материалы и методы.* В области АЦП интегрирующего типа высокие метрологические характеристики передовых микросхем сигма-дельта АЦП зачастую достигаются реализацией сложных схмотехнических решений, обеспечивающих минимизацию методической и инструментальной погрешностей преобразования. *Результаты и выводы.* Рассматриваются методы совершенствования сигма-дельта АЦП алгоритмическим путем. В частности, показаны алгоритмы формирования развертывающей функции для сигма-дельта модуляторов на основе непрерывных интеграторов, обеспечивающие повышение коэффициента передискретизации и уменьшение глубины модуляции среднего значения напряжения на выходе интегрирующего звена.

Ключевые слова: сигма-дельта АЦП, моделирование сигма-дельта АЦП, методы совершенствования характеристик сигма-дельта АЦП, элементы информационно-измерительных систем, погрешность преобразования АЦП

Для цитирования: Дмитриенко А. Г., Пискаев К. Ю., Гудков К. В., Тюрин М. В. Методы совершенствования метрологических характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 5–16. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-1

METHODS FOR IMPROVING METROLOGICAL PARAMETERS OF $\Sigma\Delta$ -ADC

A.G. Dmitrienko¹, K.Yu. Piskaev², K.V. Gudkov³, M.V. Tyurin⁴

^{1,4} Scientific-research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

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

¹ info@niifi.ru, ² piskaevk@gmail.com, ³ gudkovk.pgta@gmail.com, ⁴ penza045@niifi.ru

Abstract. *Background.* ADC / DAC are one of the main elements of modern technical systems and, in general, most digital devices that interact with the environment. The Russian radio-electronic industry today cannot fully satisfy the existing requirements either in terms of the range of manufactured products, or in terms of the metrological and technical-operational properties of data converters. *Materials and methods.* In the field of integrating type ADCs, high metrological characteristics of advanced sigma-delta ADC microcircuits are often achieved by the implementation of complex circuit

solutions that ensure the minimization of methodological and instrumental conversion errors. *Results and conclusions.* The paper considers methods for improving the sigma-delta ADC in an algorithmic way. In particular, algorithms for generating a sweeping function for sigma-delta modulators based on continuous integrators are shown, which provide an increase in the oversampling factor and a decrease in the depth of modulation of the average voltage value at the output of the integrator.

Keywords: sigma-delta ADC, sigma-delta ADC modeling, methods for improving the characteristics of sigma-delta ADC, elements of information-measuring systems, ADC conversion error

For citation: Dmitrienko A.G., Piskaev K.Yu., Gudkov K.V., Tyurin M.V. Methods for improving metrological parameters of $\Sigma\Delta$ -ADC. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-1

Введение

Развитие отечественной микроэлектроники должно носить комплексный характер. Признавая значимость и приоритет микропроцессоров и микроконтроллеров как основы современных вычислительных устройств, отметим, что для всех информационных систем и цифровых устройств, взаимодействующих с реальным миром, ключевыми элементами также являются аналого-цифровой/цифроаналоговый преобразователи сигналов (АЦП/ЦАП). При этом номенклатура выпускаемых изделий по метрологическим и технико-эксплуатационным характеристикам, возможно, должна быть даже более разнообразной, чем в случае микроконтроллеров, что объясняется многообразием требований и задач со стороны различных предметных областей. Например, мировые лидеры имеют следующие показатели: *Analog Devices* в перечне своей продукции на 2022 г. предлагает 692 микросхемы АЦП; *Texas Instruments* – 993; *Maxim Integrated* – 401 соответственно. Успехи отечественной промышленности в этом направлении на сегодняшний день, к сожалению, весьма скромны.

Методы совершенствования метрологических характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП

Широкий диапазон характеристик выпускаемых микросхем АЦП: от 32 бит *ADS1285* по разрешению и до 10,4 ГГц *ADS12DJ5200-EP* по частоте преобразования, обеспечивается реализацией различных «архитектур», а в общем случае методов и способов преобразования непрерывных сигналов (напряжения/тока) в дискретно-квантованный формат цифровых кодов.

Как отмечают многие авторы, работающие в данной предметной области, интегрирующие преобразователи являются весьма перспективными в рамках задач разработки отечественных средств измерения [1–5]. Это обусловлено простотой конструкции данных устройств – в простейшем исполнении интегрирующий АЦП состоит из входного буферного усилителя, интегратора, устройства сравнения (тактируемого компаратора), коммутируемого источника опорного напряжения (одно- или двухполярного) и набора логических элементов двоично-десятичного счета импульсов для формирования результата преобразования.

Проиллюстрируем возможности такой структуры для варианта реализации метода интегрирующего преобразования в наиболее распространенных сегодня $\Sigma\Delta$ -АЦП с помощью графика, представленного на рис. 1.

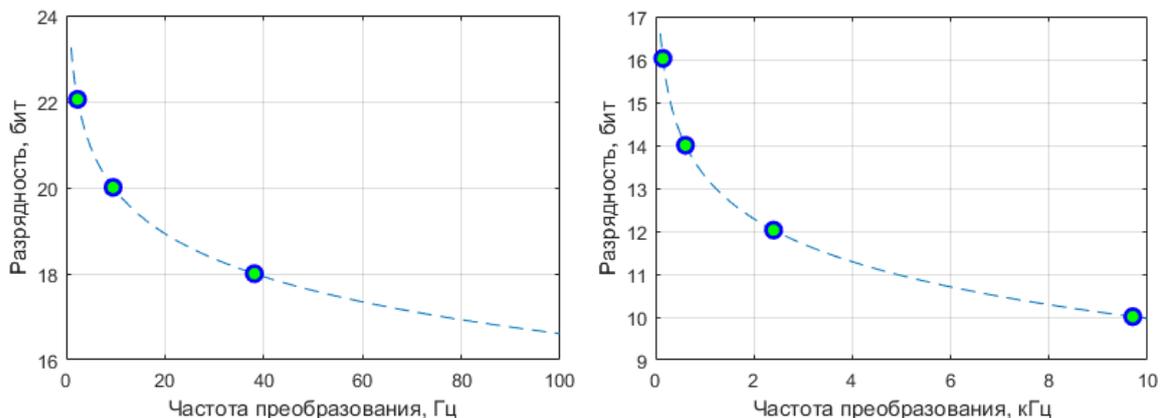


Рис. 1. Графики зависимости разрешающей способности от быстродействия для базовой структуры $\Sigma\Delta$ -АЦП

Разрешающая способность рассчитывалась по известному выражению $\Delta U = 2U_0/N$, где U_0 – значение опорного напряжения, N – длительность интервала преобразования, выраженная в количестве тактов синхронизации модулятора T_0 . Значение U_0 принято равным 10 В, частота синхронизации модулятора равной 10 МГц.

Таким образом, график иллюстрирует параметры АЦП, имеющего входной диапазон от минус 10 до 10 В, для интервала частот преобразования (частоты дискретизации входного сигнала) от 1 Гц до 10 кГц. Точками на графиках выделены значения из фиксированного ряда разрядностей, указываемых в качестве метрологического параметра микросхемы АЦП, при этом график зависимости отражает эффективную, а не номинальную разрядность. Представленная зависимость разделена условно на две области, соответствующие АЦП общего назначения (справа) и прецизионные АЦП (слева). Значение коэффициента передискретизации $\Sigma\Delta$ -АЦП из графика может быть найдено как f_0/f_d , где f_0 – частота синхронизации модулятора (10 МГц); f_d – частота преобразования (дискретизации) АЦП на графике. Очевидно, что такие параметры могут служить решением широкого круга измерительных задач, при этом рассматриваемые АЦП формируют результат преобразования в виде интегрального значения входной величины за интервал преобразования и не имеют пропусков информации [4–6].

Приведенная зависимость не учитывает характеристики элементной базы, т.е. инструментальную составляющую погрешности преобразования, и отражает только теоретические возможности метода интегрирующего преобразования на основе $\Sigma\Delta$ -модуляции в базовой конфигурации. С другой стороны, в данной предметной области известен широкий набор алгоритмических и структурных способов, как для минимизации инструментальной составляющей погрешности, так и существенного улучшения зависимости разрешающей способности от быстродействия.

Синтез интегрирующего преобразователя представляет собой поиск оптимального решения для удовлетворения требуемых метрологических характеристик разрабатываемого устройства в рамках возможностей доступного технологического процесса изготовления, выражающихся через характеристики элементной базы, и выше указанных алгоритмических и структурных способов, как средства достижения данного оптимума. Для отечественных разработчиков, в значительной мере ограниченных на сегодня в доступных средствах технологического характера (номенклатуре и свойствах элементной базы и главное возможности использования устройств высокой степени интеграции), предпочтительными являются алгоритмические методы совершенствования, не требующие существенного структурного усложнения конструкции преобразователя.

В табл. 1 приведен ряд методов улучшения метрологических характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП. Известные методы, перечисленные во втором столбце, являются «основой» современной теории $\Sigma\Delta$ -преобразователей и применяются в большинстве современных интегральных микросхем, реализующих данную архитектуру.

Таблица 1

Известные и предлагаемые методы совершенствования метрологических характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП

Решаемая проблема	Известный метод	Предлагаемый метод
Повышение коэффициента передискретизации	Переход на непрерывно-дискретные интеграторы	Раздельная синхронизация аналоговой и цифровой частей $\Sigma\Delta$ модулятора
Подавление помех, увеличение SNR	Повышение порядка модулятора	Реализация весового интегрирования
Уменьшение погрешности от краевых эффектов	Применение цифровых фильтров высоких порядков для формирования результата	Нахождение результата преобразования за конечное число частных циклов, т.е. адаптивная обработка выходных кодов $\Sigma\Delta$ -модулятора

Для читателей, не являющихся специалистами в данной области, проиллюстрируем второй и третий методы небольшими примерами. В работе [3] авторами приведена обобщенная структурная схема современного $\Sigma\Delta$ -АЦП (рис. 2), в которой показано, что модулятор строится из каскада интегрирующих звеньев.

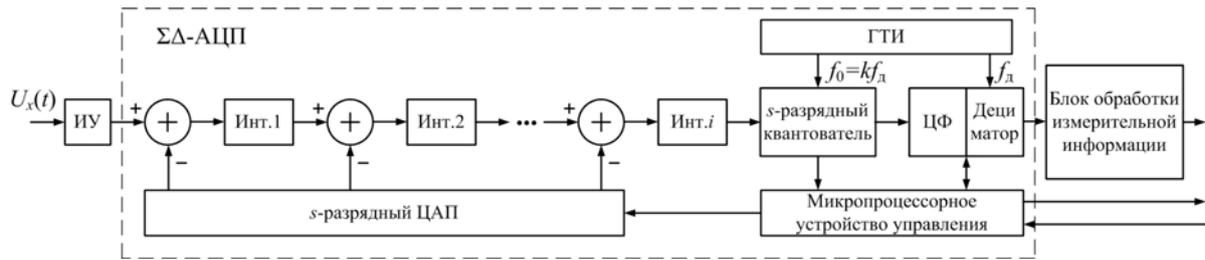


Рис. 2. Структура информационно-измерительной системы на основе $\Sigma\Delta$ -АЦП:
 ИУ – измерительный усилитель; Инт. – интегратор; ГТИ – генератор тактовых импульсов;
 ЦФ – цифровой фильтр; f_0 – частота синхронизации квантователя;
 f_d – частота дискретизации; k – коэффициент передискретизации

В теории $\Sigma\Delta$ -преобразования модуляторы, имеющие один интегратор, называются модуляторами первого порядка, два – второго и т.д. Так как модулятор фактически является аналоговым фильтром, повышение его порядка обеспечивает лучшую устойчивость к внешним шумам и соответствующий рост показателя SNR АЦП. Сложность проектирования и реализации активных аналоговых фильтров высоких порядков (более третьего) также хорошо известна. Производители $\Sigma\Delta$ -АЦП для обеспечения стабильности используют так называемую многокаскадную структуру, однако ее реализация также требует высокотехнологичного процесса производства для согласования характеристик элементов схемы.

Эффект от применения цифровых фильтров (ЦФ) высоких порядков проиллюстрируем рис. 3, на котором показаны графики изменения погрешности квантования на выходе моделей $\Sigma\Delta$ -модулятора первого порядка с ЦФ без децимации данных второго, третьего и четвертого порядков соответственно. Значения получены для $U_0 = 9$ В, $U_x = 1,928179$ В.

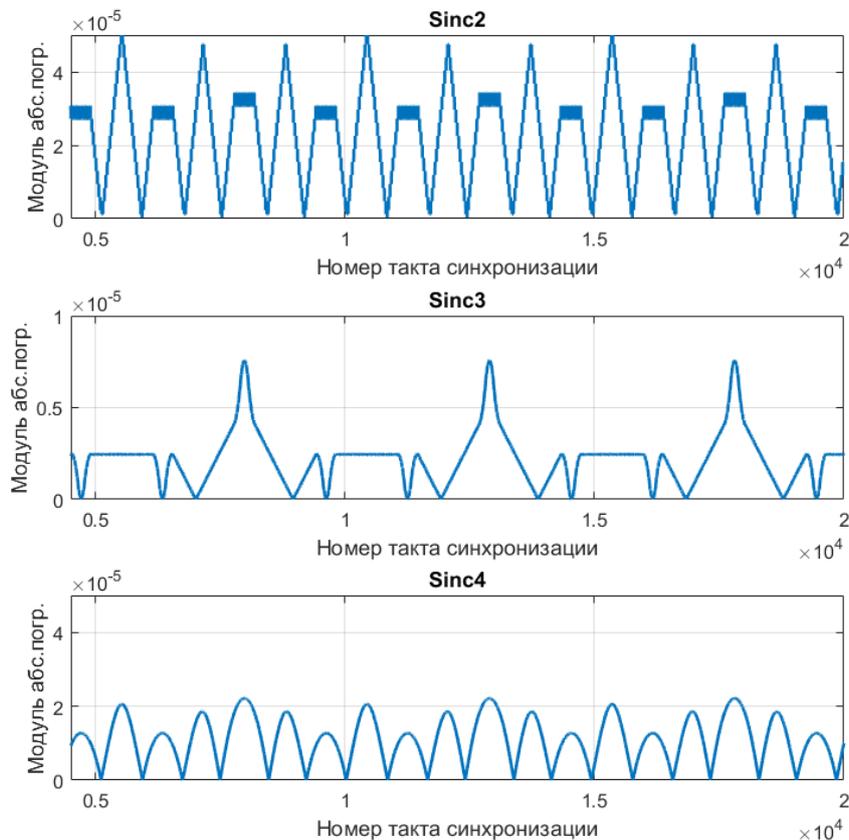


Рис. 3. Графики изменения погрешности квантования для ЦФ $sinc2$, $sinc3$ и $sinc4$

Из приведенных примеров видно, что рассмотренные методы основаны на усложнении структуры в первом случае аналоговой, а во втором – цифровой частей преобразователя. Реализация весового интегрирования, предлагаемая в качестве альтернативы, требует наличия входного усилителя с программируемым коэффициентом усиления и незначительного в сравнении

с увеличением порядка усложнения ЦФ, который должен осуществлять вычисление результата преобразования с учетом весовых коэффициентов. При этом входной буферный усилитель является обязательным элементом современных интегральных микросхем АЦП и служит для согласования с датчиковой аппаратурой.

При использовании ступенчатых весовых функций (ВФ) с целочисленными коэффициентами, как правило, количество этих коэффициентов не превышает 10, при этом уже ВФ «1 3 3 1» обеспечивает подавление внешней периодической составляющей до уровня 110 дБ в интервале 5 % от первого нуля АЧХ, а для ее реализации достаточно двух усилителей с фиксированными коэффициентами усиления. Необходимо отметить, что реализация ВФ, особенно в прецизионной измерительной технике, сопряжена с большим количеством практических трудностей и ограничений [7], однако в рамках задачи проектирования интегрирующих АЦП, отличающихся минимальным элементным составом и простотой структурной реализации, данный метод будем считать одной из основных альтернатив повышению порядка модулятора.

Методы [2, 8, 9] формирования результатов преобразования, обеспечивающие минимизацию составляющей методической погрешности квантования в $\Sigma\Delta$ -АЦП, обусловленной влиянием краевых эффектов, основаны на изменении длительности промежуточных интервалов преобразования. Упрощенно говоря, вместо многократного усреднения выборки данных фиксированной длины, поступающих с выхода $\Sigma\Delta$ -модулятора, которое реализуют с помощью ЦФ *sinc*-вида (как правило третьего и четвертого порядка), предлагаемые способы выполняют однократное усреднение промежуточных выборок, на которые разбиваются исходные данные и затем формируют итоговый результат преобразования суммированием этих промежуточных результатов с дополнительными коэффициентами пересчета.

Способы формирования развертывающей функции при раздельной синхронизации аналоговой и цифровой частей $\Sigma\Delta$ -модулятора

Зависимость, приведенная на рис. 1, показывает, что повышение коэффициента передискретизации обеспечивает пропорциональное повышение разрешающей способности $\Sigma\Delta$ -АЦП при том же быстродействии. Поэтому в современных микросхемах $\Sigma\Delta$ -АЦП частоту передискретизации доводят до максимума, определяемого возможностями элементной базы. Известным техническим решением в данном направлении является переход на непрерывно-дискретные интеграторы, которые реализуются по схеме на переключаемых конденсаторах и имеют большее быстродействие, как минимум на десятичный порядок, в сравнении со схемами на непрерывных интеграторах [4–6].

Недостатки такого решения проанализированы в работе [10], и в качестве альтернативы авторами предложен способ $\Sigma\Delta$ -передискретизации [11], позволяющий при реализации $\Sigma\Delta$ -АЦП на непрерывных интеграторах достичь быстродействия $\Sigma\Delta$ -АЦП, использующих интеграторы на переключаемых конденсаторах. Способ отличается использованием раздельной синхронизации аналоговой и цифровой частей $\Sigma\Delta$ -модулятора.

Описание алгоритмов работы $\Sigma\Delta$ -модуляторов будем представлять с помощью аналоговых развертывающих функций (АРФ) – изменения напряжения на выходе интегратора во временной области, как это принято в отечественной научной школе интегрирующих преобразователей [12]. Временная диаграмма работы $\Sigma\Delta$ -АЦП с модулятором первого порядка показана на рис. 4.

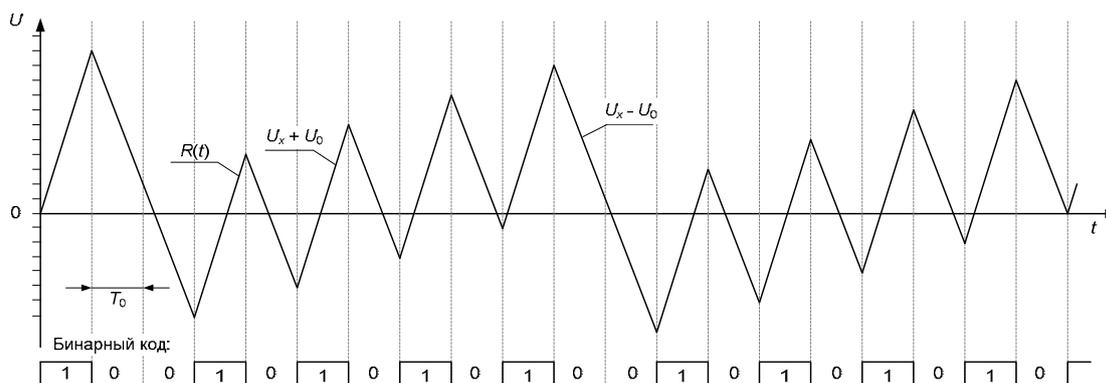


Рис. 4. Вид АРФ $\Sigma\Delta$ -АЦП с модулятором первого порядка

Подробное описание алгоритма формирования развертывающей функции и принципов работы модулятора представлено во многих работах, например [4–6, 10], поэтому перейдем к описанию рассматриваемого алгоритма $\Sigma\Delta$ -передискретизации (рис. 5).

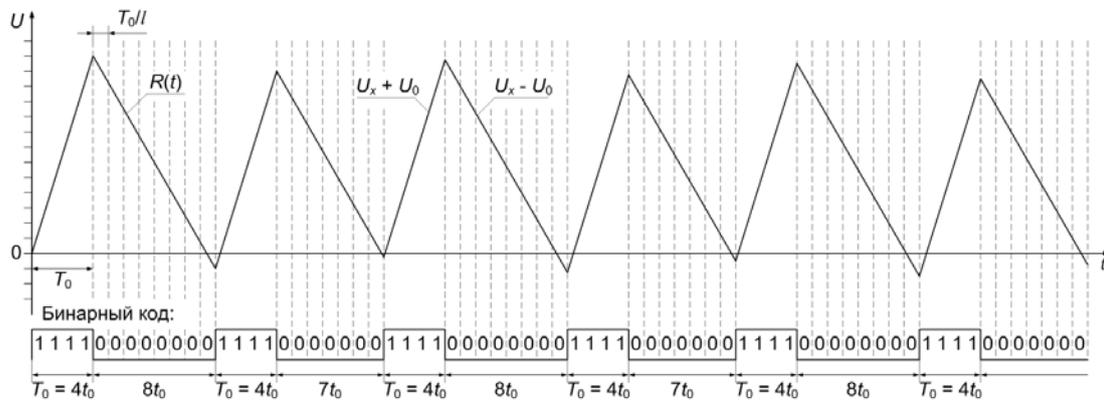


Рис. 5. Вид АРФ $\Sigma\Delta$ -АЦП с исследуемым алгоритмом передискретизации ($U_x = 3,5$ В; $U_0 = 10$ В; $l = 4$)

В данном алгоритме $R(t)$ формируется следующим образом: подключение (+)/(-) U_0 синхронизируется T_0 , при этом вводятся дополнительные такты $t_0 = T_0/l$, где $l = 2, 3, \dots$ – целые числа, которые используются для управления синхронизацией (-)/(+) U_0 . Быстродействие устройства сравнения – компаратора – как минимум на один десятичный порядок превышает быстродействие интегратора на ОУ, что позволяет реализовать раздельное тактирование этих устройств в схеме модулятора.

Обозначим через T_Σ – интервал интегрирования суммы $U_x + U_0$, а через T_Δ – интервал интегрирования разности $U_x - U_0$. Интервал T_Σ в АРФ, приведенной на рис. 5, формируется так же, как и в АРФ известного $\Sigma\Delta$ -модулятора (рис. 4), т.е. $T_\Sigma = T_0$. При $U_x > 0$, всегда будет выполняться $T_\Delta > T_0$, и при отсутствии входного сигнала ($U_x = 0$) будем иметь $T_\Sigma = T_\Delta = T_0$. Следовательно, алгоритм формирования АРФ не повышает требований к быстродействию интегратора.

Представленный алгоритм позволяет повысить значение k в $\Sigma\Delta$ -АЦП на непрерывных интеграторах до 100 раз, без применения интеграторов на переключаемых конденсаторах, что обеспечивает пропорциональное снижение методической погрешности и сокращение высокочастотных импульсных помех в схеме. Аналитическое доказательство, подтверждающее приведенный вывод, представлено в работе [10].

Доказательство эффективности предложенного способа передискретизации экспериментальным путем выполнено в среде *MATLAB*. На рис. 6 показаны графики изменения методической погрешности преобразования ΔU_x , полученные с помощью реализованных моделей двух исследуемых $\Sigma\Delta$ -АЦП.

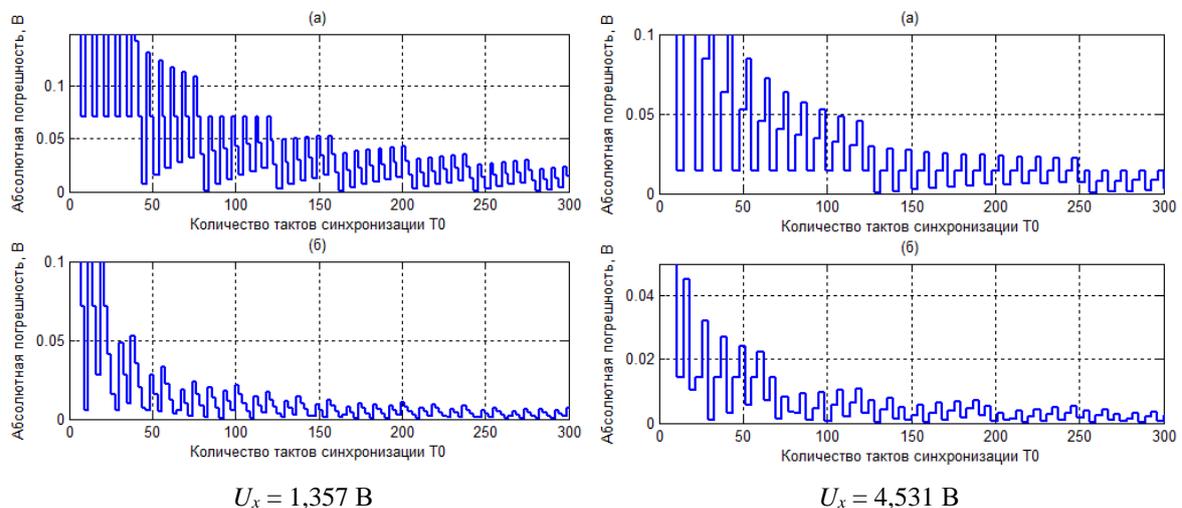
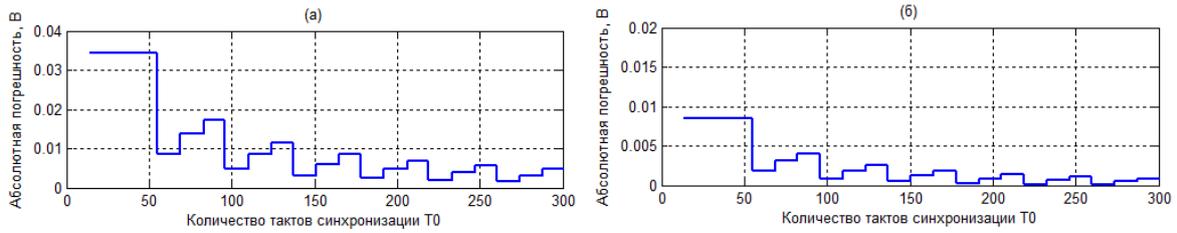


Рис. 6. Графики зависимости ΔU_x от N для моделей $\Sigma\Delta$ -АЦП, реализующих известный (а) и предложенный (б) способы формирования АРФ (параметры: $U_0 = 10$ В; $l = 4$)



$$U_x = 8,537 \text{ В}$$

Рис. 6. Окончание

На рис. 7 представлен график распределения ΔU_x , полученный с помощью модельного эксперимента. Для $N = \text{const} = 1500$ выполнялось преобразование входных напряжений $U_x = \text{const}$ в диапазоне от 0 до 90 % от $U_0 = 10\text{В}$, шаг изменения U_x задан равным 0,001 В.

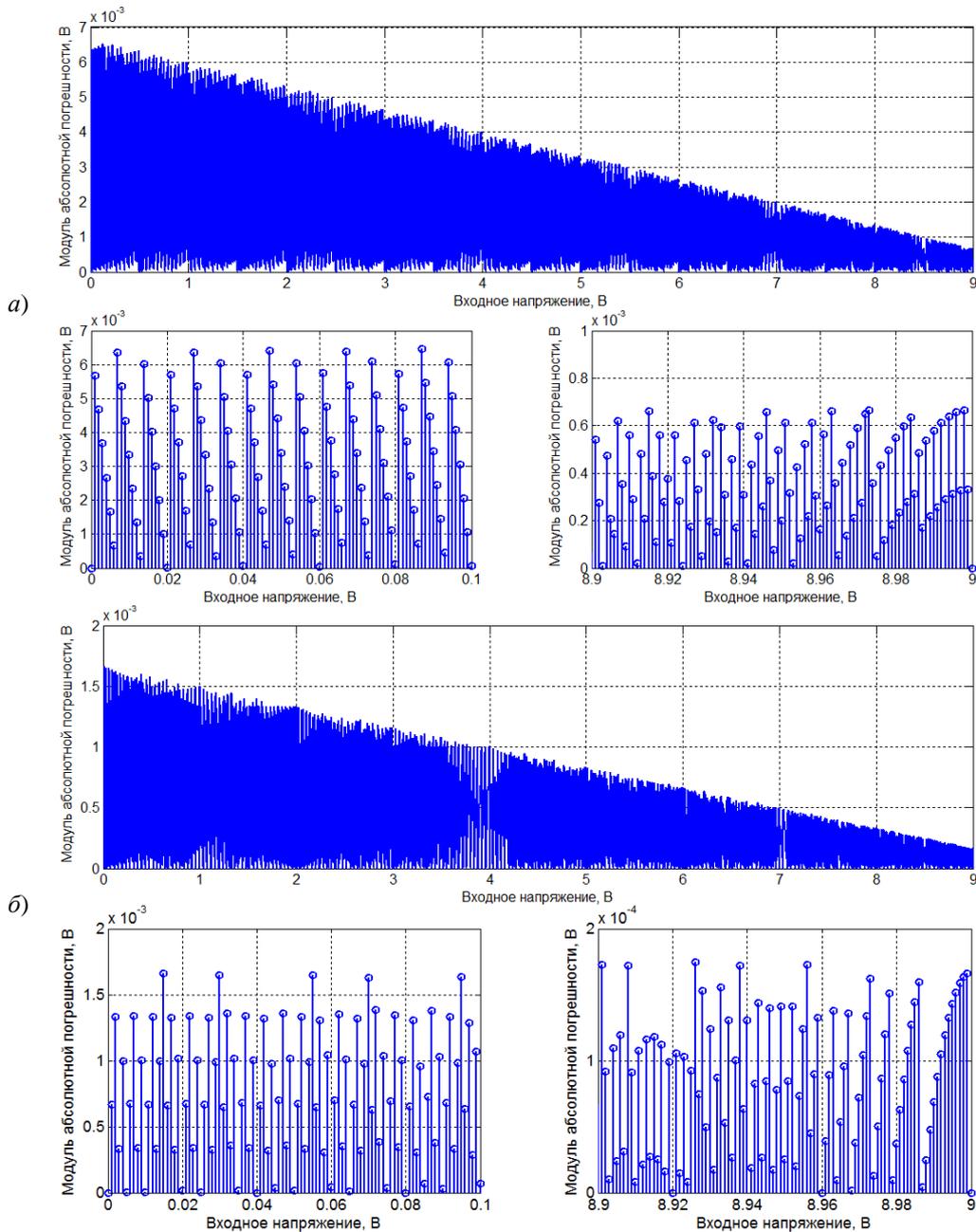


Рис. 7. Графики распределения ΔU_x по диапазону U_x :

а – модель $\Sigma\Delta$ -АЦП с известным способом передискретизации;

б – модель $\Sigma\Delta$ -АЦП с предложенным способом передискретизации

Рассмотренный алгоритм реализации передискретизации имеет следующие особенности: во-первых, повышенные требования к быстродействию системы «компаратор – ЦАП»; во-вторых, форма развертывающей функции становится близка к режимам $U_x \rightarrow U_0$ известного алгоритма $\Sigma\Delta$ -преобразования. Требования по быстродействию фактически нельзя назвать повышенными, так как такие же требования предъявляются в современных микросхемах $\Sigma\Delta$ -АЦП, модуляторы которых в рамках проводимых рассуждений синхронизируются интервалами T_0 . Однако при реализации интегратора на переключаемых конденсаторах выполнение данных требований упрощается.

Существенное смещение развертывающей функции в область положительных (отрицательных) напряжений скажется на влиянии инструментальной погрешности интегратора, заключающейся в стремлении среднего значения напряжения на выходе интегратора к нулю. В реальном интеграторе сопротивление утечки конденсатора не равно бесконечности ($R_{\text{ут}} \neq \infty$, что эквивалентно уменьшению коэффициента усиления операционного усилителя) [12]. На графике изменения напряжения в суммирующей точке интегратора (рис. 8,а), отмечены значения постоянной составляющей напряжения смещения $e_{\text{см}} = e_0$, средние значения переменной составляющей Δe на интервалах T_0 , соответствующих интегрированию отрицательного и положительного U_0 , и результирующее $e_1 = e_0 + \Delta e$.

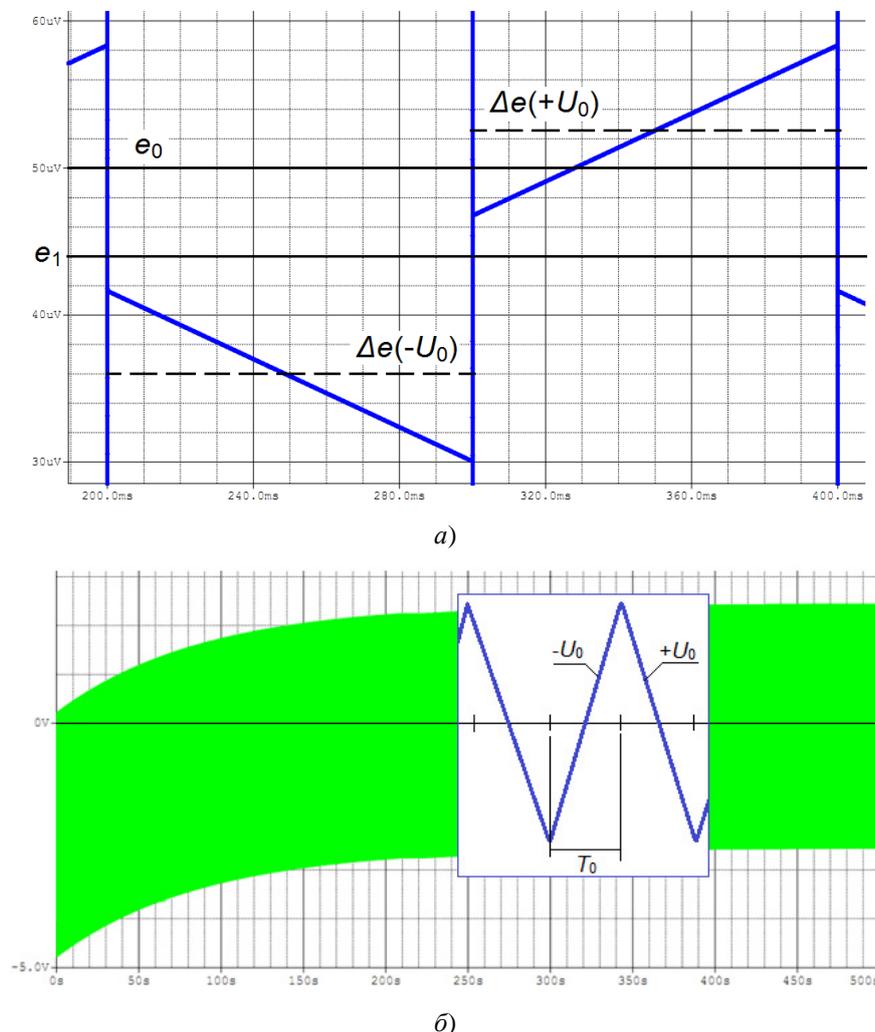


Рис. 8. Изменение развертывающей функции в процессе работы интегратора: а – графики напряжений в суммирующей точке интегратора; б – общий вид развертывающей функции

График получен с помощью имитационной модели интегратора (по стандартной схеме Миллера), в составе $\Sigma\Delta$ -модулятора первого порядка, при отсутствии входного напряжения. Моделирование выполнялось в САПР *OrCAD* на *PSpice* модели ОУ AD795, при компенсации напряжения смещения дополнительным источником $-49,99972$ мкВ.

Среднее значение e_1 в суммирующей точке (рис. 8,а) интегратора стремится к величине e_0 . Очевидно, что данная особенность также будет оказывать влияние на процесс формирования развертывающей функции $\Sigma\Delta$ -АЦП. Влияние данного параметра пренебрежимо мало на временах соразмерных интервалу преобразования, однако $\Sigma\Delta$ -АЦП может эксплуатироваться в непрерывном режиме в течение нескольких часов, а в ряде приложений и нескольких десятков часов [13, 14].

В рамках алгоритмического подхода к совершенствованию характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП предложен вариант изменения известного алгоритма синхронизации U_0 [15], отвечающий поставленному требованию по форме АРФ $R(t)$.

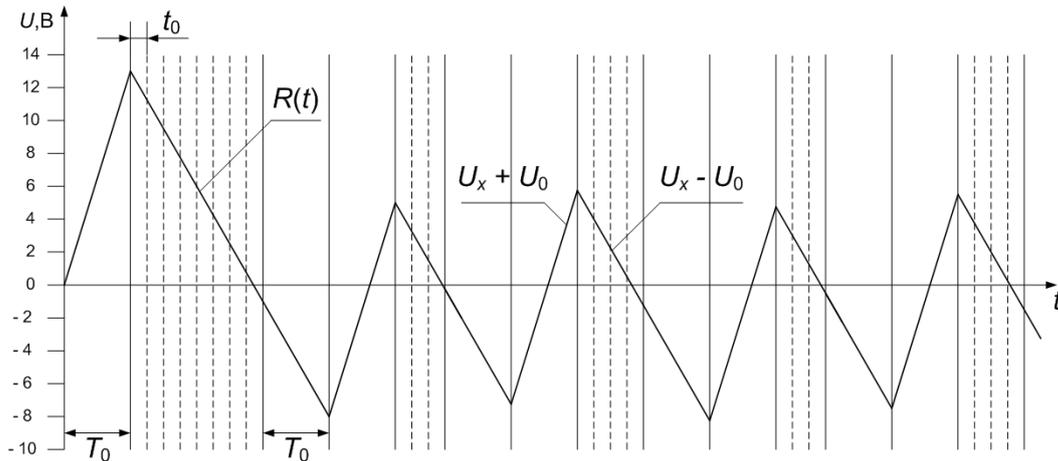
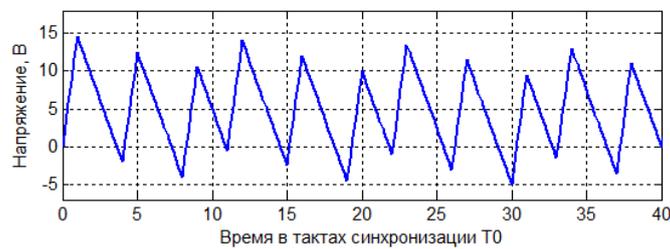


Рис. 9. Вид АРФ $\Sigma\Delta$ -АЦП с алгоритмом управления длительностью частных циклов преобразования

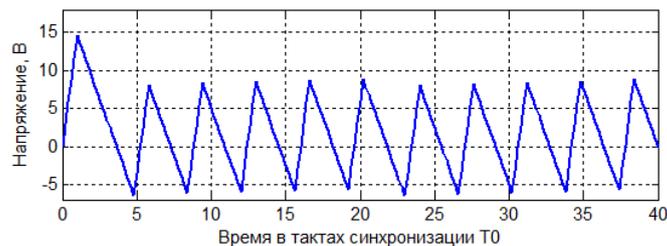
В предложенном алгоритме также используются основные T_0 и дополнительные t_0 такты синхронизации [15]. Для $U_x > 0$ интервал T_Σ тактируется T_0 , а интервал T_Δ , соответственно, t_0 (в случае $U_x < 0$ – наоборот). При этом в момент смены полярности $R(t)$ интегрирование разности ($U_x - U_0$) (или суммы ($U_x + U_0$)) продолжает выполняться еще в течение одного T_0 .

Из диаграммы на рис. 9 видно, что $R(t)$ может изменяться в диапазоне от минус $U_0 t_0 / \tau$ до $2U_0 T_0 / \tau$, а в установившемся режиме в диапазоне от минус $(U_0 T_0 / \tau + U_0 t_0 / \tau)$ до $U_0 T_0 / \tau$. Таким образом, исследуемый алгоритм отвечает требованиям минимизации инструментальной составляющей погрешности преобразования.

Значения $R(t)$, полученные моделированием в среде *MATLAB*, подтверждают вышеуказанную аналитическую оценку (рис. 10).



а)



б)

Рис. 10. Вид АРФ соответствующих моделям известного (а) и исследуемого (б) $\Sigma\Delta$ -модуляторов

С помощью модельных экспериментов при тех же условиях моделирования (см. диапазон U_x и значение U_0 к рис. 7) проведена оценка ΔU_x для пяти значений длительности интервала $T_n = NT_0$ и $l = 5$. Для каждого N рассчитывались значения максимальной и СКЗ ΔU_x на диапазоне U_x (табл. 2).

Таблица 2

Количественные оценки методической погрешности моделей $\Sigma\Delta$ -АЦП

Коэффициент N	Известный способ $\Sigma\Delta$ -модуляции		$\Sigma\Delta$ -модуляция с исследуемым алгоритмом управления формой АРФ	
	Макс. ΔU_x , В	СКЗ ΔU_x , В	Макс. ΔU_x , В	СКЗ ΔU_x , В
500	0,0195	0,0067	0,0146	0,00059
750	0,0132	0,0045	0,0097	0,00039
1000	0,0095	0,0034	0,0110	0,00039
1250	0,0075	0,0027	0,0087	0,00033
1500	0,0065	0,0022	0,0048	0,00020

Таким образом, алгоритм управления длительностью частных циклов преобразования, отличающийся режимами подключения опорного напряжения, обеспечивает уменьшение глубины модуляции среднего значения развертывающей функции на интервале преобразования без применения многоуровневого ЦАП.

Заключение

В подавляющем большинстве зарубежных публикаций, посвященных совершенствованию характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП, авторы предлагают свои решения, основываясь на доступном им технологическом процессе производства и характеристиках элементной базы. При этом большинство «удачных» решений патентуется фирмами производителями, что делает их недоступными отечественным разработчикам. Важной задачей является обеспечение российских инженеров достаточным арсеналом алгоритмических способов в рамках отечественной теоретической научной школы, обеспечивающих возможность практического достижения требуемых метрологических характеристик средств измерения. Авторы надеются, что представленные в работе методы совершенствования параметров $\Sigma\Delta$ -АЦП окажутся полезны и позволят не пытаться напрямую повторить известные зарубежные аналоги, а синтезировать собственные эффективные схемотехнические решения на доступной элементной базе.

Список литературы

1. Ашанин В. Н., Чувькин Б. В., Коротков А. А., Сидорова И. А. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1 (29). С. 26–35.
2. Чувькин Б. В., Долгова И. А., Сидорова И. А. Особенности расчета коэффициента автокорреляции бинарных сигналов в задачах анализа флуктуационных шумов квантования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 59–65.
3. Николаев А. В., Юрманов В. А., Пискаев К. Ю., Тюрин М. В. Концепция системы идентификации состояния изделий ракетно-космической техники в режиме реального времени // Датчики и системы. 2017. № 11 (219). С. 31–39.
4. Шахов Э. К. $\Sigma\Delta$ -АЦП: процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 50–57.
5. Чувькин Б. В., Шахов Э. К., Ашанин В. Н. $\Sigma\Delta$ -АЦП: синтез одноконтурных структур // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 1. С. 91–106.
6. Pavan S., Schreier R., Temes G.C. Understanding Delta-Sigma Data Converters. 2-nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017. 572 p.
7. Куц А. В., Пискаев К. Ю., Юрманов В. А. Реализация весового интегрирования в высокоточных интегрирующих АЦП // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: ЭВТ. 2010. Вып. 5. С. 157–165.
8. Юрманов В. А., Пискаев К. Ю., Куц А. В. $\Sigma\Delta$ -АЦП: адаптивная обработка результатов преобразования // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: ОТ. 2011. Вып. 2. С. 92–101.
9. Пат. 2294595С1 Российская Федерация. Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Шахов Э. К., Ашанин В. Н., Надеев А. И. № 2005118265 ; заявл. 14.06.2005 ; опубл. 27.02.2007.

10. Юрманов В. А., Пискаев К. Ю., Куц А. В. Реализации передискретизации в $\Sigma\Delta$ -АЦП на непрерывных интеграторах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 1. С. 113–122.
11. Пат. 2550591 Российская Федерация, МПК G 01 R 19/25 (2006. 01). Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Пискаев К. Ю., Куц А. В., Юрманов В. А. № 2013152826/28 ; заявл. 27.11.2013 ; опубл. 10.05.2015.
12. Шахов Э. К., Михотин В. Д. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
13. Жашкова Т. В. Структурно-параметрический синтез моделей сложных систем природного или техногенного происхождения в виде совокупности распределенных информационных объектов // Современные информационные технологии. 2010. № 12. С. 33–38.
14. Михеев М. Ю., Юрманов В. А., Гудков К. В. Синтез кориолисова расходомера для дозирования компонентов топлива // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 252–256.
15. Пискаев К. Ю. Способы минимизации шумов квантования $\Sigma\Delta$ -АЦП на непрерывных интеграторах : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2015. 211 с.
16. Чувькин Б. В., Шахов Э. К., Ашанин В. Н. $\Sigma\Delta$ -АЦП: анализ погрешности от краевых эффектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 3. С. 80–90.

References

1. Ashanin V.N., Chuvykin B.V., Korotkov A.A., Sidorova I.A. Analysis of the state and trends in the production of integrated information converters of $\Sigma\Delta$ -architecture. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences. 2014;(1):26–35. (In Russ.)
2. Chuvykin B.V., Dolgova I.A., Sidorova I.A. Features of calculating the autocorrelation coefficient of binary signals in problems of quantization fluctuation noise analysis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(4):59–65. (In Russ.)
3. Nikolaev A.V., Yurmanov V.A., Piskaev K.Yu., Tyurin M.V. The concept of a system for identifying the condition of rocket and space technology products in real time. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2017;(11):31–39. (In Russ.)
4. Shakhov E.K. $\Sigma\Delta$ -ATsP: the processes of oversampling, noise shaping, quantization and decimation. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2006;(11):50–57. (In Russ.)
5. Chuvykin B.V., Shakhov E.K., Ashanin V.N. $\Sigma\Delta$ -ATsP: synthesis of single-circuit structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences. 2007;(1):91–106. (In Russ.)
6. Pavan S., Schreier R., Temes G.C. *Understanding Delta-Sigma Data Converters*. 2-nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017:572.
7. Kuts A.V., Piskaev K.Yu., Yurmanov V.A. Implementation of weight integration in high-precision integrating ADCs. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: EVT = Radio electronics issues. Ser.: EVT*. 2010;(5):157–165. (In Russ.)
8. Yurmanov V.A., Piskaev K.Yu., Kuts A.V. $\Sigma\Delta$ -ATsP: adaptive processing of transformation results. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: OT = Radio electronics issues. Ser.: OT*. 2011;(2):92–101. (In Russ.)
9. Pat. 2294595C1 Russian Federation. Method of integrating analog-to-digital voltage conversion. Shakhov E.K., Ashanin V.N., Nadeev A.I. № 2005118265; appl. 14.06.2005; publ. 27.02.2007. (In Russ.)
10. Yurmanov V.A., Piskaev K.Yu., Kuts A.V. Implementation of oversampling in $\Sigma\Delta$ -ATsP on continuous integrators. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian journal: management and high technology*. 2014;(1):113–122. (In Russ.)
11. Pat. 2550591 Russian Federation, IPC G 01 R 19/25 (2006.01). Method of integrating analog-to-digital voltage conversion. Piskaev K.Yu., Kuts A.V., Yurmanov V.A. № 2013152826/28; appl. 27.11.2013; publ. 10.05.2015. (In Russ.)
12. Shakhov E.K., Mikhotin V.D. *Integriruyushchie razvertvyayushchie preobrazovateli napryazheniya = Integrating deploying voltage converters*. Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
13. Zhashkova T.V. Structural-parametric synthesis of models of complex systems of natural or man-made origin in the form of a set of distributed information objects. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2010;(12):33–38. (In Russ.)
14. Mikheev M.Yu., Yurmanov V.A., Gudkov K.V. Synthesis of a coriolis flowmeter for dosing fuel components. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2011;2:252–256. (In Russ.)
15. Piskaev K.Yu. Ways to minimize noise quantization of $\Sigma\Delta$ -ATsP on continuous integrators: PhD dissertation. Penza, 2015:211. (In Russ.)
16. Chuvykin B.V., Shakhov E.K., Ashanin V.N. $\Sigma\Delta$ -ATsP: error analysis from edge effects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences. 2007;(3):80–90. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Алексей Геннадиевич Дмитриенко**

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

Aleksey G. Dmitrienko

Doctor of technical sciences,
general director,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Кирилл Юрьевич Пискаев

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: piskaevk@gmail.com

Kirill Yu. Piskaev

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Кирилл Владимирович Гудков

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: gudkovk.pgta@gmail.com

Kirill V. Gudkov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Михаил Владимирович Тюрин

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: penza045@niifi.ru

Mikhail V. Tyurin

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

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

Поступила в редакцию/Received 13.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 10.06.2024

Принята к публикации/Accepted 08.07.2024

УДК 681.3
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МДП-СТРУКТУРЫ

Д. А. Ташлинцев¹, В. М. Чайковский²

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

¹ radiolokaci@yandex.ru, ² rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информативность комплекса для измерения параметров МДП-структуры может быть повышена за счет использования в его конфигурации генератора линейного изменяющегося напряжения (ГЛИН), реализованного на базе микроконтроллера. *Материалы и методы.* Используется метод «малого» сигнала, предназначенного для анализа нелинейных электрических систем, представляющих собой полупроводниковые структуры, и используемого для моделирования передаточной функции и описания отклика таких систем при «малых» значениях амплитуды измерительного сигнала, подаваемого на вход системы, позволяет оценить отклик системы с полупроводниковой структурой типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и зафиксировать ее $C-V$ -характеристики. *Результаты.* Добавление в состав ГЛИН микроконтроллера дает возможность реализовать универсальный исследовательский комплекс, более тщательно оценивающий характеристики МДП-структуры, с различными по толщине слоями диэлектрика, как с тонким, так и со значительно увеличенным. *Выводы.* Включение в состав ГЛИН микроконтроллера, выполняющего одновременно операции: запоминания, хранения и вычисления, обеспечивает оценку значения зарядовой неустойчивости МДП-структуры, что наряду со значительным расширением объема получаемой информации также позволяет оценивать реакцию МДП-структуры, находящейся в различных энергетических состояниях, на внешнее воздействие «малым» сигналом.

Ключевые слова: энергетические состояния, гистерезис, поляризационные свойства, МДП-структуры, микроконтроллер, вольт-фарадная зависимость, диэлектрический слой

Для цитирования: Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Измерение зарядовой неустойчивости МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 17–24. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

MEASUREMENT OF CHARGE INSTABILITY OF TIR STRUCTURE

D.A. Tashlintsev¹, V.M. Tchaikovsky²

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

¹ radiolokaci@yandex.ru, ² rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The information content of the complex for measuring the parameters of the TIR structure can be increased by using a GLIN implemented on the basis of a microcontroller in its configuration. *Materials and methods.* The method of a "small" signal is used, designed for the analysis of nonlinear electrical systems representing semiconductor structures, and used to model the transfer function and describe the response of such systems at "small" values of the amplitude of the measuring signal supplied to the input of the system. This approach allows us to evaluate the response of a system with a semiconductor, which is a metal-dielectric-semiconductor (MDP) structure, and fix the $C-V$ characteristics of this structure. *Results.* The addition of a microcontroller to the GLIN makes it possible to implement a universal research complex that can assess in more detail the characteristics of a TIR structure with dielectric layers of various thicknesses, both thin and significantly enlarged. *Conclusions.* The use of a microcontroller in GLIN, capable, along with the operations of memorization and storage, to perform the computational ones necessary for the final assessment of the charge instability of the TIR structure, not only expands the amount of information received, but also allows us to evaluate the reaction of the investigated TIR structure, located in various energy states, to the external influence of a "small" signal.

Keywords: energy states, hysteresis, polarization properties, TIR structures, microcontroller, volt-farad dependence, thick dielectric layer

For citation: Tashlintsev D.A., Tchaikovsky V.M. Measurement of charge instability of TIR structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):17–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-2

Метод «малого» сигнала – это метод, предназначенный для анализа нелинейных электрических объектов, которым является полупроводниковая структура, и он применяется для моделирования передаточной функции и описания реакции такого объекта при условии «малых» значений амплитуды сигнала (20 мВ), действующего на входе измерительной системы, содержащей такой нелинейный объект. Данный подход используется для оценки реакции системы с полупроводником, когда последний будет являться структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1, 2], итогом чего, как правило, является получение характеристики $C-V$ характеристик структуры.

В результате продолжительного по времени воздействия на МДП-структуру вместо напряжения смещения с изменяющимся значением амплитуды, постоянным, с неизменным значением амплитуды, в структуре будет проявляться эффект зарядовой нестабильности, вызывающий появление в ее диэлектрическом слое встроенного заряда. А это изменит такую важную характеристику структуры, как уровень порогового напряжения, вызывающего у структуры диэлектрический пробой [3, 4]. Последнее вызвано увеличением уровня напряженности электрического поля из-за высокого уровня амплитуды напряжения смещения, прикладываемого к структуре, что вызывает усиленное проявление поляризационного эффекта в материале ее диэлектрического слоя, приводящего к объемному перераспределению внутрисистемных зарядов, но так же и изменением температурного режима внешней среды. Возникновение данной нестабильности вызывает не только смещение получаемых вольт-фарадных характеристик, но также может привести к искажению формы последних, иными словами данная нестабильность является показателем ряда возникающих вероятных угроз при дальнейшем использовании МДП-структур, особенно в случае, когда на их базе ведется разработка высокоточной и надежной техники с продолжительным сроком службы. Подробный анализ с позиции физики твердого тела, с указанием причин и других различных механизмов, вызывающих возникновение указанной нестабильности, рассмотрен в работе [4].

Проявление эффекта зарядовой нестабильности наглядно поясняется вольт-фарадными характеристиками на рис. 1.

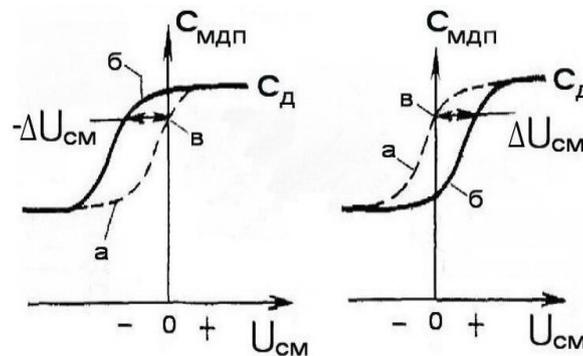


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики

Изменение значения полной емкости МДП-структуры от напряжения смещения, т.е. вольт-фарадная характеристика структуры при плавной смене ее энергетического состояния от «инверсии» на состояние «обогащения», где а – исходные, начальные зависимости, до начала длительного воздействия постоянным напряжением на исследуемую МДП-структуру; б – зависимости, после устранения упомянутого воздействия той или иной полярности на структуру, соответственно, а и б; в – точка выбора частичного значения (0,5 или 0,7) от максимального, т.е. полной емкости структуры, равного емкости диэлектрического слоя C_D при нахождении структуры в состоянии «обогащения».

Устранение указанной проблемы может быть достигнуто использованием различных методов, осуществляющих усовершенствование технологий производства структур металл-диэлектрик-полупроводник, заключающихся в добавлении в слой диэлектрика методом легирования или инжестирования определенных материалов (Na, K, Li). Последние могут быть в виде их заряженных ионов, вводимых непосредственно в формируемый слой диэлектрика [3, 4], получаемый в большинстве случаев методом термического окисления поверхности полупроводникового слоя, в результате чего в большинстве случаев диэлектрик представляет собой двуокись кремния [1, 2].

Оценка характера изменения значения общей емкости структуры $C_{мдп}$, фиксируемого характерографом в виде вольт-фарадной характеристики, осуществляется с помощью любой измерительной схемы, входящей в состав того или иного измерителя, подробно рассмотренных в работе [5].

Специфику предлагаемому ГЛИН придает реализация его на основе микроконтроллера PIC 18F6 (МЧ) [6–8]. Оценка значения зарядовой нестабильности с помощью предлагаемого ГЛИН происходит согласно следующему алгоритму (рис. 2). Нажатием кнопки 1 на микроконтроллер подается питание. Затем кнопками 2–8 вводится значение частоты повторения напряжения генератора, значение которой отображается светодиодами 0–3.

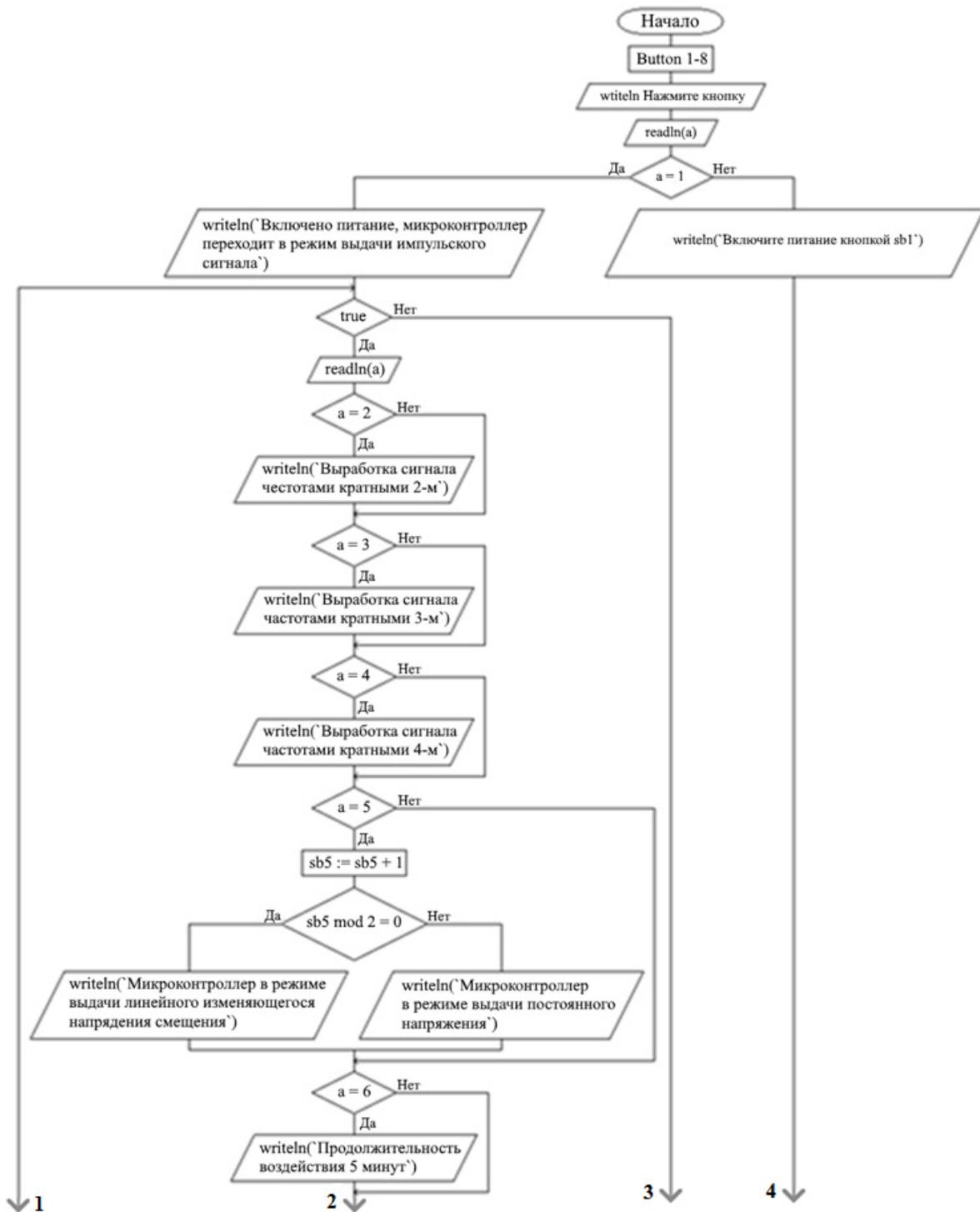


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера

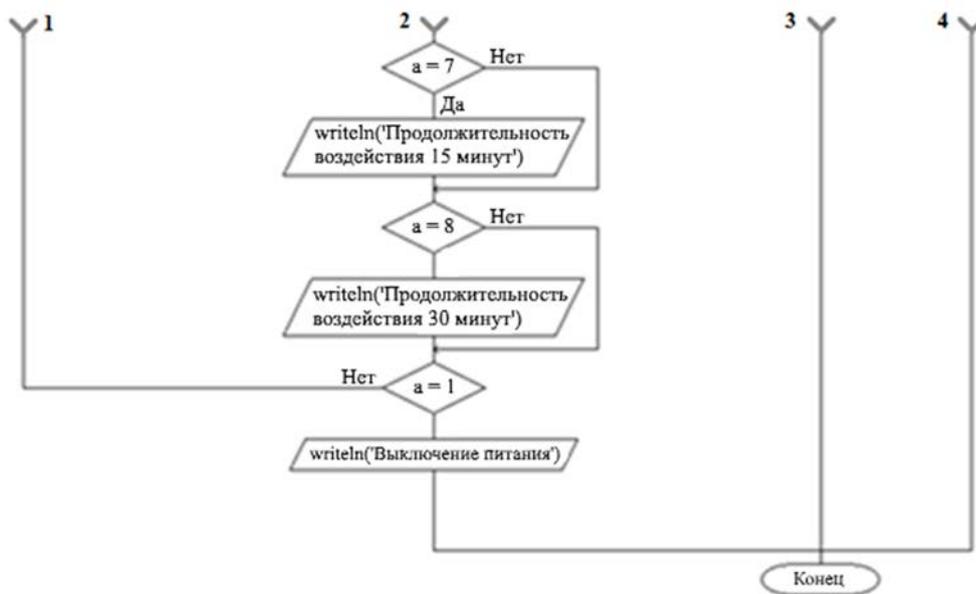
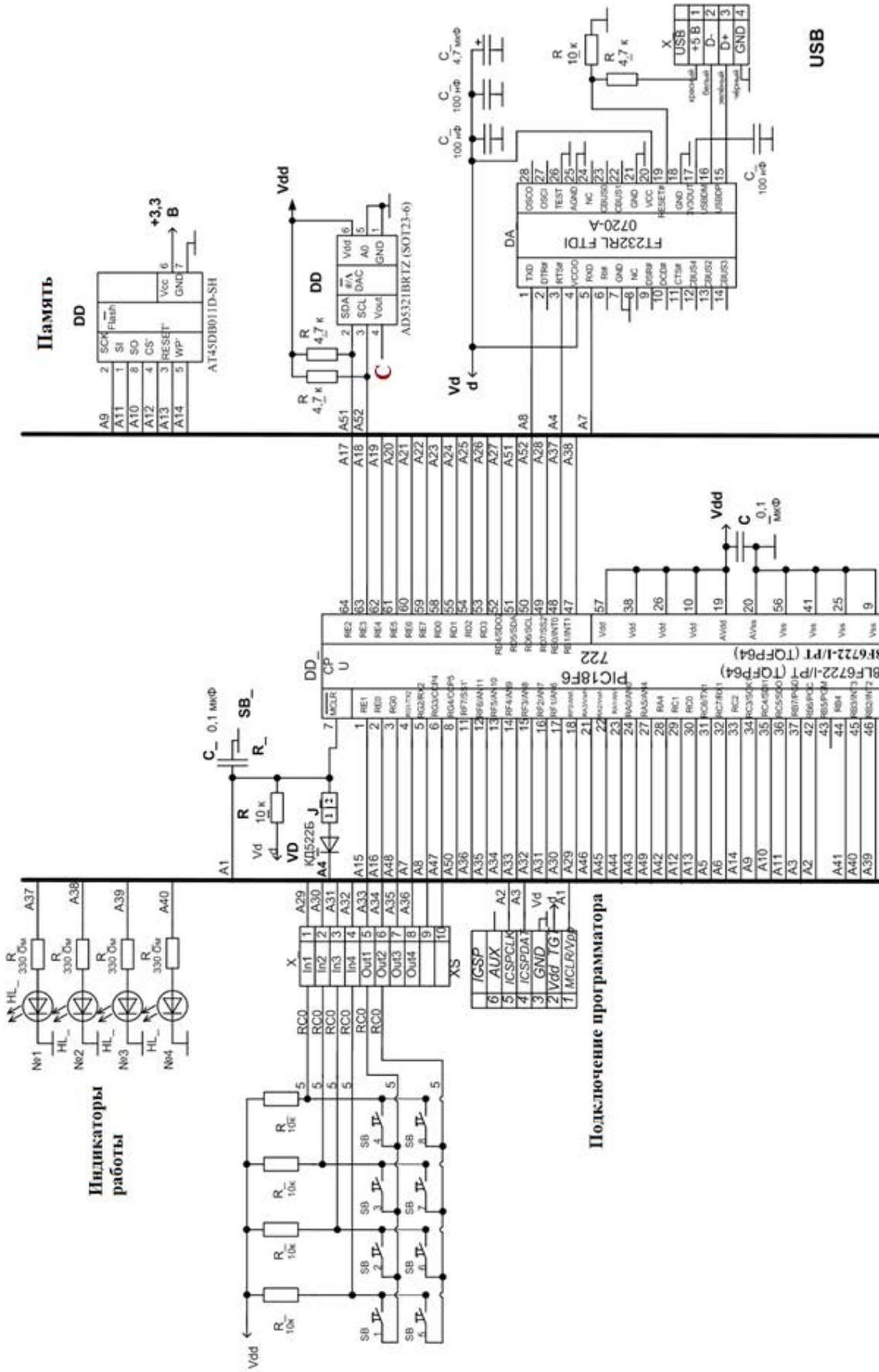


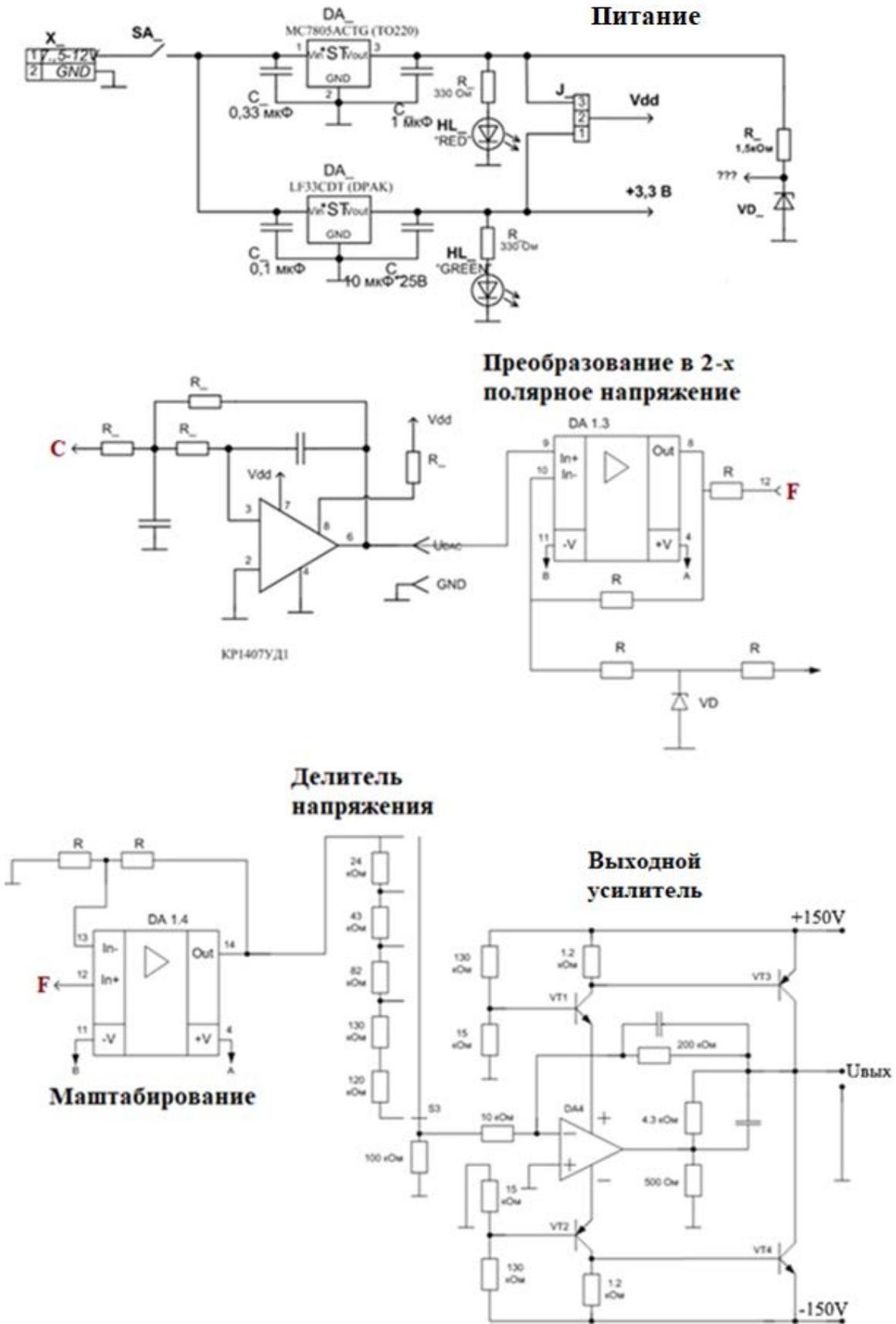
Рис. 2. Окончание

Продолжительность воздействия на МДП-структуру постоянным, с неизменной амплитудой напряжением смещения задается клавиатурой. При нажатии кнопки 6 таймер устанавливается на 5 мин, кнопки 7 на 15 мин, кнопки 8 на 30 мин. При нажатии кнопки 5 устанавливается таймер в соответствии с предыдущей нажатой кнопкой. Отмена режима выдачи постоянного напряжения осуществляется повторным нажатием кнопки 5. Далее очищается регистр от предыдущих значений, установленных кнопками 1–8, при этом загорается светодиод 1, показывающий, что ГЛИН переходит в режим продолжительного по времени формирования неизменного по амплитуде напряжения смещения. Если кнопки 1–5 были нажаты, то происходит обработка выходного сигнала измерительной схемы, преобразующей параметры МДП структуры, и далее идет завершение работы программы. Выключение МК производится повторным нажатием кнопки 1. При нажатии кнопки К5 с помощью одного из измерителей [5] фиксируется вольт-фарадная характеристика МДП-структуры типа $C_{мдп} = f(U_{см})$, отражающая переход структуры из области глубокой «инверсии» в область «обогащения», с последующей подачей напряжения пропорционального $C_{мдп}$ на вход А15 (рис. 3). После завершения этапа перехода, нажатием кнопки А11 будет занесено в память (рис. 3) значение выбранного уровня от максимального значения $C_{мдп}$, соответствующее выбранной точке «в» (рис. 1). Потом осуществляется продолжительное воздействие на МДП-структуру напряжением постоянного тока с фиксированным повышенным значением амплитуды напряжения, что приводит к образованию в ее диэлектрическом слое встроенного заряда, вызывающего заметный сдвиг $\Delta U_{см}$ по координате действующего напряжения смещения регистрируемой характеристикой $C-V$ -характеристики. На следующем этапе путем повторного нажатия кнопки К5 происходит перевод режима работы ГЛИН в обычный режим, а именно, в режим формирования изменяющегося напряжения смещения. Затем происходит повторный процесс получения $C-V$ -характеристики, в ходе которого путем сравнения текущего значения напряжения пропорционального $C_{мдп}$ со значением, ранее сохраненным в регистре – $W_{МК}$ и соответствующим точке «в» (см. рис. 1). В момент равенства последних происходит фиксация значения напряжения $U_{см}$, соответствующего данному моменту равенства, которое затем сравнивается со значением напряжения смещения, соответствующего точке «в» (см. рис. 1) на предыдущем этапе измерения. Оценка значения зарядовой нестабильности происходит путем перевода ГЛИН в режим продолжительного по времени (от нескольких десятков минут до нескольких сотен) формирования с неизменным выбранным значением амплитуды с тем или иным видом полярности. В результате проведения на предварительном этапе теоретического анализа выбираются: максимальное значение амплитуды постоянного напряжения, знак его полярности и продолжительность интервала воздействия на структуру. Методика получения окончательного численного значения зарядовой нестабильности исследуемой МДП-структуры, полученного в ходе проведенного измерения, достаточно подробно изложена в работе [5].



a)

Рис. 3. Принципиальная схема ГЛИН



б)

Рис. 3. Окончание

С помощью кнопок К2–К4 (рис. 3) устанавливается необходимая скорость изменения амплитуды напряжения смещения, последнее достигается путем увеличения частоты повторения

сигнала опорного генератора в $2 \div 4$ раза. Остановка работы ГЛИН выполняется двойным нажатием кнопки К1, при этом прекращается свечение индикатора «РАБОТА». При этом также исключается подача исходного импульсного сигнала, который используется в дальнейшем для формирования измерительного сигнала «малой амплитуды», воздействующего на МДП-структуру, помещенную с помощью зондового устройства в состав измерительной схемы измерительного устройства [5]. Структура последней в силу ограниченности объема статьи не приводится. Исходное напряжение для ГЛИН, являющееся, по сути, опорным, из которого будет формироваться во встроенном в состав МП ЦАП в напряжение в виде импульсной последовательности прямоугольной формы. При этом изменение амплитуды значения данного напряжения будет лежать в диапазоне от нуля до $+2,4$ В, для расширения границ данного диапазона с придачей напряжению двухполярного характера изменения используется высоковольтный выходной каскад, включающий высоковольтные разнополярные транзисторы VT3 и VT4 типа КТ886А1 и КТ886Б1. Последнее позволяет формировать на выходе данного ГЛИН напряжение с амплитудой, изменяющейся в диапазоне ± 100 вольт, что дает возможность исследовать структуры с толстым диэлектрическим слоем.

Использование в составе ГЛИН микроконтроллера, способного выполнять вычислительные операции, необходимые для окончательной оценки зарядовой нестабильности МДП-структуры, не только расширяет объем получаемой информации, но и придает предлагаемому ГЛИН дополнительные возможности, позволяющие оценить реакцию исследуемой МДП-структуры, находящуюся в различных энергетических состояниях.

Включение в состав ГЛИН микроконтроллера дает возможность на базе данного ГЛИН совместно с измерителем, описанным в работе [5], реализовать универсальный исследовательский комплекс, позволяющий оценить свойства целого класса МДП-структур, обладающих различными по толщине слоями диэлектрика, как тонкими, так и значительно увеличенными.

Использование в предлагаемом ГЛИН подхода, основанного на замене процесса запоминания и относительно длительного хранения аналоговых величин, которыми являются несколько значений напряжения смещения, на операцию хранения кодов пропорциональных этим значениям полностью исключает всякие ограничения по продолжительности процесса измерения, который может достигать нескольких часов.

Список литературы

1. Овсюк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск : Наука, 2014. 254 с.
2. Berman A. Model of highfrequency capacity MOS – the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer // *Solid State Electron*. 1974. Vol. 17, № 7. P. 735–742.
3. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
4. Андреев В. В., Барышев В. Г., Столяров А. А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник : монография. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 256 с.
5. Андреев В. В., Барышев В. Г., Бондаренко Г. Г. [и др.]. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки // *Микроэлектроника*. 2000. Т. 29, № 2. С. 105–112.
6. Никонова А. А., Небеснюк О. Ю. [и др.]. Исследование механизмов нестабильности характеристик МДП структур // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2011. № 1. 3 с.
7. Чайковский В. М. Измерители параметров МДП-структур на несинусоидальном токе : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1996. 222 с.
8. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVP : пер. с англ. А. В. Евстифеева. М., 2023. 273 с.

References

1. Ovsyuk V.N. *Elektronnyye protsessy v poluprovodnikakh s oblastyami prostranstvennogo zaryada = Electronic processes in semiconductors with spatial charge regions*. Novosibirsk: Nauka, 2014:254. (In Russ.)
2. Berman A. Model of highfrequency capacity MOS – the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer. *Solid State Electron*. 1974;17(7):735–742.
3. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : textbook*. Moscow, 2005:492. (In Russ.)
4. Andreev V.V., Baryshev V.G., Stolyarov A.A. *Inzheksionnyye metody issledovaniya i kontrolya struktur metall-dielektrik-poluprovodnik: monografiya = Injection methods of research and control of metal-dielectric-semiconductor structures : monograph*. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Baumana, 2004:256. (In Russ.)

5. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G. et al. Investigation of charge degradation of TIR structures in strong electric fields by the method of controlled current load. *Mikroelektronika = Microelectronics*. 2000;29(2):105–112. (In Russ.)
6. Nikonova A.A., Nebesnyuk O.Yu. et al. Investigation of mechanisms of instability of characteristics of TIR structures. *Radioelektronika, informatika, upravlenie = Radioelectronics, informatics, management*. 2011; (1):3. (In Russ.)
7. Chaykovskiy V.M. Meters of parameters of TIR structures on non-sinusoidal current: PhD dissertation. Penza, 1996:222. (In Russ.)
8. Morton Dzh. *Mikrokontrollery AVP: per. s angl. A.V. Evstifeeva = AVP microcontrollers : translated from English by A. V. Evstifeev*. Moscow, 2023:273. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Ташлинцев

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

Dmitry A. Tashlintsev

Engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
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 the 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 15.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 14.06.2024

Принята к публикации / Accepted 05.07.2024

УДК 681.518.3
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. Г. Избасов¹, П. Д. Головин², Н. К. Юрков³, Н. В. Горячев⁴, И. И. Кочегаров⁵

¹ Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Республика Казахстан

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

¹ iag1973@mail.ru, ² GPD75@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru, ⁴ ra4foc@yandex.ru, ⁵ kipra@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Формализуются задачи интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов. Оценены задачи интеллектуального управления группой БПЛА-агентов. В парадигме мультиагентного подхода детально раскрывается алгоритм функционирования информационно-измерительной системы управления группой беспилотных летательных аппаратов. *Материалы и методы.* В ходе анализа известных подходов к управлению группой летательных аппаратов обоснованы их недостатки и выделены преимущества мультиагентного управления с представлением каждого объекта управления в виде функционально самодостаточного агента. Дан алгоритм работы мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА. *Результаты.* Алгоритм обеспечивает повышение уровня автономной самоорганизации при выполнении как запланированных, так и незапланированных задач с обеспечением периодического целераспределения. *Выводы.* Сформулированы этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов с учетом влияющих факторов, позволяющих эффективно скоординировать действия аппаратов внутри группы. Разработан алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов с учетом аппаратов с ограниченными тактико-техническими характеристиками, обеспечивающий автономность группы при периодическом распределении целей для выполнения запланированных задач.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, управление, летательный аппарат, мультиагентный подход

Для цитирования: Избасов А. Г., Головин П. Д., Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кочегаров И. И. Алгоритмическое обеспечение мультиагентной информационно-измерительной системы управления группой беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 25–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

ALGORITHMIC SUPPORT OF A MULTI-AGENT INFORMATION AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.G. Izbasov¹, P.D. Golovin², N.K. Yurkov³, N.V. Goryachev⁴, I.I. Kochegarov⁵

¹ Military Institute of the Air Defense Forces of Aktobe, Aktobe, Republic of Kazakhstan

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

¹ iag1973@mail.ru, ² GPD75@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru, ⁴ ra4foc@yandex.ru, ⁵ kipra@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper formalizes the tasks of intelligent control of a group of unmanned aerial vehicles. The tasks of intellectual management of a group of UAV agents are evaluated. In the paradigm of the multi-agent approach, the algorithm of functioning of the information and measurement control system for a group of unmanned aerial vehicles is disclosed in detail. *Materials and methods.* During the analysis of known approaches to the management of a group of flight vehicles, their disadvantages are substantiated and the advantages of multi-agent management with the representation of each control object in the form of a functionally self-sufficient agent are highlighted. The algorithm of operation of a multi-agent intelligent control system for a group of UAVs is given. *Results.* The algorithm provides an increase in the level of autonomous self-organization when performing both planned and unplanned tasks with periodic target allocation. *Conclusions.* The stages of performing the tasks of intelligent control of a group of UAV agents are

formulated, taking into account the influencing factors that make it possible to effectively coordinate the actions of the devices within the group. An algorithm has been developed for the operation of a multi-agent control system for a group of UAV agents, taking into account devices with limited performance characteristics, ensuring the autonomy of the group with periodic distribution of goals to perform planned tasks.

Keywords: information and measurement system, control, aircraft, multi-agent approach

For citation: Izbasov A.G., Golovin P.D., Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I. Algorithmic support of a multi-agent information and measurement control system for a group of unmanned aerial vehicles. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):25–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

В России в настоящее время проводятся проектирование, разработка и внедрение беспилотных систем в различных отраслях народного хозяйства, экологического, энергетического и промышленного мониторинга, антитеррористического контроля безопасности, участия в аварийно-спасательных мероприятиях на местах катастроф и т.д. Одним из главных достоинств непилоотируемых аппаратов является исключение роли человека-оператора во время выполнения жизненно опасных задач.

Однако не все поставленные задачи могут быть решены одним БПЛА в силу его ограниченных возможностей. Как показывает практика, существуют такие задачи, которые могут эффективно решаться только с помощью группы БПЛА, действующей по заранее разработанному алгоритму. Следует отметить, что при использовании группового применения БПЛА повышается оперативность принятия решений, что сказывается на уменьшении времени выполнения и повышении вероятности выполнения задач.

Анализ современной литературы показал, что в разрабатываемых системах контроля и управления для группы БПЛА отсутствует самостоятельная постановка новой задачи, которая не позволит оперативно проанализировать и решить несколько сценариев ее выполнения. Типичные примеры таких ситуаций: выход из строя части аппаратов из группы, изменение приоритетов и координат целей, критериев принятия решения и т.д. Эффективность таких систем уменьшится при увеличении фактора априорной неопределенности вследствие невозможности адаптации к внешним переменам, например, окружающей среды. К тому же дальнейшее совершенствование схем контроля и управления традиционных систем является время- и ресурсозатратным процессом и требует профессиональных специалистов [1].

Для решения таких проблем следует воспользоваться технологией мультиагентов. В ее основе понятия «агента» – программное обеспечение (ПО), которое способно самостоятельно контролировать, управлять и принимать решения в группе в зависимости от текущей ситуации, одновременно взаимодействуя со всеми аппаратами в группе. При этом выход из строя или потеря одного или нескольких БПЛА из группы никак не отразится на выполнении поставленной задачи для всей группы.

В кортеже с технологией искусственного интеллекта (ИИ) реализуется возможность умения обозначать новые более приоритетные цели, а также способность представлять и перераспределять между агентами пути приближения к ней для выполнения поставленной задачи.

Следует выделить следующие отличительные черты при использовании группы интеллектуальных БПЛА-агентов:

- автоматическое приспособление к неопределенным и меняющимся условиям окружающей среды;
- целенаправленное и согласованное распределение действий между БПЛА-агентами группы для выполнения запланированных заданий;
- активное коллективное поведение, ориентированное для самостоятельного решения как общей, так и частной задач.

Задачи интеллектуального управления группой БПЛА-агентов

В теории автономного поведения группы БПЛА интеллектуальное управление поведением отдельных устройств играет решающее значение в обеспечении согласованных действий внутри группы для выполнения запланированных задач.

Если для простых задач имеется возможность реализации алгоритмов интеллектуального управления классическими методами, то для сложного задания необходимо обеспечить реализацию действий с распределением функций для коллективного взаимодействия внутри группы с помощью ИИ [2].

Для мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов предлагается разбить выполнение задачи интеллектуального управления на три этапа. Каждый из трех предлагаемых этапов выполнения может быть подвергнут воздействию влияющих фактов, показанных на рис. 1.

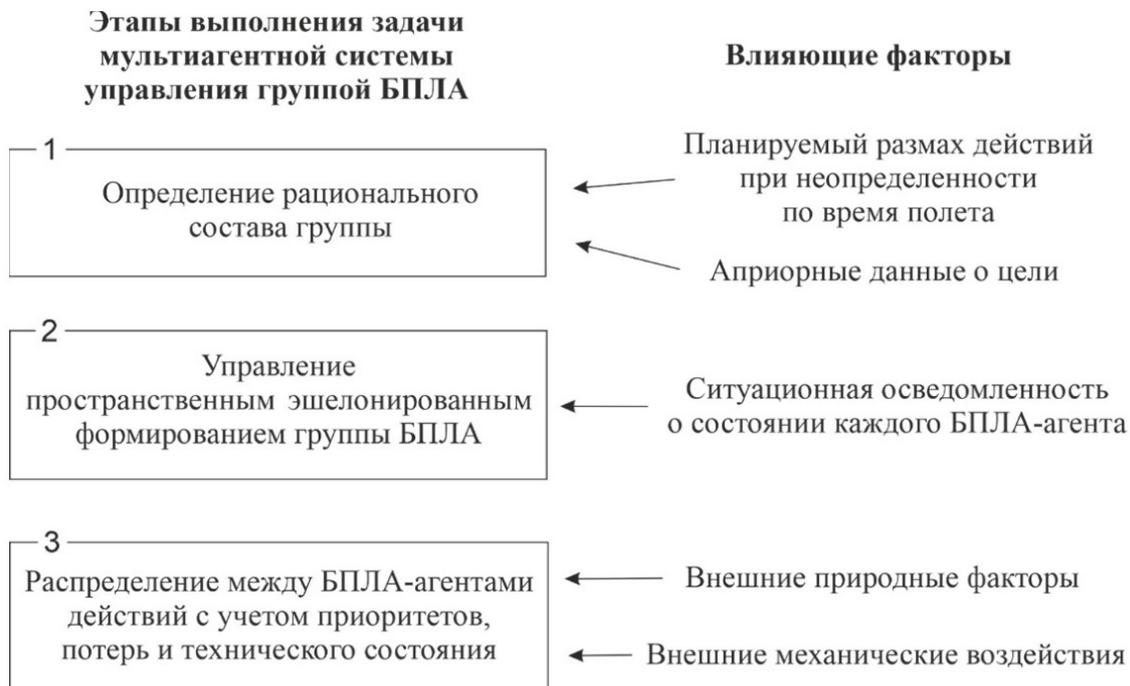


Рис. 1. Этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов

Каждый этап выполнения задач может быть реализован как при использовании традиционных подходов, так и при использовании технологий нейронных сетей.

Алгоритм работы мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА

Для сохранения высокой эффективности группового применения БПЛА мультиагентная система управления должна иметь самоорганизующуюся структуру, способную функционировать в автономном режиме и адаптироваться к любой обстановке, при координации совместных действий между агентами в группе.

Для создания мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА-агентов предлагается использовать методы и теорию мультиагентных систем. При таком подходе построения распределение действий в ходе выполнения задачи между БПЛА-агентами с учетом приоритетов, потерь и технического состояния возлагается на бортовую аппаратуру управления агента (БАУА). БАУА каждого аппарата объединена в единую информационно-программную сеть, обеспечивающую целенаправленную работу всей группы.

Преимущества мультиагентной системы управления по сравнению с другими способами реализации совместных действий в группе:

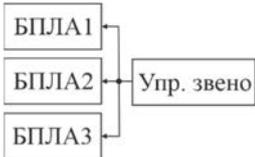
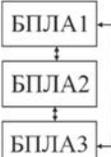
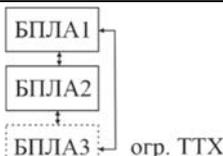
- 1) управление действиями всех БПЛА-агентов осуществляется через синхронизированный интервал времени;
- 2) распределение и перераспределение задач между БПЛА-агентами с учетом минимального пути до цели, приоритетов при наличии аппаратов с ограниченными тактико-техническими характеристиками (ТТХ);
- 3) формирование и переформирование эшелонированного строя для избегания столкновений внутри группы;
- 4) высокая вероятность выполнения задачи.

При этом основным достоинством мультиагентной системы управления является возможность обмена информацией с любым участником группы [3].

В табл. 1 приведен сравнительный анализ существующих систем управления для группы БПЛА.

Таблица 1

Сравнительный анализ систем управления группой БПЛА

Название	Графическое представление	Источник	Отличительные характеристики
Централизованная		[2]	Потеря управляющего звена (оператора) снизит вероятность выполнения поставленных задач
Сетецентрическая		[4]	Высокая вероятность выполнения поставленных задач, но без учета БПЛА с ограниченными ТТХ
Мультиагентная			Высокая вероятность выполнения поставленных задач с учетом БПЛА с ограниченными ТТХ

Анализ технической литературы выявил недостатки в организации группового управления при реализации автономной работы разработанных систем управления в процессе перераспределения целей между БПЛА с ограниченными ТТХ.

Так же общим недостатком разработанных систем управления является наличие каналов управления и передачи данных с пункта управления. Такие каналы могут быть легко обнаружены и подавлены, что может привести к потере группы.

Алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов при координации совместных действий показан на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА

При предполетной подготовке формируются исходные данные: загружаются координаты всех объектов и коэффициенты их важности (приоритеты), происходит синхронизация по времени приемо-передатчиков аппаратов, каждому БПЛА-агенту присваивается свой регистрационный номер. Для избегания столкновений аппаратов в группе определяются безопасные интервалы и эшелонированное положение в строю. Полет группы к целям может осуществляться при использовании навигационной системы и системы наведения [4].

Через фиксированный интервал времени между БПЛА-агентами группы происходит обмен короткими зашифрованными сообщениями с текущими координатами и техническим состоянием для каждого аппарата. С помощью программного обеспечения (ПО) происходит перерасчет минимального расстояния до целей с учетом приоритетов для каждого БПЛА-агента. В случае несоответствия текущего местонахождения каждого из аппаратов группы до своей цели от предполетного задания происходит перераспределение целей с учетом приоритетов для каждого БПЛА-агента группы. При появлении БПЛА-агента в группе с ограниченными ТТХ, не позволяющими ему достигнуть заданной цели, происходит перерасчет расстояния с выбором новой цели независимо от приоритета и с возможностью ее достижения [5].

БАУА каждого БПЛА-агента решает задачу повторного распределения целей с одинаковыми исходными данными для каждого борта по единому алгоритму, учитывающему не только работоспособные БПЛА, но и с ограниченными ТТХ. В результате при такой системе управления больше не потребуется передачи никаких дополнительных команд для управления и наведения на цель для каждого аппарата в независимости от его ТТХ, что обеспечит эффективность работы всей группы [6].

Таким образом, рассмотренный подход позволит группе БПЛА-агентов автономно самоорганизовываться при выполнении как запланированных, так и незапланированных задач с решением периодического целераспределения [7].

В табл. 2 приведен пример выполнения задания по предложенному алгоритму для группы из четырех БПЛА-агентов, где Ц – цель, а П – ее приоритет (1 – max, 3 – min), ΔT – фиксированный интервал времени для момента обмена информацией между агентами в группе, T_0 – начальный момент времени [8].

Таблица 2

Пример выполнения задач группой БПЛА-агентов с помощью алгоритма мультиагентной системы управления

Время	Движение БПЛА-агентов к целям	Текущее задание
1	2	3
T_0		Предполетное задание сформировано: БПЛА1 → Ц1П3 БПЛА2 → Ц3П1 БПЛА3 → Ц3П1 БПЛА4 → Ц2П2
$T_0 + \Delta t$		Полетное задание переформировано: БПЛА1 → Ц1П3 БПЛА2 → Ц3П1 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 БПЛА4 → Ц3П1
$T_0 + 2\Delta t$		Полетное задание переформировано: БПЛА1 потерян БПЛА2 → Ц1П3 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 Полетное задание выполнено: БПЛА4 → Ц3П1

Окончание табл. 2

1	2	3
$T_0 + 3\Delta t$	<p style="text-align: center;">ЦЗП1 △ БПЛА4</p> <p style="text-align: center;">Ц1П3 △ БПЛА2</p> <p style="text-align: center;">Ц2П2 △ БПЛА3 (огр. ТТХ)</p>	<p>Полетное задание выполнено: БПЛА2 → Ц1П3 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 БПЛА4 → ЦЗП1</p>

Заключение

Сформулированы этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов с учетом влияющих факторов, позволяющих эффективно скоординировать действия аппаратов внутри группы. Разработан алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов с учетом аппаратов с ограниченными ТТХ, обеспечивающий автономность группы при периодическом распределении целей для выполнения запланированных задач.

Список литературы

1. Горячев Н. В., Ергалиев Д. С., Полтавский А. В. [и др.]. Беспилотные летательные аппараты. Проблемы проектирования и эксплуатации : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 322 с.
2. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологии искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67–74.
3. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 70–76.
4. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13.
5. Меркулов В. И., Харьков В. П., Шамаров Н. Н. Оптимизация коллективного управления группой беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 7.
6. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. [et al.]. Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings: 1. Vol. 2018-March. – Moscow, 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237
7. Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4 (36). С. 44–55.
8. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4 (32). С. 131–138.

References

1. Goryachev N.V., Ergaliev D.S., Poltavskiy A.V. et al. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Problemy proektirovaniya i ekspluatatsii: monografiya = Unmanned aerial vehicles. Problems of design and operation : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:322. (In Russ.)
2. Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V. Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: setting the task of applying artificial intelligence technology. *Problemy upravleniya = Problems of management*. 2022;(1):67–74. (In Russ.)
3. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.)
4. Khalimov N.R., Mefedov A.V. Distributed network-centric control system for a group of attack unmanned aerial vehicles. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2019;(3):1–13. (In Russ.)
5. Merkulov V.I., Khar'kov V.P., Shamarov N.N. Optimization of collective management of a group of unmanned aerial vehicles. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information measuring and control systems*. 2012;10(7). (In Russ.)
6. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. et al. Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data. *Moscow Workshop on Electronic and Networking*

Technologies, MWENT 2018 – Proceedings: 1. Vol. 2018-March. Moscow, 2018:1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237

7. Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):44–55. (In Russ.)
8. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):131–138. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Аскар Гадылшиевич Избасов

заместитель начальника военного института,
Военный институт сил воздушной обороны
(Республика Казахстан, г. Актобе,
ул. Алии Молдагуловой, 39 А)
E-mail: iag1973@mail.ru

Askar G. Izbasov

Deputy head of the Military Institute,
Military Institute of the Air Defense Forces of Aktobe
(39 A Aliya Moldagulova street, Aktobe,
Republic of Kazakhstan)

Павел Дмитриевич Головин

ведущий инженер кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: GPD75@yandex.ru

Pavel D. Golovin

Senior engineer of the sub-department
of radio design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Nikolay V. Goryachev

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

Игорь Иванович Кочегаров

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

Igor I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio design and production,
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 13.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.06.2024

Принята к публикации / Accepted 08.07.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР И ПРИБОРОВ

Е. А. Печерская¹, О. В. Карпанин², Д. Е. Нелюцкова³,
М. А. Нелюцков⁴, В. С. Александров⁵, А. Е. Журина⁶

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

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyuckovmihail@mail.ru, ⁵ vsalexrus@gmail.com, ⁶ gelya.zhurina@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объект исследования – автоматизированная измерительная система, предназначенная для измерения электрофизических параметров полупроводниковых структур и приборов. Предметом исследования являются вольт-амперные характеристики полупроводниковых структур и приборов. Цель работы – исследование вольт-амперных характеристик полупроводников на примере кремниевого транзистора КТ306А с помощью автоматизированной измерительной системы. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура автоматизированной измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов. Апробированы принципы работы следующих методов измерения полупроводниковых характеристик: вольтметра-амперметра, емкостного делителя, мостового и резонансного. *Результаты.* Выполнено исследование вольт-амперной характеристики кремниевого транзистора КТ306А с помощью автоматизированной измерительной системы. Показана возможность использования предложенного средства измерений для исследования вольт-амперных характеристик МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник) при использовании в качестве прозрачного проводящего оксида слоя диоксида олова, легированного сурьмой. *Выводы.* Рассмотрена структура автоматизированной измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводников. Представлены результаты апробации указанной системы при измерениях электрофизических параметров полупроводникового транзистора КТ306А, а также полученной авторами новой МДП-структуры на основе легированного сурьмой диоксида олова, синтезированного методом спрей-пиролиза.

Ключевые слова: автоматизированная измерительная система, полупроводниковые структуры и приборы, вольт-амперная характеристика, методы измерений электрофизические параметры полупроводников

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 23-29-00343).

Для цитирования: Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е., Нелюцков М. А., Александров В. С., Журина А. Е. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 32–40. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

RESEARCH OF VOLTAMPER CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND DEVICES

E.A. Pecherskaya¹, O.V. Karpanin², D.E. Nelyutskova³,
M.A. Nelyutskov⁴, V.S. Aleksandrov⁵, A.E. Zhurina⁶

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

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyuckovmihail@mail.ru, ⁵ vsalexrus@gmail.com, ⁶ gelya.zhurina@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of study is an automated measuring system designed to measure the electrical parameters of semiconductor structures and devices. The subject of the study is the current-voltage characteristics of semiconductor structures and devices. The purpose of the work is to study the current-voltage characteristics of semiconductors using the example of a КТ306А silicon transistor using an automated measuring system. *Materials and methods.* The structure of an automated measuring system for studying the current-voltage characteristics of semiconductor structures and devices is considered. The operating principles of the following methods for measuring semiconductor characteristics have been tested: voltmeter-ammeter, capacitive divider, bridge and resonant. *Results.* The volt-ampere characteristic of the КТ306А silicon transistor was studied using an automated measuring system. The possibility of using the proposed

measuring instrument to study the volt–ampere characteristics of TIR structures (metal–dielectric–semiconductor) when using a layer of tin dioxide doped with antimony as a transparent conductive oxide is shown. *Conclusions.* The structure of an automated measuring system for studying the volt–ampere characteristics of semiconductors is considered. The results of the approbation of this system are presented when measuring the electrophysical parameters of the KT306A semiconductor transistor, as well as the new metal–dielectric–semiconductor structure obtained by the authors based on antimony-doped tin dioxide synthesized by spray pyrolysis.

Keywords: automated measuring system, semiconductor structures and devices, current-voltage characteristics, methods of measuring electrophysical parameters of semiconductors

Financing: the work was supported by the Russian Science Foundation, № 23-29-00343.

For citation: Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E., Nelyutskov M.A., Aleksandrov V.S., Zhurina A.E. Research of voltampere characteristics of semiconductor structures and devices. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):32–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

Введение

Актуальность исследования электрофизических параметров полупроводниковых структур и приборов в настоящее время возрастает в связи с их широким применением в элементах функциональной электроники. В микро- и нанoeлектронике полупроводники используются при создании микросхем, процессоров, сенсоров [1], а также применяются для изготовления импульсных источников энергии [2]. В основу практически всех приложений в электронике и оптоэлектронике входят полупроводниковые устройства, так как именно транзисторы с высокой подвижностью электронов, биполярные транзисторы с гетеропереходом и кремниевые интегральные схемы доминируют в электронной промышленности [3]. Формирование одномерных структур – полупроводниковых нанопроволок, которые используются для потенциального применения в оптоэлектронных устройствах, описано в работе [4]. В приборостроении полупроводниковые структуры применяются для создания различных приборов и сенсоров, таких как фотодиоды, лазеры, фоторезисторы и т.д.

Понимание и контроль электрофизических параметров полупроводников позволяет разрабатывать более эффективные и мощные устройства, а также повышать их производительность и надежность. Например, в работе [5] представлена подробная информация о влиянии температуры на энергетическую зону МОП-транзистора, что позволило сформировать изменение его параметров (плотность носителей, подвижность, диффузия носителей, насыщение по скорости, плотность тока, пороговое напряжение) для дальнейшего его применения в различных секторах современной электроники. Примером также может служить использование полупроводниковых материалов в солнечных батареях, где оптимизация длины волны поглощаемого света и эффективности преобразования энергии света может привести к разработке более эффективных и экономически выгодных солнечных панелей [6].

Таким образом, экспериментальные исследования параметров полупроводниковых приборов и структур могут привести к обнаружению новых и интересных направлений их использования. Это связано с тем, что полупроводниковые структуры и приборы имеют уникальные электрические и оптические свойства, которые могут быть оптимизированы и настроены путем контроля и изменения различных параметров, таких как примеси, размеры и форма структур, температура окружающей среды и др. Поэтому важно повышать точность измерений параметров полупроводниковых структур и приборов.

Материалы и методы

В настоящее время широко применяются следующие методы измерения параметров полупроводниковых структур и приборов:

1. Метод вольтметра-амперметра.

Данный метод измерений направлен на исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых структур и приборов: к измеряемому объекту (электродам полупроводника) подключают генераторы тока или напряжения, что позволяет изменять значение подаваемой величины (напряжения или тока). Далее с помощью измерительных устройств (вольтметра и амперметра) выполняют измерения значений токов и напряжения в цепях полупроводникового прибора при различных значениях управляющих источников. По полученным данным строится ВАХ исследуемого объекта, по которой косвенным методом измерения определяются параметры полупроводника [7].

2. Резонансный метод.

В состав колебательного контура, резонансную частоту которого нужно определить, включают два элемента – образцовый и измерительный. На первом этапе данного метода колебательный контур приводят в резонансное состояние, которое достигается изменением частоты при некотором значении емкости образца по средству ГВЧ (генератора высоких частот). Далее (на втором этапе) происходит параллельное подключение измерительного и образцового конденсаторов. Резонанс колебательного контура достигается за счет изменения емкости образцового конденсатора при частоте, что и на первом этапе. Зная показания двух емкостей и частоту резонанса аналитически определяют другие параметры исследуемого объекта [6].

3. Мостовой метод.

Данный метод основывается на сравнении исследуемого образца с мерой. В состоянии равновесия моста, которое достигается при условии равенства модулей комплексных сопротивлений противолежащих плеч и при равенстве фазовых сдвигов между током и напряжением в каждом плече, напряжение в диагонали моста достигает значения своего минимума (не превышает значения тестового сигнала напряжения). Если функция преобразования емкости в напряжение не имеет экстремумов при всех возможных значениях аргумента, то это означает, что у нее отсутствуют максимумы или минимумы. Производная этой функции быстро убывает с ростом аргумента, но не меняет своего знака, т.е. она может быть отрицательной, но не достигает нуля. Такое поведение функции может указывать на то, что преобразование емкости в напряжение описывается монотонно убывающей функцией, т.е. с ростом емкости значение напряжения уменьшается. Зная данную зависимость, можно найти параметры исследуемого полупроводника [6–9].

4. Метод емкостного делителя.

Суть данного метода состоит в следующем: входное тестовое напряжение поступает на делитель напряжения, который состоит из измеряемой и эталонной емкостей. Напряжение на эталонной емкости снижается при увеличении измеряемой емкости. Также в цепь включают измерительный резистор, на котором с помощью вольтметра определяют значение падения напряжения. Максимальная точность измерения данным методом обеспечивается подбором соответствующих значений измерительной и эталонной емкостей для оптимального падения напряжения. Таким образом, путем изменения эквивалентной емкости и измерения падения напряжения на резисторе можно определить значение эквивалентной емкости полупроводникового прибора, по средством которой происходит расчет остальных параметров исследуемого объекта [6].

В данной статье рассмотрено измерение вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов с помощью автоматизированной измерительной системы.

Структура и принцип работы автоматизированной измерительной системы

Структурная схема автоматизированной измерительной системы представлена на рис. 1.

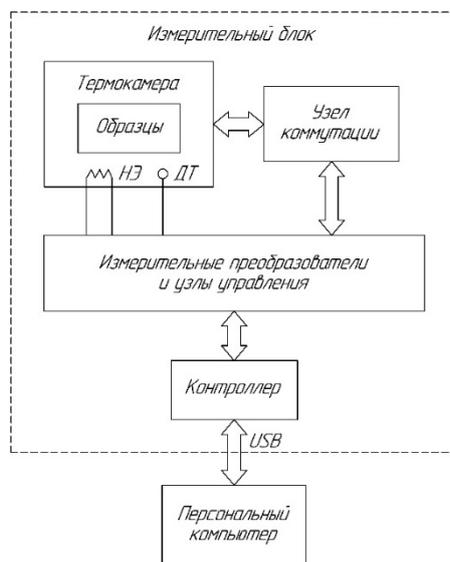


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной измерительной системы для измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов

Аппаратная часть данного устройства состоит из измерительного блока, с помощью которого осуществляются различные измерения и тесты. Он оснащен набором сменных кассет (модулей исследуемых объектов и схем), необходимых для проведения конкретных измерений или испытаний. Также в состав измерительной системы входит компьютер для обеспечения связи пользователя с интерфейсом и программным обеспечением, которое необходимо для настройки, запуска и анализа измерений. Полученные и обработанные данные сохраняются в табличном и графическом представлении [9].

Исследуемые образцы располагаются на сменных кассетах вместе с датчиком температуры (ДТ). Для увеличения температуры образца кассету помещают в термокамеру, в состав корпуса которой входит нагревательный элемент (НЭ). Узел коммутации выполняет функцию переключения между различными образцами, которые могут быть сохранены на сменной кассете. Он позволяет выбирать определенный образец и включать его в измерительную схему для проведения необходимых исследований или измерений [9].

Для получения и преобразования данных в процессе измерений применяются измерительные преобразователи. Обработка полученных данных осуществляется с помощью контроллера. Узлы управления отвечают за управление источниками тока и напряжения, а также могут управлять работой термокамеры, которая контролирует и поддерживает определенную температуру во время измерения. Контроллер состоит из микропроцессорного модуля и устройств ввода/вывода данных, которые обеспечивают возможность подключения и управления датчиками. Контроллер шины USB обеспечивает подключение контроллера к компьютеру посредством интерфейса USB. Это позволяет передавать данные между контроллером и компьютером для дальнейшей обработки и анализа.

Программное обеспечение (ПО) осуществляет автоматизированные измерения электрических параметров полупроводниковых структур и приборов, что в свою очередь позволяет сократить время измерительного процесса. Также ПО осуществляет корректировку инструментальных погрешностей измерительных преобразователей и выполняет измерение характеристик полупроводников косвенным методом.

Результаты

Исследование вольт-амперных характеристик выполнено на примере полупроводникового транзистора КТ306А (кремниевый *p-n-p*-переход). Для этого исследуемый образец подключен к автоматизированной измерительной системе, после выполнения измерений получены результаты, сведенные в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения напряжений и токов на транзисторе КТ306А

$U_{бэ}, В$	$I_{э}, мА$	$I_{кас}, мА$	$U_{бэ}, В$	$I_{э}, мА$	$I_{кас}, мА$
1	2	3	4	5	6
0,80	6,86	6,8499 E0	0,39	0,00	-1,999 E1
0,78	5,45	5,7922 E0	0,38	0,00	-2,1048 E1
0,77	4,16	4,7014 E0	0,36	0,00	-2,2139 E1
0,75	3,14	3,6436 E0	0,34	0,00	-2,3197 E1
0,73	2,28	2,5528 E0	0,33	0,00	-2,4254 E1
0,72	1,60	1,4951 E0	0,31	0,00	-2,5345 E1
0,70	1,04	4,0428 E-1	0,29	0,00	-2,6403 E1
0,69	0,67	-6,5347 E-1	0,28	0,00	-2,7494 E1
0,67	0,41	-1,7112 E0	0,26	0,00	-2,8552 E1
0,65	0,23	-2,802 E0	0,24	0,00	-2,9642 E1
0,64	0,13	-3,8598 E0	0,23	0,00	-3,07 E1
0,62	0,07	-4,9506 E0	0,21	0,00	-3,1791 E1
0,60	0,04	-6,0083 E0	0,20	0,00	-3,2849 E1
0,59	0,02	-7,0991 E0	0,18	0,00	-3,3939 E1
0,57	0,01	-8,1569 E0	0,16	0,00	-3,4997 E1
0,56	0,00	-9,2477 E0	0,15	0,00	-3,6088 E1
0,54	0,00	-1,0305 E1	0,13	0,00	-3,7146 E1
0,52	0,00	-1,1396 E1	0,11	0,00	-3,8237 E1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
0,51	0,00	-1,2454 E1	0,10	0,00	-3,9294 E1
0,49	0,00	-1,3545 E1	0,08	0,00	-4,0385 E1
0,47	0,00	-1,4603 E1	0,07	0,00	-4,1443 E1
0,46	0,00	-1,5693 E1	0,05	0,00	-4,2534 E1
0,44	0,00	-1,6751 E1	0,03	0,00	-4,3591 E1
0,42	0,00	-1,7842 E1	0,02	0,00	-4,4682 E1
0,41	0,00	-1,89 E1	0,00	0,00	-4,574 E1

Примечания: $U_{бэ}$ – напряжение база-эмиттер транзистора, В; $I_{э}$ – ток, протекающий через эмиттер транзистора, мА; $I_{кас}$ – ток каскада, мА

Получив значения, представленные в табл. 1, было произведено сравнение реальной ВАХ транзистора с идеальной (рис. 2); приведена зависимость статического и дифференциального сопротивления от тока для исследуемого образца (рис. 3); выявлена температурная зависимость ВАХ транзистора при различных ее значениях (рис. 4).

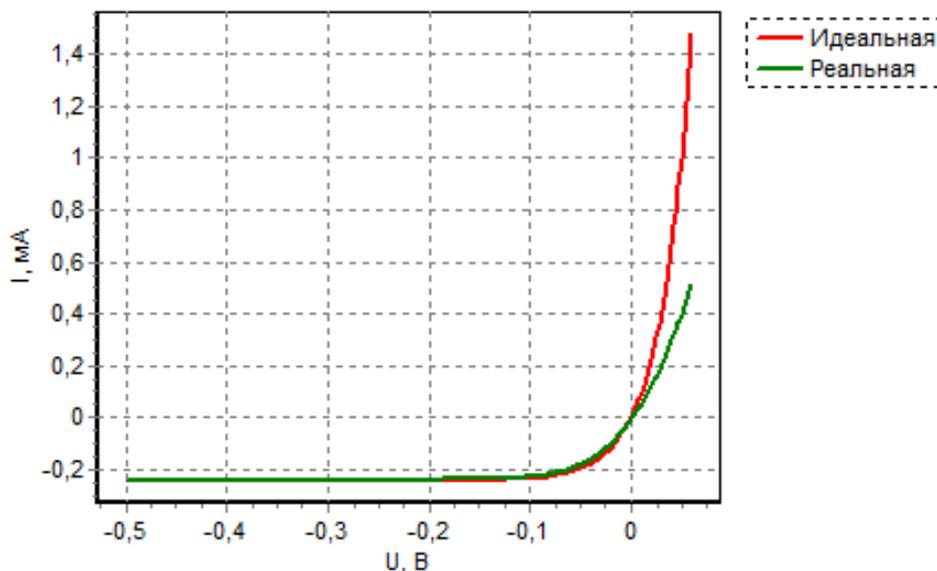


Рис. 2. Реальная и идеальная ВАХ кремниевого транзистора КТ306А

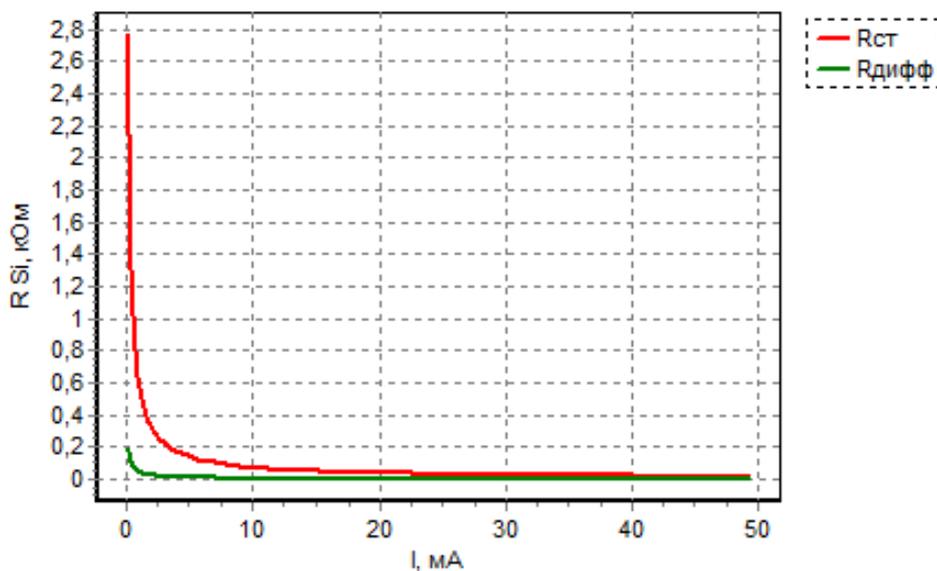


Рис. 3. Зависимость статического и дифференциального сопротивления от тока для кремниевого транзистора

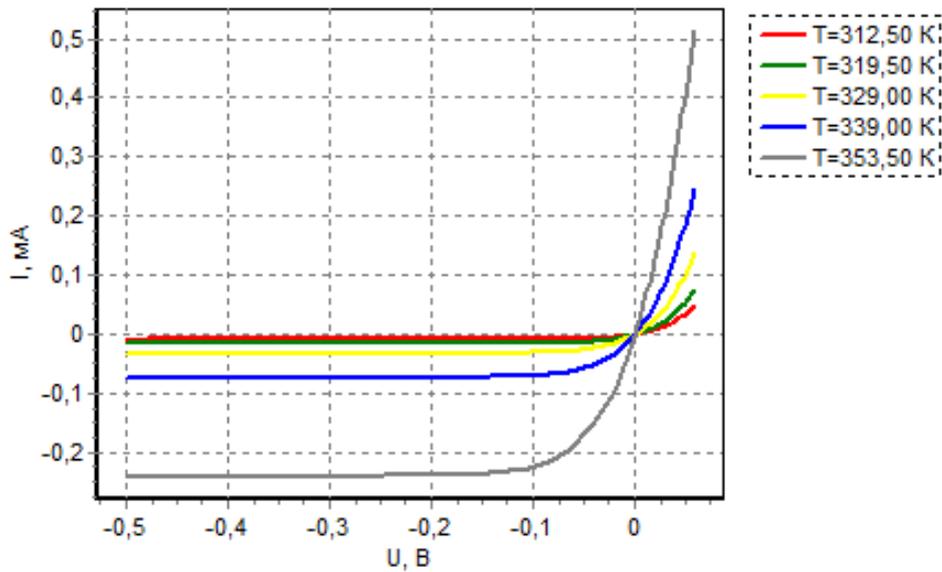


Рис. 4. Зависимость ВАХ транзистора при различных значениях температуры

Помимо исследования ВАХ устройств функциональной электроники, рассматриваемая система способна производить измерения зависимости тока от напряжения у более сложных структур, а именно в МДП-структуре (металл-диэлектрик-полупроводник) при использовании в качестве прозрачного проводящего оксида (ППО) слоя диоксида олова [10–12], легированного сурьмой. Результат исследования такой структуры изображен на рис. 5.

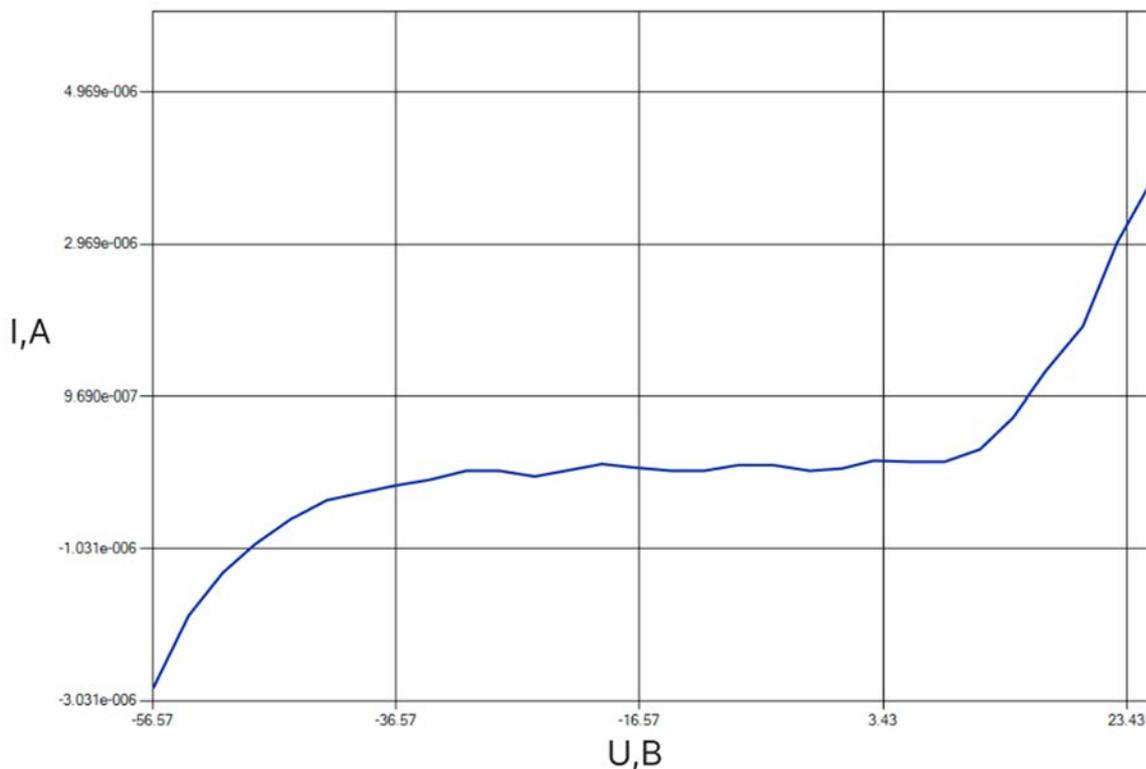


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика полученной МДП-структуры на основе прозрачного проводящего оксида

ППО характеризуются высокой способностью проводить ток и оптической прозрачностью. Изначально такие вещества являются диэлектриками, однако из-за кислородных вакансий и наличия межузельных атомов кристалла они проявляют полупроводниковые свойства [10].

Заключение

Результаты измерений вольт-амперных характеристик полупроводников позволяют определить ряд важных параметров и характеристик, таких как:

– проводимость: высокая проводимость может указывать на хорошую кристаллическую структуру и малое количество дефектов в полупроводнике;

– пороговое напряжение: на основе вольт-амперных характеристик возможно определение порогового напряжения, необходимого для начала протекания тока через полупроводник. Этот параметр может быть важным для правильного функционирования полупроводниковых устройств;

– электрическое сопротивление: вольт-амперная характеристика позволяет определить сопротивление полупроводникового устройства (структуры), что важно для расчета электрических цепей и оптимального проектирования устройств;

– температурная зависимость параметров полупроводников, что позволяет проводить анализ и оптимизацию работы полупроводниковых приборов при различных условиях окружающей среды;

– граница насыщения: пользуясь вольт-амперной характеристикой, можно определить точку, в которой дополнительное увеличение напряжения не приводит к дальнейшему увеличению тока, что используется при проектировании и использовании полупроводниковых устройств.

Таким образом, ВАХ полупроводников является важным инструментом для определения различных параметров полупроводниковых структур и устройств, что в свою очередь позволяет оптимизировать их производство и использование в различных областях электроники и микроэлектроники.

Список литературы

1. Bronovets M. A., Volodin N. M., Mishin Yu. N. New materials in semiconductor tensometry // *Materials Letters*. 2022. Т. 267. Р. 127467.
2. Leech P., Ressel P. Application to Semiconductor Devices // *Surface Analysis Methods in Materials Science*. 2003. Р. 435–454. doi: 10.1007/978-3-662-05227-3_18
3. Shammass N. Y. A., Chamund D., Taylor P. Advances in semiconductor devices and their growing use in electrical circuits and systems // *12th WSEAS International Conference on CIRCUITS (Heraklion, Greece, July 22–24, 2008)*. Heraklion, 2008. Р. 373–384.
4. Barth S., Hernandez-Ramirez F., Holmes J. D., Romano-Rodriguez A. Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors // *Progress in Materials Science*. 2010. Vol. 55, iss. 6. Р. 563–627.
5. Rahman M. A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors // *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. 2014. Vol. 7, № 1. Р. 50–70.
6. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М., 1985.
7. Павлов Л. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. 239 с.
8. Демидов А. А., Рыбалка С. Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) // *Прикладная математика & физика*. 2021. № 1. С. 53–72.
9. Метальников А. М., Карпанин О. В., Чайкин М. С. Аппаратное и программное обеспечение автоматизированной обучающей системы для исследования вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов // *Молодой ученый*. 2019. № 50. С. 118–121.
10. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ электрофизических параметров пленок прозрачных проводящих оксидов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 1. С. 73–80.
11. 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.
12. Печерская Е. А., Семенов А. Д., Зинченко Т. О. [и др.]. Система автоматического регулирования температуры подложки в составе установки для получения пленочного материала методом спрей-пирилиза // *Измерительная техника*. 2024. Т. 73, № 5. С. 41–47.

References

1. Bronovets M.A., Volodin N.M., Mishin Yu.N. New materials in semiconductor tensometry. *Materials Letters*. 2022;267:127467.
2. Leech P., Ressel P. Application to Semiconductor Devices. *Surface Analysis Methods in Materials Science*. 2003:435–454. doi: 10.1007/978-3-662-05227-3_18
3. Shammam N.Y.A., Chamund D., Taylor P. Advances in semiconductor devices and their growing use in electrical circuits and systems. *12th WSEAS International Conference on CIRCUITS (Heraklion, Greece, July 22–24, 2008)*. Heraklion, 2008:373–384.
4. Barth S., Hernandez-Ramirez F., Holmes J. D., Romano-Rodriguez A. Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors. *Progress in Materials Science*. 2010;55(6):563–627.
5. Rahman M.A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. 2014;7(1):50–70.
6. Batavin V.V., Kontsevoy Yu.A., Fedorovich Yu.V. *Izmerenie parametrov poluprovodnikovyykh materialov i struktur = Measurement of parameters of semiconductor materials and structures*. Moscow, 1985. (In Russ.)
7. Pavlov L. *Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovyykh materialov. 2-e izd., pererab. i dop. = Methods of measuring parameters of semiconductor materials. 2nd ed., reprint. and add.* Moscow: Vyssh. shk., 1987:239. (In Russ.)
8. Demidov A.A., Rybalka S.B. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020–2030). *Prikladnaya matematika & fizika = Applied Mathematics & Physics*. 2021;(1):53–72. (In Russ.)
9. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated training system for the study of current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)
10. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Kondrashin V.I. et al. Analysis of electrophysical parameters of films of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(1):73–80. (In Russ.)
11. 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.)
12. Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Zinchenko T.O. et al. The system of automatic temperature control of the substrate as part of the installation for obtaining film material by spray pyrolysis method. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2024;73(5):41–47. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Олег Валентинович Карпанин

заведующий службой калибровки и ремонта,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Oleg V. Karpanin

Head of calibration and repair service,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Диана Евгеньевна Нелюцкова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Diana E. Nelyutskova

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

Михаил Александрович Нелюцков

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nelyuckovmihail@mail.ru

Mikhail A. Nelyutskov

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

Владимир Сергеевич Александров

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

Vladimir S. Aleksandrov

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

Ангелина Евгеньевна Журина

инженер-исследователь кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gelya.zhurina@mail.ru

Angelina E. Zhurina

Research engineer of the 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 24.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.07.2024

Принята к публикации/Accepted 12.08.2024

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 620.1.08

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Е. А. Печерская¹, О. В. Карпанин², Д. Е. Тузова³,
М. А. Нелюцков⁴, А. А. Данилов⁵, Д. В. Артамонов⁶

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

⁵ Пензенский центр стандартизации, метрологии и сертификации, Пенза, Россия

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyuckovmihail@mail.ru, ⁵ aa-dan@mail.ru, ⁶ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Структуры на основе полупроводниковых материалов находят широкое применение в устройствах нано- и микроэлектроники. Одно из перспективных направлений связано с получением и исследованием прозрачных проводящих пленок и структур на их основе. Целью данного исследования является разработка автоматизированной информационно-измерительной системы для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур. *Материалы и методы.* Информационно-измерительная система предназначена для исследования вольт-амперных характеристик различных полупроводниковых структур, в том числе прозрачных проводящих покрытий, полученных методом спрей-пиролиза на стеклянных подложках. *Результаты.* Представлена структура измерительного блока автоматизированной информационно-измерительной системы, в состав которой входят каналы измерения напряжения и силы тока на исследуемой структуре, а также термокамера, что позволяет исследовать температурные зависимости электрических параметров полупроводниковых компонентов. *Выводы.* Изложена методология измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур, которая апробирована при исследовании прозрачных проводящих покрытий, синтезированных на основе спрей-пиролиза. Автоматизация измерительных процедур позволила достичь снижения временных затрат на измерительный процесс и исключения субъективных составляющих погрешностей измерений.

Ключевые слова: автоматизированные измерения, информационно-измерительная система, вольт-амперная характеристика, полупроводник

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 23-29-00343).

Для цитирования: Печерская Е. А., Карпанин О. В., Тузова Д. Е., Нелюцков М. А., Данилов А. А., Артамонов Д. В. Автоматизированная информационно-измерительная система для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 41–46. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

AUTOMATED INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MEASUREMENT OF VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES

E.A. Pecherskaya¹, O.V. Karpanin², D.E. Tuzova³,
M.A. Nelyutskov⁴, A.A. Danilov⁵, D.V. Artamonov⁶

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

⁵ The State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing, Penza, Russia

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyutkovmihail@mail.ru, ⁵ aa-dan@mail.ru, ⁶ dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* Structures based on semiconductor materials are widely used in nano- and microelectronics devices. One of the promising directions is related to the production and research of transparent conductive films and structures based on them. The purpose of this study is to develop an automated information and measurement system for measuring the volt-ampere characteristics of semiconductor structures. *Materials and methods.* The information and measurement system is designed to study the volt-ampere characteristics of various semiconductor structures, including transparent conductive coatings obtained by spray pyrolysis on glass substrates. *Results.* The structure of the measuring unit of an automated information and measurement system is presented, which includes voltage and current measurement channels on the structure under study, as well as a thermal chamber, which allows us to study the temperature dependences of the electrical parameters of semiconductor components. *Conclusions.* A methodology for measuring the volt-ampere characteristics of semiconductor structures is described, which has been tested in the study of transparent conductive coatings synthesized on the basis of spray pyrolysis. Automation of measurement procedures has made it possible to reduce the time spent on the measuring process and eliminate the subjective components of measurement errors.

Keywords: automated measurements, information-measuring system, current-voltage characteristics, semiconductor

Financing: the work was supported by the Russian Science Foundation (RGNF grant 23-29-00343).

For citation: Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Tuzova D.E., Nelyutskov M.A., Danilov A.A., Artamonov D.V. Automated information-measuring system for measurement of voltage characteristics of semiconductor structures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):41–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

Введение

Актуальность измерения электрофизических параметров полупроводниковых структур обусловлена их широким применением во многих областях промышленности, в частности, электронике и приборостроении. Из рассматриваемых структур производят различные компоненты и изделия. Например, с помощью полупроводников изготавливаются светоизлучающие устройства, тонкопленочные транзисторы и сверхбыстрые фотодетекторы, быстродействующие диоды [1]. На основе пористых полупроводниковых структур, обладающих прочностью, химической инертностью ко многим веществам и большим сроком службы, создают газовые сенсоры [2].

Особую популярность полупроводниковые структуры находят в оптоэлектронике. Работа [3] посвящена созданию мощных и долговечных суперлюминесцентных диодов на основе самоорганизующихся полупроводниковых наноструктур. Они способствуют улучшению контроля размера, длины волны и плотности излучения оптоэлектронных устройств. В статье [4] описана работа оптоэлектронных детекторов, изготовленных из полупроводниковых структур, которые отвечают современным требованиям, предъявляемым к данным устройствам, а именно: время жизни и подвижность электронов, удельное сопротивление.

Полупроводники на основе арсенида галлия применяются для работы на высоких частотах. Именно из них был изготовлен новый модуль питания, обладающий высокой надежностью [5]. Бесперебойный блок питания, разработанный на основе полупроводников, имеет высокую надежность и эффективность работы [6].

Методом спрей-пиролиза возможно получение прозрачных проводящих полупроводниковых пленок на основе различных легированных оксидов, например, оксида цинка, легированного алюминием; диоксида олова, легированного сурьмой и других материалов [7–11].

Таким образом, с развитием промышленности пришла необходимость в поиске новых полупроводниковых структур, обладающих высокой производительностью и экономической

эффективностью. Для этого нужно использовать новые методы и средства для исследований полупроводниковых структур, которые в совокупности смогут обеспечить высокую надежность и точность измерений их электрофизических параметров. Экспериментальные исследования позволят учитывать сложную природу связей полупроводниковых структур, делать прогноз и анализ их свойств, предлагать новые инженерные решения, что играет важную роль в развитии современных технологий в науке.

Средство измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур

В качестве средства для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур авторами предложена автоматизированная информационно-измерительная система. Аппаратная часть данной системы состоит из персонального компьютера и измерительного блока (рис. 1).

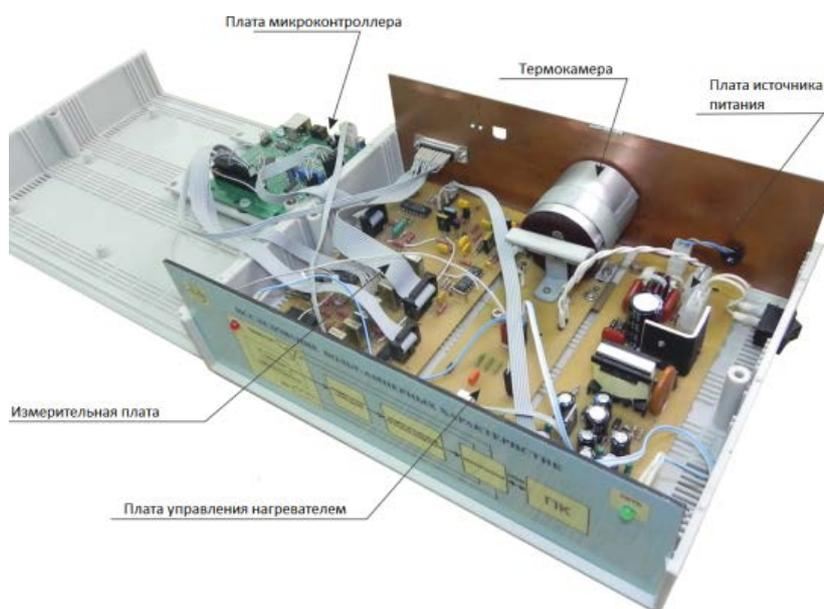


Рис. 1. Измерительный блок автоматизированной информационно-измерительной системы [7]

Измерительный блок автоматизированной информационно-измерительной системы отвечает за сбор информации о электрофизических параметрах полупроводниковых исследуемых образцов. Для удобства и простоты проведения эксперимента образцы представлены в виде сменных кассет, которые помещают в термокамеру, которая контролирует и поддерживает определенную температуру во время измерения. Помимо термокамеры в состав измерительного блока входит масштабирующий преобразователь, который служит для приведения полученного значения напряжения исследуемого образца к входной величине напряжения цифроаналогового преобразователя; микроконтроллер, подключаемый к измерительным образцам и персональному компьютеру; источник управляемого тока и напряжения, служащий для формирования нужной величины тока или напряжения на исследуемом полупроводниковом образце.

Персональный компьютер обеспечивает управление измерительным блоком, анализ и обработку полученной информации с помощью специального программного обеспечения, которое способно представить измеренные данные в графическом и табличном представлении. На рис. 2 изображено рабочее окно рабочей программы.

Основные метрологические и технические характеристики автоматизированной информационно-измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур следующие [11]:

- измеряемый диапазон напряжения на исследуемом образце от -100 В до $+100$ В;
- измеряемый диапазон тока на исследуемом образце от 50 нА до 50 мА;
- максимальная температура в термокамере до 120 °С;
- относительная погрешность измерения тока и напряжения не более $0,5$ %;
- абсолютное значение погрешности измерения термокамеры не более 1 °С;
- время измерения вольт-амперной характеристики не более 2 с.

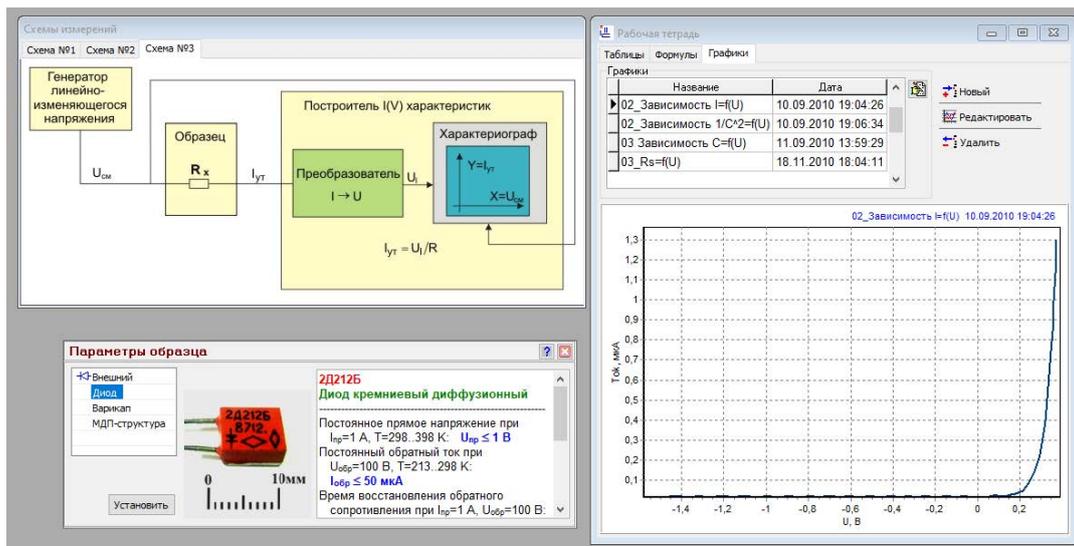


Рис. 2. Рабочее окно программы

Заключение

Рассмотренная автоматизированная информационно-измерительная система позволяет не только выполнять измерения параметров полупроводниковых образцов косвенным методом, но и производить их обработку. За счет автоматизации измерений наблюдается уменьшение временных затрат на измерительный процесс и исключаются субъективные погрешности измерений.

Изложенная методология измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур апробирована при исследовании прозрачных проводящих покрытий, полученных методом спрей-пиролиза. Автоматизированная информационно-измерительная система позволяет выполнять контроль качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих покрытий; экспериментально исследовать новые полупроводниковые структуры, в состав которых входят прозрачные проводящие слои; совершенствовать технологии для разработки инновационных полупроводниковых устройств; оптимизировать работу полупроводниковых приборов с учетом влияющих факторов (температуры, напряжения и др.).

Предложенная информационно-измерительная система использована для исследований вольт-амперных характеристик прозрачных проводящих оксидов, синтезированных методом спрей-пиролиза, а также структур металл-диэлектрик-полупроводник на их основе.

Список литературы

- Forrest S. R. Active optoelectronics using thin-film organic semiconductors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. Vol. 6, iss. 6. P. 1072–1083. doi: 10.1109/2944.902156
- Сычакова А. Я. Применение пористых полупроводников в качестве материала для изготовления газовых сенсоров // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1 (5). С. 169–171.
- Fangling Du, Anjin Liu, Hailing Wang. Unable Semiconductor Laser Based on Surface High-Order Bragg Gratings With 62×50 GHz Wavelength Tuning // IEEE Photonics Technology Letters. 2022. Vol. 34, iss. 19. P. 1019–1022. doi: 10.1109/LPT.2022.3198671
- Xu B., Key Z. G., Wang Y. H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices // 13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398;
- Anderson S., Berringer K., Romero G. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design // Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics. 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
- Zhang J., Zhou J., Wang Yu. A 2.2kV Organic Semiconductor-Based Lateral Power Device // IEEE Electron Device Letters. 2022. Vol. 43, iss. 2. P. 276–279. doi: 10.1109/LED.2021.3135699
- Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E. [et al.]. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. T. 16, № 6. С. 1315–1321.

8. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Novichkov M. D. [et al.]. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. Т. 16, № S3.1. P. 402–407.
9. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. Пенза, 2018. С. 256–258.
10. Ракша С. В., Кондрашин В. И., Печерская Е. А., Николаев К. О. Функциональные материалы для сенсibilизированных красителем солнечных элементов // *Физика и технология наноматериалов и структур* : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. С. 143–146.
11. Метальников А. М., Карпанин О. В., Чайкин М. С. Аппаратное и программное обеспечение автоматизированной обучающей системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов // *Молодой ученый*. 2019. № 50. С. 118–121.

References

1. Forrest S.R. Active optoelectronics using thin-film organic semiconductors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000;6(6):1072–1083. doi: 10.1109/2944.902156
2. Sychakova A.Ya. The use of porous semiconductors as a material for the manufacture of gas sensors. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy = Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergency situations*. 2014;(1):169–171. (In Russ.)
3. Fangling Du, Anjin Liu, Hailing Wang. Unable Semiconductor Laser Based on Surface High-Order Bragg Gratings With 62 × 50 GHz Wavelength Tuning. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2022;34(19):1019–1022. doi: 10.1109/LPT.2022.3198671
4. Xu B., Key Z.G., Wang Y.H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices. *13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials*. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398;
5. Anderson S., Berringer K., Romero G. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design. *Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*. 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
6. Zhang J., Zhou J., Wang Yu. A 2.2kV Organic Semiconductor-Based Lateral Power Device. *IEEE Electron Device Letters*. 2022;43(2):276–279. doi: 10.1109/LED.2021.3135699
7. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E. et al. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1315–1321.
8. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Novichkov M.D. et al. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023;16(S3.1):402–407.
9. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of materials used for the production of 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 articles of All Russia. inter-university. scientific.-practical conf.* Penza, 2018:256–258. (In Russ.)
10. Raksha S.V., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A., Nikolaev K.O. Functional materials for dye-sensitized solar cells. *Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur: sb. nauch. st. 2-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Physics and technology of nanomaterials and structures : collection of scientific articles of the 2nd International scientific and practical conference*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015:143–146. (In Russ.)
11. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated training system for the study of volt-ampere characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская
 доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедры информационно-
 измерительной техники и метрологии,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: iit@pnzgu.ru

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

Олег Валентинович Карпанин

заведующий службой калибровки и ремонта,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Диана Евгеньевна Тузова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Михаил Александрович Нелюцков

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nelyuckovmihail@mail.ru

Александр Александрович Данилов

доктор технических наук, профессор,
директор,
Пензенский центр стандартизации,
метрологии и сертификации
(Россия, г. Пенза, ул. Комсомольская, 20)
E-mail: aa-dan@mail.ru

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Oleg V. Karpanin

Head of calibration and repair service,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Diana E. Tuzova

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

Mikhail A. Nelyutskov

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

Aleksandr A. Danilov

Doctor of technical sciences, professor,
director,
The State Regional Center for Standardization,
Metrology and Testing
(20 Komsomolskaya street, Penza, Russia)

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
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 17.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.07.2024

Принята к публикации/Accepted 05.08.2024

УДК 658.5.011; 621.357.77
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. А. Максов¹, А. Д. Семенов², Е. А. Печерская³, П. Е. Голубков⁴, Д. В. Артамонов⁵

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

¹ maksov.01@mail.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы разработки структуры поддержки принятия решения при получении микродуговых оксидных (МДО) покрытий с требуемыми свойствами. В связи с повышенным интересом к использованию оксидных покрытий в различных отраслях промышленности, в том числе медицине и электронике, необходимо создание систем, позволяющих поддерживать и помогать человеку, принимающему решение во время МДО-обработки. Целью работы является применение современных методов, использование которых позволит получать оптимальные технологические режимы и требуемые свойства МДО-покрытий. *Материалы и методы.* Представлен подход к организации системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий. Новизна подхода заключается в применении современных методов оптимизации, работы с большим количеством данных, а также сложных математических моделей процессов и явлений при МДО-обработке. *Результаты.* Представлена обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений при получении покрытий на изделиях из металлов вентильной группы. Система, состоящая из взаимосвязанных элементов, имеет сложную структуру взаимодействия и влияния на качество и свойства формируемых покрытий. Выявлены факторы, влияющие на технологию получения оксидных покрытий и их свойства. *Вывод.* Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал важность дальнейших исследований в области построения структуры поддержки принятия решения при получении микродуговых оксидных покрытий с целью оптимизации технологического процесса и повышения их качества. Полученные результаты можно использовать при разработке цифрового двойника процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, система поддержки принятия решений, структура, база данных, имитационные модели

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования», № 123091800009-1.

Для цитирования: Максов А. А., Семенов А. Д., Печерская Е. А., Голубков П. Е., Артамонов Д. В. Структура системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 47–53. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

STRUCTURE OF A DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE PROCESS OF PRODUCING MICRO-ARC OXIDE COATINGS

A.A. Maksov¹, A.D. Semenov², E.A. Pecherskaya³, P.E. Golubkov⁴, D.V. Artamonov⁵

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

¹ maksov.01@mail.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* The issues of developing a decision support structure (DSS) for obtaining micro-arc oxide (MAO) coatings with the required properties are considered. Due to the increased interest in the use of oxide coatings in various industries, including medicine and electronics, it is necessary to create systems that can support and assist the decision maker during MAO processing. The goal of the work is to use modern methods, the use of which will allow obtaining optimal technological conditions and the required properties of MAO coatings. *Materials and methods.* An approach to organizing a decision support system in the process of producing oxide coatings is presented. The novelty of the approach lies in the use of modern optimization methods, working with large amounts of data, as well as complex mathematical models of processes and phenomena during MDO processing. *Results.* A generalized block diagram of a

decision support system for obtaining coatings on products made from valve group metals is presented. The system, consisting of interconnected elements, has a complex structure of interaction and influence on the quality and properties of the formed coatings. Factors influencing the technology for producing oxide coatings and their properties were identified. *Conclusion.* Analysis of the results obtained during the study showed that the importance of further research in the field of constructing DSS in the production of micro-arc oxide coatings in order to optimize the technological process and improve their quality. The results obtained can be used in the development of a digital twin of the microarc oxidation process.

Keywords: microarc oxidizing, decision support system, structure, database, simulation models

Financing: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Fundamentals of the digital twin of the technological process of formation of oxide coatings with specified properties by the method of microarc oxidation", No. 123091800009-1.

For citation: Maksov A.A., Semenov A.D., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Artamonov D.V. Structure of a decision support system in the process of producing micro-arc oxide coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):47–53. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

Введение

Создание высокопрочных покрытий, разработка отечественных интеллектуальных установок для получения микродуговых оксидных (МДО) покрытий на металлах вентильной группы (алюминий, титан, магний и др.) при помощи алгоритмов машинного обучения актуальны для многих отраслей промышленности, в том числе приборостроения, машиностроения. В работах [1–3] представлены результаты исследований по созданию цифрового двойника и систем поддержки принятия решений [4] в процессе получения оксидных покрытий с требуемыми свойствами. Получаемые оксидные покрытия благодаря своим повышенным эксплуатационным характеристикам используются в авиационной и космической сферах, машиностроении, нефтегазовой и текстильной промышленности, электронике, медицине и других областях.

Для помощи операторам и инженерам, использующим интеллектуальные установки для получения керамикоподобных покрытий, разрабатываются информационные системы, называемые системами поддержки принятия решений (СППР), с целью принятия оптимальных решений на различных этапах технологического процесса [5].

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой структуры системы поддержки принятия решений, которая позволяет осуществлять контроль процесса получения покрытий на легких металлах, а также находить оптимальные технологические режимы процесса и рассчитывать основные свойства формируемых МДО-покрытий.

Например, в работе [6] автором представлены структурная схема и алгоритм функционирования универсального измерительного канала информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса получения изделий с гетерогенной структурой.

Анализ литературных источников позволяет заключить, что исследователи в области построения СППР имеют различные точки зрения на структурирование и описание таких информационных систем. Тем не менее ключевыми структурными компонентами для таких систем, безусловно, являются информационно-управляющая система (ИУС) и система управления базами данных (СУБД), при этом имеется возможность использовать дополнительные элементы (модули).

Разработка структуры системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий

Предлагаемая структурная схема системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий (рис. 1) обобщенно включает следующие элементы: пользователь (оператор, инженер); информационно-управляющая система; система управления базами данных; исследовательская среда пользователя.

Отдельно рассмотрим элементы системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий, а также их функциональные возможности.

Главную роль в работе данной системы играет пользователь (инженер или оператор, использующий СППР), задача которого состоит в установке посредством пользовательского интерфейса – программного обеспечения – входных параметров системы: технологического тока,

напряжения, состава и концентрации используемого электролита и других параметров, влияющих на МДО-обработку.

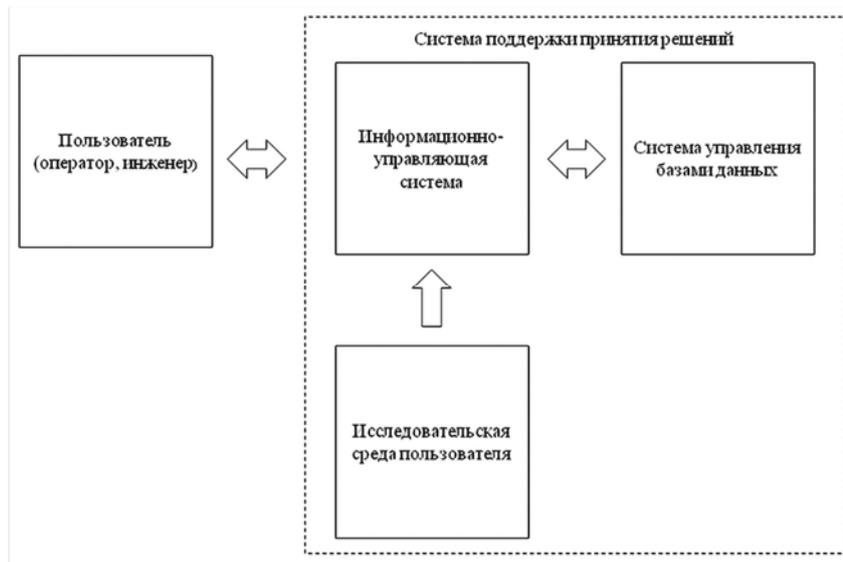


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий

В нашем случае информационно-управляющая система, приведенная на рис. 2, позволяет осуществлять контроль технологического процесса получения высокопрочных покрытий на металлах вентильной группы посредством сбора, анализа и обработки данных, а также применять методы оптимизации технологических параметров процесса с получением необходимых свойств покрытий.

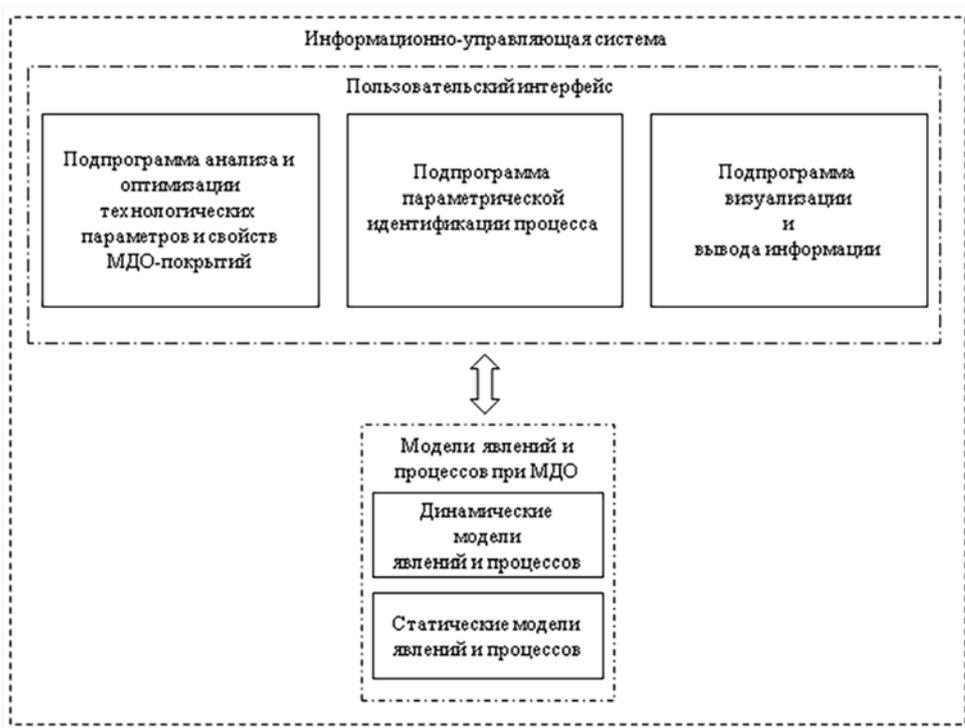


Рис. 2. Структура информационно-управляющей системы СППР

Интерфейс пользователя, как уже было ранее сказано, включает в себя программное обеспечение, содержащее три основные подпрограммы. Подпрограмма анализа и оптимизации технологических параметров и свойств МДО-покрытий помогает пользователю за счет введенных им исходных данных осуществлять выбор оптимальных параметров технологического режима,

которые необходимы для получения свойств покрытий, наиболее близких к заданным. При этом используется информация из баз данных технологических параметров и свойств МДО-покрытий. Подпрограмма параметрической идентификации МДО-процесса служит для определения параметров электрической схемы замещения гальванической ячейки, которые влияют на сопротивление и емкость покрытия. Эти параметры вычисляются на основе экспериментально измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) гальванической ячейки для выбранного технологического режима с использованием метода параметрической идентификации [8]. С помощью подпрограммы визуализации и вывода информации в целях достижения требуемых характеристик покрытий оператор может выполнять мониторинг изменений вольт-амперных характеристик гальванической ячейки за счет использования параметров, полученных подпрограммой параметрической идентификации. Подпрограмма, выявив отклонения экспериментально измеренных данных от расчетной вольт-амперной характеристики, подает соответствующее управляющее воздействие на источник технологического тока для минимизации этого отклонения. Кроме того, подпрограмма предоставляет информацию о свойствах формируемого покрытия, используемых технологических параметрах, а также позволяет наблюдать динамику изменения напряжения во времени.

Явления, происходящие в процессе роста покрытия, имеют сложный междисциплинарный характер и включают в себя электрохимические, микроплазменные, акустические, электрические и теплофизические явления, которые в совокупности определяют свойства покрытий. В идеальном случае при подборе оптимальных технологических параметров получения покрытий с заданными свойствами необходимо учитывать все эти явления. Для этого в ИУС применяются динамические и статические модели, описываемые сложными математическими выражениями и моделями.

Основу системы управления базами данных, структура которой представлена на рис. 3, составляет совокупность баз данных. Условно, содержимое данной системы можно разбить на три категории баз данных. В первой базе содержится информация о свойствах МДО-покрытий технологических параметрах и факторах, влияющих на процесс МДО [7]. В базе данных, связанной с теоретическими исследованиями, представлена информация о физико-химических закономерностях, которые используются при исследовании и моделировании процесса МДО, а также о существующих на данный момент математических выражениях, описывающих взаимосвязи между технологическими параметрами процесса МДО, свойствами и параметрами качества покрытий. В базу данных результатов экспериментальных исследований занесены сведения о методах и средствах измерения технологических параметров процесса МДО и свойств покрытий, их метрологических характеристиках, а также об используемых технологических режимах. Все базы данных, имеющиеся в системе, имеют возможность дополнения, что позволяет добавлять новые и уточнять существующие математические модели и технологические режимы процесса МДО, корректировать методы измерения, таким образом, совершенствуя работу всей системы.



Рис. 3. Структура система управления базами данных СППР

Исследовательская среда пользователя представляет собой инструментарий для проведения исследований и экспериментов с моделью МДО-процесса. Структура исследовательской среды показана на рис. 4.



Рис. 4. Структура исследовательской среды пользователя СППР

Пользователь в исследовательской среде может воспользоваться следующими видами экспериментов:

- 1) «Что если?» – эксперимент, позволяющий запускать модель процесса МДО и варьировать технологические параметры и значения свойств покрытий;
- 2) оптимизация – эксперимент, который позволяет находить оптимальные технологические режимы и свойства МДО-покрытий на основе максимизации или минимизации целевой функции, учитывая введенные ограничения;
- 3) анализ чувствительности – эксперимент, в ходе которого оценивается влияние одного из параметров модели на результаты моделирования.

Заключение

Предложена структура системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий, включающая синтез информационно-управляющей системы и системы управления базами данных, а также исследовательской среды, в которой оператор системы может проводить эксперименты и исследования над моделью МДО-процесса. Разработанная структура системы поддержки принятия решений предоставляет собой комплексную методологию и инструменты для оценки и выбора оптимальных вариантов получения оксидных покрытий, учитывая конкретные требования и условия процесса. Данная система позволяет значительно повысить эффективность и точность принятия решений в области гальванотехники и обеспечить достижение желаемых результатов в процессе получения микродуговых оксидных покрытий.

Список литературы

1. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В. [и др.]. Метрологический анализ канала измерения импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4 (38). С. 41–50.
2. Pecherskaya E., Semenov A., Golubkov P. [et al.]. Parametric identification of the mathematical model of the micro-arc oxidation process // Heliyon. 2023. Vol. 9. P. e19995.
3. Pecherskaya E. A., Semenov A. D., Golubkov P. E. Simulation of electrical parameters of a galvanic cell in the process of microarc oxidation // Frontier Materials & Technologies. 2023. Vol. 4. P. 73–85.
4. Pecherskaya E., Tsylin B., Yaroslavtseva D. [et al.]. Modern trends in the development of decision support systems based on data mining // CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS. 2021. Vol. 2843.
5. Ломакин В. В., Зайцев Т. В., Путивцева Н. П. [и др.]. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Экономика. Информатика. 2016. № 23 (244). С. 124–133.
6. Баранов В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 20–29.
7. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Gurin S. A. [et al.]. Influence of process parameters on the properties of microarc oxide coatings // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, № S3.1. P. 368–373.

8. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.

References

1. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V. et al. Metrological analysis of the channel for measuring the impedance of a galvanic cell in the process of microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):41–50. (In Russ.)
2. Pecherskaya E., Semenov A., Golubkov P. et al. Parametric identification of the mathematical model of the micro-arc oxidation process. *Heliyon.* 2023;9:e19995.
3. Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Golubkov P.E. Simulation of electrical parameters of a galvanic cell in the process of microarc oxidation. *Frontier Materials & Technologies.* 2023;4:73–85.
4. Pecherskaya E., Tsybin B., Yaroslavtseva D. et al. Modern trends in the development of decision support systems based on data mining. *CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS.* 2021;2843.
5. Lomakin V.V., Zaytsev T.V., Putivtseva N.P. et al. Implementation of decision support in the management of the microarc oxidation process based on artificial neural networks. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Informatika = Scientific Bulletin of Belgorod State University. Ser.: Economics. Computer science.* 2016;(23):124–133. (In Russ.)
6. Baranov V.A. Information and control system for active control of technological processes for the production of products with a heterogeneous structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):20–29. (In Russ.)
7. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Gurin S.A. et al. Influence of process parameters on the properties of microarc oxide coatings. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 2023;16(S3.1):368–373.
8. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics.* 2019; 24(4):363–369. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Анатольевич Максов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: maksov.01@mail.ru

Andrey A. Maksov

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

Анатолий Дмитриевич Семенов

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

Anatoliy D. Semenov

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Павел Евгеньевич Голубков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-измерительная
техника и метрология,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

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

Дмитрий Владимирович Артамонов
доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Dmitry V. Artamonov
Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
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 20.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 17.06.2024

Принята к публикации/Accepted 08.07.2024

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАСХОДОМЕРОВ И СЧЕТЧИКОВ ЖИДКОСТИ

А. Э. Шафигина¹, А. И. Сойко²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д. И. Менделеева, Казань, Россия

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева, Казань, Россия

¹ shafigina.98@mail.ru, ² alexsoiko@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Метрологическая надежность средств измерений параметров потока, расхода и объема жидкости (далее – средств измерений, расходомеры и счетчики жидкости) является важным критерием при выборе средств измерений при учете энергоресурсов, определяет срок эксплуатации средств измерений и влияет на точность и достоверность измерений. Целью работы является анализ предметной области при оценке метрологической надежности расходомеров и счетчиков жидкости в сфере учета энергоресурсов. *Методы.* Анализ существующих нормативных документов, сравнение методов расчета и определения показателей метрологической надежности, отраженных в научных трудах, и их связь с установлением интервалов между поверками. Рассмотрены особенности разработки методик испытаний для определения показателей метрологической надежности. *Результаты и выводы.* Сделан вывод о необходимости разработки нормативных документов, которые были бы основой для разработки групповых и индивидуальных методик проведения ресурсных испытаний средств измерений, проанализированы основные подходы к определению показателей метрологической надежности и их особенности применения. Проанализирована возможность применения результатов ресурсных испытаний при установлении динамических интервалов между поверками.

Ключевые слова: метрологическая надежность, расходомеры, счетчики жидкости, средства измерений, интервал между поверками, ресурсные испытания

Для цитирования: Шафигина А. Э., Сойко А. И. Актуальные проблемы оценки метрологической надежности расходомеров и счетчиков жидкости // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 54–63. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-7

CURRENT PROBLEMS OF ASSESSING METROLOGICAL RELIABILITY OF FLOW METERS AND LIQUID METERS

A.E. Shafigina¹, A.I. Soyko²

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Flowmetry – branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology, Kazan, Russia

^{1,2} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

¹ shafigina.98@mail.ru, ² alexsoiko@yandex.ru

Abstract. *Background.* Metrological reliability of measuring instruments for flow, flow and volume parameters of liquid is an important criterion in process of choosing measuring instruments; determines the service life of measuring instruments and affects the accuracy and reliability of measurements. The purpose of the work is to analyze the subject area in assessing the metrological reliability of flow meters and liquid meters in the field of energy accounting. *Materials and methods.* Analysis of existing regulatory documents, comparison of methods for calculating and determining metrological reliability indicators reflected in scientific papers, and their connection with the establishment of intervals between verifications. The features of the development of test methods for determining metrological reliability indicators are considered. *Results and conclusion.* A conclusion is made about the need to develop regulatory documents that would be the basis for the development of group and individual methods for conducting life tests of measuring instruments, the main approaches to determining metrological reliability indicators and their application features are analyzed. The possibility of using the results of life tests when establishing dynamic intervals between verifications is analyzed.

Keywords: metrological reliability, flow meters, liquid meters, measuring instruments, interval between verifications, life tests

For citation: Shafigina A.E., Soyko A.I. Current problems of assessing metrological reliability of flow meters and liquid meters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):54–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-7

Учет энергоресурсов составляет важную часть процесса управления технологическими режимами производства, в том числе коммерческую составляющую процесса. Расходомеры и счетчики жидкости (далее – СИ) имеют значительное влияние на коммерческий учет энергоресурсов, например, в нефтяной промышленности, так как любое отклонение от установленных значений количества и расхода жидкости влияет на размер экономических потерь [1, 2]. Учитывая такую роль СИ, возникает вопрос об определении критериев при выборе конкретного типа СИ.

В большинстве случаев в качестве СИ применяются счетчики – приборы или устройства, измеряющие расход и количество жидкости, газа или пара, или расходомеры – приборы или устройства из нескольких частей, измеряющие расход вещества (жидкости, газа или пара) [1]. Одними из важнейших требований при выборе СИ являются точность измерений, метрологическая надежность (далее – МН) СИ в части сохранения ее метрологической исправности¹, а также возможность использования его в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений. Вопросы оценки МН осязаны в работах [3–15], что показывает важность учета показателей МН и дальнейших их исследований. Кроме этого, необходимо учитывать стоимость эксплуатации СИ, характер производства (серийное, единичное), параметры измеряемой среды и т.д.

В сфере государственного регулирования в настоящее время имеется более 1500 различных типов СИ. По данным Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФГИС Аршин) можно определить применяемые в сфере учета энергоресурсов (нефтепродуктов) виды СИ (рис. 1), классификацию которых можно свести в табл. 1. Например, кориолисовые расходомеры составляют всего 6 % от всех утвержденных типов, в то время как они наиболее востребованы на узлах учета нефтепродуктов.

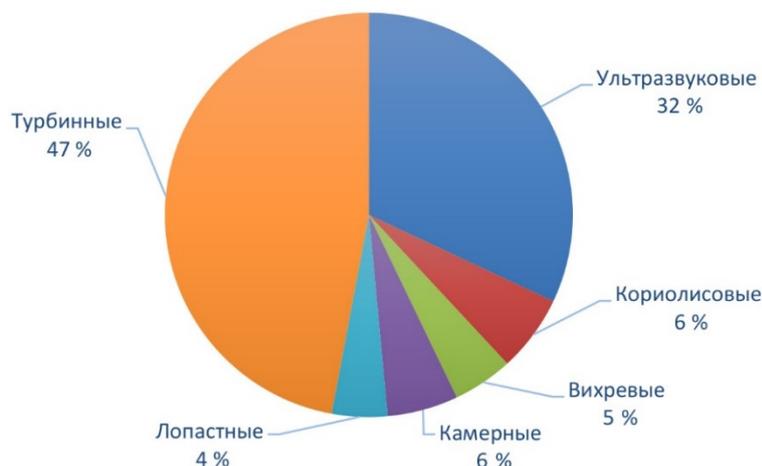


Рис. 1. Данные об утвержденных типах СИ, применяемых в сфере учета нефтепродуктов

Анализ ценовых предложений изготовителей позволяет увидеть, что стоимость расходомеров, которые установлены на узлах учета нефти и нефтепродуктов, варьируется в диапазоне от 200–350 тыс. до нескольких миллионов рублей. Если учесть тот факт, что на узлах учета используется не один такой расходомер, высокая МН СИ становится одним из главных факторов при выборе СИ. В свою очередь МН СИ влияет не только на срок службы самого СИ, но и на экономические потери энергоресурсов. Метрологические отказы СИ как наиболее скрытные и никак не проявляемые в процессе эксплуатации, являются «опасными» и приводят к искажению измерительной информации [3].

¹ РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

Таблица 1

Классификация СИ в сфере учета нефтепродуктов

Группа	Вид	Основные источники погрешности
Акустические	Ультразвуковые	Неоднородность температуры [16], неоднородное распределение скорости звука [17], вибрация трубопровода [18], некорректный учет влияния профиля скорости, дополнительные акустические сигналы, асимметрия электронно-акустических каналов [19]
Камерные	С неподвижными разделяющими элементами	Механические примеси, просачивание среды через внутреннюю поверхность [20]
	С подвижными разделяющими элементами	
Силовые	Кориолисовые	Изменение фаз механических колебаний U-образных трубок, по которым движется среда (эффект Кориолиса), температура и давление измеряемой среды [20–22]
Тахометрические	Турбинные	Турбулентность потока, неравномерная шероховатость трубопровода и коррозия, двухфазность среды – наличия воздуха в воде [23, 24]
	Лопастные	
Вихревые	С вращающимся потоком	Турбулентность потока, неравномерная шероховатость трубопровода и коррозия [25–27]
	С телом обтекания	

Вопрос оценки МН СИ является одним из основных при испытаниях СИ в целях утверждения типа в части подтверждения технических характеристик (например, средний срок службы, средняя наработка на отказ) и определения интервала между поверками (далее – МПИ) [28]. Следует отметить, что методик испытаний, подходящих для групп аналогичных СИ, не так много, и требуется разработка индивидуальных методик испытаний, в том числе в части определения показателей МН в зависимости от источников погрешности и конструктивных особенностей (табл. 1).

Анализ нормативных документов, устанавливающих требования к СИ, показывает, что вопросы стандартизации подходов определения МН не развиты. В документах ISO 4064-1:2014, ISO 4064-2:2014, OIML R 49-1:2013, OIML R 49-2:2013 определены положения в части требований к метрологическим и техническим характеристикам счетчиков воды и методы испытаний применительно к счетчикам воды. ILAC-G24:2007 / OIML D 10:2007 приводит методы определения межкалибровочных интервалов. Национальный стандарт ГОСТ Р 8.674-2009 содержит общие требования к средствам измерений, техническим системам и устройствам с измерительными функциями.

На данный момент показатели МН устанавливаются изготовителями самостоятельно исходя из нормативных значений¹ и «желаемого» МПИ, например, средней наработкой на отказ и средним сроком службы, при этом критерии оценки достоверности данных значений не установлены.

Известны основные методы анализа, расчета и контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность², но данные документы устанавливают только общие критерии и основу разработки планов испытаний. Расчет надежности должен состоять из критериев отказов, оценок показателей надежности, накопления более полной и достоверной информации, применения адекватных методов расчета и расчетных моделей, например [29–31]. Проведенный анализ нормативных документов показывает, что отсутствуют требования, определяющие порядок выбора расчетных моделей оценки показателей метрологической надежности СИ. Одним из условий расчета является наличие априорных данных о надежности объектов-аналогов, оценки показателей нагруженности составных частей. В области определения показателей метрологической надежности уже выработаны некоторые подходы к анализу их показателей [32], но имеющих свои недостатки (табл. 2).

¹ ГОСТ 27883-98. Межгосударственный стандарт. Средства измерений и управления технологическими процессами. Надежность.

² ГОСТ Р 27.403-2009. Национальный стандарт. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.

ГОСТ Р 27.102-2021. Национальный стандарт. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Национальный стандарт. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.

Таблица 2

Подходы к определению показателей метрологической надежности

Анализ показателей метрологической надежности	Описание	Недостатки
Расчетные методы		
В процессе эксплуатации [33]	Осуществляется в процессе эксплуатации на основании предыдущих результатов поверки, выполненных без предварительного ремонта и регулировки (юстировки)	Применим при корректировке МПИ в отношении испытанных СИ, регулярно проходящих поверку с небольшим МПИ (1–2 года), например, для СИ с МПИ более четырех лет данный подход нецелесообразен, так как для достоверной оценки потребуется сбор информации как минимум за 20 лет
На основе моделей эволюции погрешности СИ [34]	Осуществляется при использовании различных моделей эволюции погрешностей СИ с целью прогнозирования метрологических отказов. В качестве примера предлагается использование метода производящих функций, где в качестве модели эволюции погрешности СИ выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ	При применении данного подхода оценивается только вероятность наступления постепенного отказа, для комплексной оценки показателей МН необходимо применять дополнительные статистические методы
На основе запаса метрологической надежности [35]	Осуществляется при применении критерия, представляющего собой квантиль двухпараметрического нормального распределения вероятности не достижения предела погрешности и рассчитывается как отношение разности между погрешностями эталона и СИ к СКО СИ	Данный критерий зависит не только от характеристик СИ, но и от характеристик средств поверки, т.е. необходимо при периодических поверках применять одни и те же средства поверки с минимальной нестабильностью
По интенсивности отказов или средней наработке на отказ комплектующих элементов по РМГ-74	Осуществляется на основе показателей комплектующих и их функций чувствительности, преобразования	Оцениваются характеристики каждого элемента, их дрейфа, включая систематизацию по подмножествам в зависимости от влияния на систематическую, случайную и дополнительную погрешности СИ, что не всегда представляется возможным
По средней наработке на отказ СИ по РМГ-74	Осуществляется на основе данных о средней наработке на отказ СИ	Значения средней наработки на отказ и вероятности безотказной работы за время работы СИ нормируются в эксплуатационных и технических документах, при этом данные значения могут быть установлены изготовителем без теоретического и экспериментального подтверждения
Экспериментальный метод		
Испытания на метрологическую надежность (нестабильность), ускоренных или ресурсные испытания по РМГ-74	Осуществляется при испытаниях в обычном или ускоренном режимах заранее отобранной партии СИ, в процессе которого через равные промежутки времени эксплуатации или наработки проводят измерения контролируемых параметров	Данные испытания проводятся с известным коэффициентом ускорения для режима испытаний. Определение данного коэффициента не рассмотрено, недостаточно документов, описывающих порядок проведения испытаний

Анализ подходов к определению показателей МН показал, что отсутствует универсальный метод, который определял бы порядок определения показателей МН. На данный момент существует необходимость в развитии данного вопроса, в частности, моделирования отказов СИ и процесса дрейфа метрологических характеристик СИ, а также использования этих моделей в качестве основы для выявления влияющих факторов при применении экспериментального метода. Изучение данных аспектов играет важную роль и в вопросах, связанных с определением интервалов между поверками СИ (далее – МПИ) и калибровками [36–41] и их корректировкой.

Применение экспериментального метода определения и подтверждения показателей МН включает в себя проведение ресурсных испытаний СИ, в процессе которых оценивается ресурс СИ до достижения предельных значений, что в свою очередь также позволяет оценить среднюю наработку на отказ [42]. Одна из проблем проведения таких испытаний – отсутствие нормативных документов для большинства типов СИ, определяющих методы их проведения. Документы, предназначенные для проведения испытаний на отказ [43], не могут быть приняты для испытаний на метрологический отказ, так как содержат в себе отличные критерии положительного и отрицательного результата.

Работы по проведению ресурсных испытаний начались для счетчиков воды, в работах [44, 45] исследуется влияние циклических изменений на счетчики воды, в работе [46] указывается на целесообразность более детального изучения ситуации.

Разработано несколько документов, регламентирующих проведение ресурсных испытаний, например, РМГ 148-2022 и ГОСТ Р 8.931-2016 устанавливают порядок проведения ресурсных испытаний крыльчатых и турбинных счетчиков холодной, горячей, холодной и горячей (универсальные) воды с целью определения интервала между поверками. В работе [47] отражены результаты проведения ресурсных испытаний в соответствии с РМГ 148-2022, указывающие на экономическую целесообразность проведения ресурсных испытаний для установления и корректировки МПИ. Данную работу необходимо продолжить для СИ, применяемых в нефтяной промышленности (табл. 1). На данный момент проводятся работы по исследованиям влияния различных факторов на работу СИ, установленных на узлах учета, оценки МН на основе статистических методов, но достаточно мало работ, которые бы описывали экспериментальное определение показателей метрологической надежности [48–50].

Проведение ресурсных испытаний возможно при установлении динамических МПИ, что позволяет корректировать МПИ в процессе эксплуатации. При изменении МПИ необходимо учитывать отказы и корректировки, например, изменение метрологически значимых коэффициентов, которые происходят в процессе эксплуатации, но существует проблема в отсутствии таких данных, что не позволяет достоверно определить изменяемый МПИ. Также для назначения динамических МПИ между поверками необходимо изменение в нормативно-правовых документах.

Заключение

На настоящий момент существующие подходы к оценке МН основаны на математическом моделировании и статистическом прогнозировании без проведения экспериментальных исследований. В связи с этим для наиболее достоверного определения показателей МН, в дополнении к вышеуказанным подходам, необходима разработка типовых программ и методов проведения испытаний на метрологический отказ (ресурсных испытаний), особенно для СИ в нефтяной промышленности, определение критериев оценки достоверности показателей МН, декларированных изготовителями, и совершенствование подходов установления МПИ, в том числе динамических. Важным аспектом представляется исследование методов определения показателей МН для дорогостоящих и уникальных СИ, где зачастую ввиду экономической нецелесообразности испытания провести невозможно, а данных для расчетных методов недостаточно. Необходимо фиксировать изменение метрологически значимых коэффициентов и наступление отказов, произошедших в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник : Кн. 1. 5-е изд. перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2002. 409 с.

2. Шмелев А. С., Шалимов В. Э, Буклагин Д. С., Дунаев А. В. Концепция создания современных высокоточных расходомеров топлива для энергетических средств // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 5 (83). С. 37–42 doi: 10.23670/IRJ.2019.83.5.008
3. Фридман А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений и других технических средств, имеющих точностные характеристики : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1994. 423 с.
4. Чернышова Т. И. Метрологическая надежность средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий : дис. ... д-ра техн. наук. Тамбов, 2002. 469 с.
5. Еремин И. Ю. Повышение точности и метрологической надежности информационно-измерительных систем количества нефти в магистральных нефтепроводах : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2007. 170 с
6. Sakhnyuk I. A. Prediction-based approach to determining the metrological reliability of measuring instruments // Cybernetics and Systems Analysis. 2012. Vol. 8, № 6. P. 927–930.
7. Kononov I. K., Pilyuzin A. V. Metrological reliability of vibrating-wire transducers // Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 46, № 6. P. 439–441.
8. Monteiro E. C., L. Mari Preliminary notes on metrological reliability. XXI IMEKO World Congress // Measurement in Research and Industry. 2015. TC6-173.
9. Hernández-Vásquez J. D., Pedraza-Yepes C. A., Rodriguez-Salas A. D. Evaluation of the metrological reliability of a graduated cylinder from experimental data from an in-situ calibration // Data in Brief. 2020. P. 106–133.
10. Чернышова Т. И., Каменская М. А., Курносков Р. Ю. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 209–215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
11. Перегуда А. И. Белозеров В. И. Прогнозирование надежности датчиков расхода теплоносителя ШАДР-32М // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 51–62. doi: 10.26583/npe.2017.1.05
12. Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Метрологическая надежность средств измерений и оценка риска метрологического отказа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2023. № 4. С. 574–585. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585
13. El-Galil D. M. A., Mahmoud E., Testing the reliability of humidity generator through measurements traceable to calibration standards // Measurement. 2018. Vol. 124. P. 159–162.
14. Ficco L., Canale L., Lanza A. [et al.]. On the metrological reliability of subsequent verification of thermal energy meters. 2023. Vol. 216. P. 112898.
15. Morris A. S., Langari R. Chapter 12 – Measurement reliability and safety systems, Measurement and Instrumentation. 3 ed. 2021. P. 349–379.
16. Борисов А. А., Гершман Э. М., Пругло Д. С. [и др.]. Экспериментальное исследование влияния неоднородности температурного поля на метрологические характеристики ультразвукового расходомера // Труды Академэнерго. 2017. Вып. 2. С. 7–10.
17. Гершман Э. М., Пругло Д. С., Фафурин В. А., Явкин В. Б. Дополнительная погрешность измерения расхода ультразвуковым расходомером в потоке с неоднородным распределением скорости звука // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2015. № 3. С. 132–138.
18. Вахитов Д. И., Ишинбаев Н. А. Снижение уровня вибрационного воздействия на точность показаний ультразвукового расходомера // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 7. С. 1219–1225.
19. Бадалов А. З., Измайлов А. М. Исключение ряда гидродинамических составляющих случайной погрешности акустических расходомеров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 7. С. 6–16.
20. Mills Ch. Calibration and operating Coriolis flow meters with respect to process effects. North Sea Flow Measurement Workshop, 2018. P. 1–31.
21. Кортиашвили В. В, Крахмалев Е. И. Обзор методов измерения массового расхода // Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 3. С. 69–71.
22. Пархоменко Г. Г. Исследование моментов сил, действующих на вибрационный преобразователь массового расхода // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 57–63.
23. Нестеров В. Н., Андреев И. П. Повышение точности турбинных преобразователей расхода с помощью метода обобщенных влияющих величин // Измерительная техника. 2017. № 4. С. 22–26.
24. Гончар Л. Л., Паневкин Н. А. Повышение точности расходомерных устройств, работающих в особо жестких условиях // Воронежский научно-технический вестник. 2017. № 1. С. 58–62.
25. Кулакова Е. С., Отаров А. А. Цифровая обработка сигналов вихревого расходомера // Нефтегазовое дело. 2023. № 5. С. 124–144. doi: 10.17122/ogbus-2023-5-124-144
26. Лурье М. С., Лурье О. М., Фролов А. С. Исследование погрешности поперечной ориентации тела обтекания при монтаже вихревых расходомеров // Вестник НЦ БЖД. 2018. № 2. С. 118–121.

27. Альшева К. В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров // Вестник Южно-уральского государственного университета. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 119–123. doi: 10.14529/ctcr180312
28. Шафигина А. Э., Соико А. И. Анализ методов оценки показателей надежности и установления интервалов между поверками (калибровками) средств измерений // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : материалы Междунар. молодежной науч. конф. Казань : ИП Сагиев А.Р., 2023. С. 1856–1860.
29. Старилова Е. В., Королев П. С. Исследование влияния технической надежности электронных изделий на экономическую надежность организации в условиях импортозамещения // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. № 1. С. 55–61.
30. Юдин Е. Б., Задорожный В. Н., Юдина М. Н. Расчет надежности с использованием свойств монотонности функций и эквивалентных преобразований графа надежности // Омский научный вестник. Сер.: Приборы, машины и технологии. 2014. № 3 (133). С. 201–204.
31. You Q., Guo J., Zeng Sh., Cheb H. A dynamic Bayesian network based reliability assessment method for short-term multi-round situation awareness considering round dependencies // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 243. P. 109838.
32. Шафигина А. Э., Соико А. И. Подходы к оценке метрологической надежности средств измерений // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. М. : АЛЕФ, 2023. С. 229–232. doi: 10.34755/IROK.2023.83.48.003
33. Шабанов М. В., Разумный А. И. Установление интервалов между поверками средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии в Республике Беларусь: проблемы и решения // Метрология и приборостроение. 2021. № 4. С. 38–43.
34. Яшин В. Н. Оценка метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. № 2. С. 84–96. doi: 10.14498/tech.2020.2.6
35. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Известия вузов. Приборостроение. 2010. № 7. С. 51–54.
36. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 2010. 171 p.
37. Pashnina N. Determination of optimal calibration intervals by balancing financial exposure against measurement costs // Flow Measurement and Instrumentation. 2018. Vol. 60. P. 115–123. doi: 10.1016/j.flow-measinst.2018.02.001
38. Чернышова Т. И., Каменская М. А., Курносоев Р. Ю. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 209–215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02
39. Шабалина О. К., Шабалин А. С. Определение межповерочного интервала систем измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 3. С. 47–49.
40. Сулаберидзе В. Ш., Чуновкина А. Г. О методах установления и корректировки межкалибровочных и межповерочных интервалов средств измерений // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. 2020. С. 224–229. doi: 10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-224-229
41. Медведских С. В., Тетерук Р. А. Интервалы между поверками средств измерений: методические и нормативно-правовые аспекты определения // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 49–53. doi: 10.32446/0368-1025it2022-7-49-53
42. Тетерук Р. А., Фирсанов Н. А. Определение интервала между поверками по результатам проведения ресурсных испытаний на метрологический отказ // Вестник метролога. 2023. № 1. С. 18–22.
43. Schumann D. Development of a calibration process for water meters close to real world conditions // 17th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2016). Sydney, 2016.
44. Büker O. A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions // Flow Meas. Instrum. 2021. P. 101934.
45. Schumann D. Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters // Flow Meas. Instrum. 2021. P. 101934.
46. Корнеев Р. А., Тухватуллин Р. Р., Шабалин А. С., Щелчков А. В. Проведение ресурсных испытаний счетчиков воды в соответствии с РМГ 148-2022: основные положения // Главный метролог. 2022. № 6 (129). С. 32–37. doi: 10.32446/2587-9677gm.2022-6-30-37
47. Малая Л. Д. Изменение метрологических характеристик турбинных преобразователей расхода в межповерочном интервале // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2022. № 4. С. 173–177.
48. Яушев А. А. Изучение закономерностей, связей и динамических процессов, обеспечивающих повышенные эксплуатационные характеристики расходомеров кориолисового типа : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 164 с.

49. Даев Ж. А. Анализ неопределенностей результатов измерений расхода кориолисовыми расходомерами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 10. С. 11–14.
50. Кострикина И. А., Галкина И. А. Методика исследований метрологической надежности средств измерений по результатам ускоренных испытаний // Метрология. 2014. № 1. С. 23–32

References

1. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv: spravochnik: Kn. 1. 5-e izd. pererab. i dop. = Flowmeters and counters of the amount of substances : handbook : Book 1. 5th ed. reprint. and add.* Saint Petersburg: Politehnika, 2002:409.
2. Shmelev A.S., Shalimov V.E, Buklagin D.S., Dunaev A.V. The concept of creating modern high-precision fuel flowmeters for energy facilities. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2019;(5):37–42. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2019.83.5.008
3. Fridman A.E. Theory of metrological reliability of measuring instruments and other technical means with precision characteristics: DSc dissertation. Saint Petersburg, 1994:423. (In Russ.)
4. Chernyshova T.I. Metrological reliability of non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products: DSc dissertation. Tambov, 2002:469. (In Russ.)
5. Eremin I.Yu. Improving the accuracy and metrological reliability of information and measurement systems for the amount of oil in main oil pipelines: PhD dissertation. Camara, 2007:170. (In Russ.)
6. Sakhnyuk I.A. Prediction-based approach to determining the metrological reliability of measuring instruments. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2012;8(6):927–930.
7. Konovalov I.K., Pilyuzin A.V. Metrological reliability of vibrating-wire transducers. *Power Technology and Engineering*. 2013;46(6):439–441.
8. Monteiro E.C., L. Mari Preliminary notes on metrological reliability. XXI IMEKO World Congress. *Measurement in Research and Industry*. 2015:TC6-173.
9. Hernández-Vásquez J.D., Pedraza-Yepes C.A., Rodriguez-Salas A.D. Evaluation of the metrological reliability of a graduated cylinder from experimental data from an in-situ calibration. *Data in Brief*. 2020:106–133.
10. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2017;(2):209–215. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
11. Pereguda A.I. Belozarov V.I. Forecasting the reliability of SHADR-32M coolant flow sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika = Proceedings of higher educational institutions. Nuclear energy*. 2017;(1):51–62. (In Russ.). doi: 10.26583/npe.2017.1.05
12. Sulaberidze V.Sh., Neklyudova A.A. Metrological reliability of measuring instruments and assessment of the risk of metrological failure. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2023;(4):574–585. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585
13. El-Galil D.M.A., Mahmoud E., Testing the reliability of humidity generator through measurements traceable to calibration standards. *Measurement*. 2018;124:159–162.
14. Ficco L., Canale L., Lanza A. et al. *On the metrological reliability of subsequent verification of thermal energy meters*. 2023;216:112898.
15. Morris A.S., Langari R. *Chapter 12 – Measurement reliability and safety systems, Measurement and Instrumentation. 3 ed.* 2021:349–379.
16. Borisov A.A., Gershman E.M., Pruglo D.S. et al. Experimental study of the influence of temperature field inhomogeneity on the metrological characteristics of an ultrasonic flowmeter. *Trudy Akademenergo = Proceedings of Akademenergo*. 2017;(2):7–10. (In Russ.)
17. Gershman E.M., Pruglo D.S., Fafurin V.A., Yavkin V.B. Additional error in flow measurement with an ultrasonic flow meter in a stream with a nonuniform distribution of sound velocity. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2015;(3):132–138. (In Russ.)
18. Vakhitov D.I., Ishinbaev N.A. Reducing the level of vibration impact on the accuracy of ultrasonic flowmeter readings. *Voprosy ustoychivogo razvitiya obshchestva = Issues of sustainable development of society*. 2022;(7):1219–1225. (In Russ.)
19. Badalov A.Z., Izmaylov A.M. Exclusion of a number of hydrodynamic components of the random error of acoustic flowmeters. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2016;(7):6–16. (In Russ.)
20. Mills Ch. *Calibration and operating Coriolis flow meters with respect to process effects*. North Sea Flow Measurement Workshop, 2018. P. 1–31.
21. Kortiasvili V.V., Krakhmalev E.I. Overview of mass flow measurement methods. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Oil and Gas exposition*. 2015;(3):69–71. (In Russ.)
22. Parkhomenko G.G. Investigation of the moments of forces acting on a vibrating mass flow converter. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2012;(1):57–63. (In Russ.)

23. Nesterov V.N., Andreev I.P. Improving the accuracy of turbine flow converters using the method of generalized influencing quantities. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2017;(4):22–26. (In Russ.)
24. Gonchar L.L., Panevkin N.A. Improving the accuracy of flow meters operating in particularly harsh conditions. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2017;(1):58–62. (In Russ.)
25. Kulakova E.S., Otarov A.A. Digital signal processing of a vortex flowmeter. *Neftgazovoe delo = Oil and gas business*. 2023;(5):124–144. (In Russ.). doi: 10.17122/ogbus-2023-5-124-144
26. Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S. Investigation of the error of the transverse orientation of the flow body during the installation of vortex flowmeters. *Vestnik NTs BZhD = Bulletin of the National Research Center of the Belarusian Railways*. 2018;(2):118–121. (In Russ.)
27. Al'sheva K.V. Methods and features of the study of vortex flowmeters. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Computer technology, management, radio electronics*. 2018;(3): 119–123. (In Russ.). doi: 10.14529/ctcr180312
28. Shafigina A.E., Soyko A.I. Analysis of methods for assessing reliability indicators and establishing intervals between verifications (calibrations) of measuring instruments. *XXVI Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchennykh): materialy Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. = XXVI Tupolev readings (school of young scientists) : proceedings of the International youth scientific conference*. Kazan: IP Sagiev A.R., 2023:1856–1860. (In Russ.)
29. Starilova E.V., Korolev P.S. Investigation of the influence of technical reliability of electronic products on the economic reliability of an organization in the context of import substitution. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Synchronization, signal generation and processing systems*. 2023;(1):55–61. (In Russ.)
30. Yudin E.B., Zadorozhnyy V.N., Yudina M.N. Calculation of reliability using the properties of monotony of functions and equivalent transformations of the reliability graph. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser.: Pribory, mashiny i tekhnologii = Omsk Scientific Bulletin. Ser.: Devices, machines and technologies*. 2014;(3): 201–204. (In Russ.)
31. You Q., Guo J., Zeng Sh., Cheb H. A dynamic Bayesian network based reliability assessment method for short-term multi-round situation awareness considering round dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024;243:109838.
32. Shafigina A.E., Soyko A.I. Approaches to the assessment of metrological reliability of measuring instruments. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization : materials of the XIX International scientific and practical conference*. Moscow: ALEF, 2023:229–232. (In Russ.). doi: 10.34755/IROK.2023.83.48.003
33. Shabanov M.V., Razumnyy A.I. Establishment of intervals between verifications of measuring instruments used in the field of legal metrology in the Republic of Belarus: problems and solutions. *Metrologiya i priborostroenie = Metrology and instrumentation*. 2021;(4):38–43. (In Russ.)
34. Yashin V.N. Assessment of metrological reliability of measuring instruments using the method of generating functions. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Technical sciences*. 2020;(2):84–96. (In Russ.). doi: 10.14498/tech.2020.2.6
35. Efremov L.V. Stock of metrological reliability as a criterion for assessing the serviceability of measuring instruments. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2010;(7):51–54. (In Russ.)
36. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 2010. 171 r.
37. Pashnina N. Determination of optimal calibration intervals by balancing financial exposure against measurement costs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018;60:115–123. doi: 10.1016/j.flow-measinst.2018.02.001
38. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2017;(2):209–215. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2017.02
39. Shabalina O.K., Shabalin A.S. Determination of the calibration interval of measurement systems for the quantity and quality indicators of oil and petroleum products. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2019;(3):47–49. (In Russ.)
40. Sulaberidze V.Sh., Chunovkina A.G. On methods of establishing and correcting intercalibration and calibration intervals of measuring instruments. *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh system = Modeling and situational quality management of complex systems*. 2020:224–229. (In Russ.). doi: 10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-224-229

41. Medvedevskikh S.V., Teteruk R.A. Intervals between verifications of measuring instruments: methodological and regulatory aspects of determination. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(7):49–53. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it2022-7-49-53
42. Teteruk R.A., Firsanov N.A. Determination of the interval between verifications based on the results of resource tests for metrological failure. *Vestnik metrologa = Bulletin of the metrologist*. 2023;(1):18–22. (In Russ.)
43. Schumann D. Development of a calibration process for water meters close to real world conditions. *17th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2016)*. Sydney, 2016.
44. Bükler O. A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions. *Flow Meas. Instrum.* 2021:101934.
45. Schumann D. Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters. *Flow Meas. Instrum.* 2021:101934.
46. Korneev R.A., Tukhvatullin R.R., Shabalin A.S., Shchelchkov A.V. Conducting resource tests of water meters in accordance with RMG 148-2022: basic provisions. *Glavnyy metrolog = Chief metrologist*. 2022;(6):32–37. (In Russ.). doi: 10.32446/2587-9677gm.2022-6-30-37
47. Malaya L.D. Changing the metrological characteristics of turbine flow converters in the calibration interval. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*. 2022;(4):173–177. (In Russ.)
48. Yaushev A.A. The study of patterns, relationships and dynamic processes that provide increased operational characteristics of coriolis flowmeters: PhD dissertation. Ufa, 2019:164. (In Russ.)
49. Daev Zh.A. Uncertainty analysis of flow measurement results by coriolis flow meters. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2016;(10):11–14. (In Russ.)
50. Kostrikina I.A., Galkina I.A. Methodology of research on metrological reliability of measuring instruments based on the results of accelerated tests. *Metrologiya = Metrology*. 2014;(1):23–32. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Альбина Эриковна Шафигина

инженер по системе менеджмента качества,
Всероссийский научно-исследовательский
институт расходомерии – филиал
Всероссийского научно-исследовательского
института метрологии имени Д. И. Менделеева
(Россия, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а);
аспирант,
Казанский национальный исследовательский
технический университет
имени А. Н. Туполева
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)
E-mail: shafigina.98@mail.ru

Albina E. Shafigina

Quality management system engineer,
All-Russian Scientific Research Institute
of Flowmetry – branch of the D.I. Mendeleev
All-Russian Scientific Research Institute of Metrology
(7a 2nd Azinskaya street, Kazan, Russia);
postgraduate student,
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev
(10 K. Marks street, Kazan, Russia)

Алексей Игорьевич Сойко

кандидат технических наук,
доцент кафедры электронного
приборостроения и менеджмента качества,
Казанский национальный исследовательский
технический университет
имени А. Н. Туполева
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)
E-mail: alexsoiko@yandex.ru

Aleksey I. Soyko

Candidate of technical science, associate professor
of the sub-department of electronic instrumentation
and quality management,
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev
(10 K. Marks street, Kazan, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2024

Принята к публикации / Accepted 15.07.2024

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОГО ИЗГИБА

В. С. Волков¹, С. Н. Базыкин², А. А. Трофимов³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹vadimv_1978@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru, ³alex.t1978@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Чувствительные элементы полупроводниковых преобразователей давления традиционно изготавливаются в виде круглых и квадратных мембран, в то время как применение другой геометрической формы, например прямоугольной, позволяет уменьшить габариты при сохранении высокой чувствительности. Целью работы является исследование влияния нелинейного изгиба прямоугольной мембраны тензопреобразователя под действием измеряемого давления на выходной сигнал, разработка методики определения толщины мембраны с учетом нелинейного изгиба и определение погрешности нелинейности. *Материалы и методы.* Существующие методики определения толщины мембран преобразователей давления учитывают только линейный изгиб, а известное уравнение нелинейного изгиба мембраны не имеет аналитического решения и ранее решалось приближенным графическим методом, поэтому была разработана методика определения толщины прямоугольной кремниевой мембраны тензопреобразователя с учетом нелинейного изгиба по критерию механической прочности путем решения уравнения прогиба мембраны численным методом в программе MathCad. *Результаты.* Разработана методика, позволяющая рассчитывать толщину прямоугольной плоской мембраны кремниевого тензопреобразователя давления, построена зависимость выходного напряжения мостовой схемы от приложенного давления с учетом линейного и нелинейного изгиба прямоугольной мембраны. *Выводы.* С использованием разработанной методики определена погрешность нелинейности выходного сигнала при учете только линейного изгиба мембраны, показано, что данная погрешность составляет 3 %, что не соответствует современным требованиям, предъявляемым к средствам измерения давления и требует разработки конструктивных решений по снижению данной погрешности.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь давления, прямоугольная кремниевая мембрана, толщина мембраны, нелинейный изгиб, погрешность нелинейности

Для цитирования: Волков В. С., Базыкин С. Н., Трофимов А. А. Методика расчета толщины прямоугольной мембраны полупроводникового тензопреобразователя давления с учетом нелинейного изгиба // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 64–70. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-8

A METHOD FOR CALCULATING THE THICKNESS OF A RECTANGULAR MEMBRANE FOR A SEMICONDUCTOR PRESSURE PIEZORESISTIVE TRANSDUCER TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR BENDING

V.S. Volkov¹, S.N. Bazykin², A.A. Trofimov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹vadimv_1978@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru, ³alex.t1978@mail.ru

Abstract. *Background.* The sensing elements of semiconductor pressure transducers are traditionally made in the form of round and square membranes, while the use of other geometric shapes, for example, rectangular, allows you to reduce the dimensions while maintaining high sensitivity. The aim of the work is to study the effect of nonlinear bending of a rectangular membrane for piezoresistive transducer under the influence of measured pressure on the output signal and to determine the error of nonlinearity. *Materials and methods.* Existing methods for determining the membrane thickness of pressure transducers take into account only linear bending, and the well-known equation of nonlinear membrane bending has no analytical solution and was previously solved by an approximate graphical method, therefore, a method for determining the thickness of a rectangular silicon membrane of a strain gauge was developed taking into account nonlinear bending according to the criterion of mechanical strength by solving the membrane deflection equation numerically in

the MathCad program. *Results.* A technique has been developed to calculate the thickness of a rectangular flat membrane of a silicon pressure strain converter, and the dependence of the output voltage of the bridge circuit on the applied pressure has been constructed, taking into account the linear and nonlinear bending of the rectangular membrane. *Conclusions.* Using the developed technique, the error of the nonlinearity of the output signal was determined when taking into account only the linear bending of the membrane, it was shown that this error is 3 %, which does not meet modern requirements for pressure measuring instruments and requires the development of constructive solutions to reduce this error.

Keywords: semiconductor pressure transducer, rectangular silicon membrane, membrane thickness, non-linear bending, non-linearity error

For citation: Volkov V.S., Bazykin S.N., Trofimov A.A. A method for calculating the thickness of a rectangular membrane for a semiconductor pressure piezoresistive transducer taking into account nonlinear bending. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):64–70. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-8

Введение

В полупроводниковых преобразователях давления (ППД) традиционно применяются чувствительные элементы (ЧЭ) в виде круглых и квадратных плоских мембран, хотя современные микромеханические технологии позволяют изготавливать мембраны и других геометрических форм. В частности, прямоугольная мембрана с соотношением 2:1 при той же толщине и приложенном давлении имеет на 60 % большие значения радиальных и тангенциальных механических напряжений, а следовательно, и большую чувствительность [1, 2]. При этом известно, что изгиб мембраны под действием давления является линейным только при малых значениях прогиба, не превышающих толщины самой мембраны. Поэтому актуальной является задача разработки методики определения толщины мембраны в условиях нелинейного изгиба, а также оценка погрешности нелинейности.

Материалы и методы

Теоретические положения для расчета напряженно-деформированного состояния прямоугольной мембраны изложены в работе [2], в которой показано, что экстремальные значения механических напряжений σ_x и σ_y наблюдаются в центре мембраны и в середине ее длинных сторон, а сдвиговое напряжение – в тех же точках $\tau_{xy} = 0$ [2] (рис. 1). Этим объясняется тот факт, что в большинстве реализуемых на практике вариантов ППД с прямоугольной мембраной из монокристаллического кремния отмеченные точки характеризуются максимальными по величине значениями чувствительности размещенных в них тензорезисторов, объединенных в мостовую схему [3].

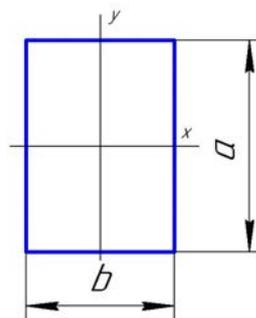


Рис. 1. Геометрические размеры прямоугольной мембраны

Значения напряжений в этих точках связаны друг с другом следующими простыми соотношениями:

$$\sigma_y = \nu \sigma_x (x = \pm a, y = 0); \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{\nu + (a/b)^2}{1 + \nu(a/h)^2} \sigma_x (x = y = 0), \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона [2].

Пользуясь законом Гука, выразим теперь относительные удлинения ε_x и ε_y элемента в функции действующих на него нормальных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала.

Для того, чтобы мембрана сохранила при деформации непрерывность, необходимо, чтобы поперечная линейная деформация ее в направлении оси y была равна нулю [2].

Для мембраны, которая находится под действием поперечно приложенного давления и растягивающей силы, направленной вдоль оси X и вызывающей деформацию срединной плоскости пластинки [2], необходимо учитывать нормальное напряжение и напряжение, обусловленное изгибом [2].

Уравнение кривой прогиба элементарной полоски мембраны будет иметь вид

$$D \frac{d^2 w}{dx^2} = -M, \quad (4)$$

где величина D называется жесткостью пластинки при изгибе, или цилиндрической жесткостью:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = D. \quad (5)$$

Для жестко защемленной по краям мембраны изгиб пластинки сопровождается появлением на ее краях растягивающих реактивных усилий S [2]. Эти реактивные силы зависят от величины прогиба и в свою очередь оказывают влияние на величину изгибающего момента.

Если ввести обозначение

$$\frac{S l^2}{D 4} = u^2, \quad (6)$$

то общее решение уравнения (4) может быть получено в следующем виде:

$$w = C_1 sh \frac{2ux}{l} + C_2 ch \frac{2ux}{l} + \frac{ql^3 x}{8u^2 D} - \frac{ql^2 x^2}{8u^2 D} - \frac{ql^4}{16u^4 D}. \quad (7)$$

Определив постоянные интегрирования C_1 и C_2 из условий равенства нулю прогиба на концах полоски, а также с учетом выражения S из формулы (6) и выражения D из формулы (5), можно получить уравнение для вычисления параметра u в окончательном виде [2]:

$$u = \frac{E^2 h^8}{(1-\nu^2)^2 q^2 l^8} - \frac{135 th u}{16 u^9} + \frac{27 th^2 u}{16 u^8} - \frac{135}{16 u^8} + \frac{9}{8 u^6}. \quad (8)$$

Радиальное и тангенциальное механические напряжения в серединах сторон мембраны с учетом нелинейного изгиба определяются выражениями на основе (1) и (2) [3]:

$$\sigma_x = 2P \left(\frac{a}{h} \right)^2 \Psi + \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2) \left(\frac{a}{h} \right)^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sigma_x \nu, \quad (10)$$

где

$$\Psi = 3 \frac{uch \left(u \frac{x}{a} \right) - sh(u)}{(u)^2 sh(u)}, \quad (11)$$

а параметр u определяется выражением (8).

Известные на данный момент методики определения параметра ψ основаны на графическом определении параметра u , так как выражение (8) не имеет аналитического решения, поэтому была разработана методика определения геометрических параметров прямоугольной мембраны, основанная на определении параметра u численным методом в программе MathCad. Методика определения толщины h в идее схемы алгоритма представлена на рис. 2.

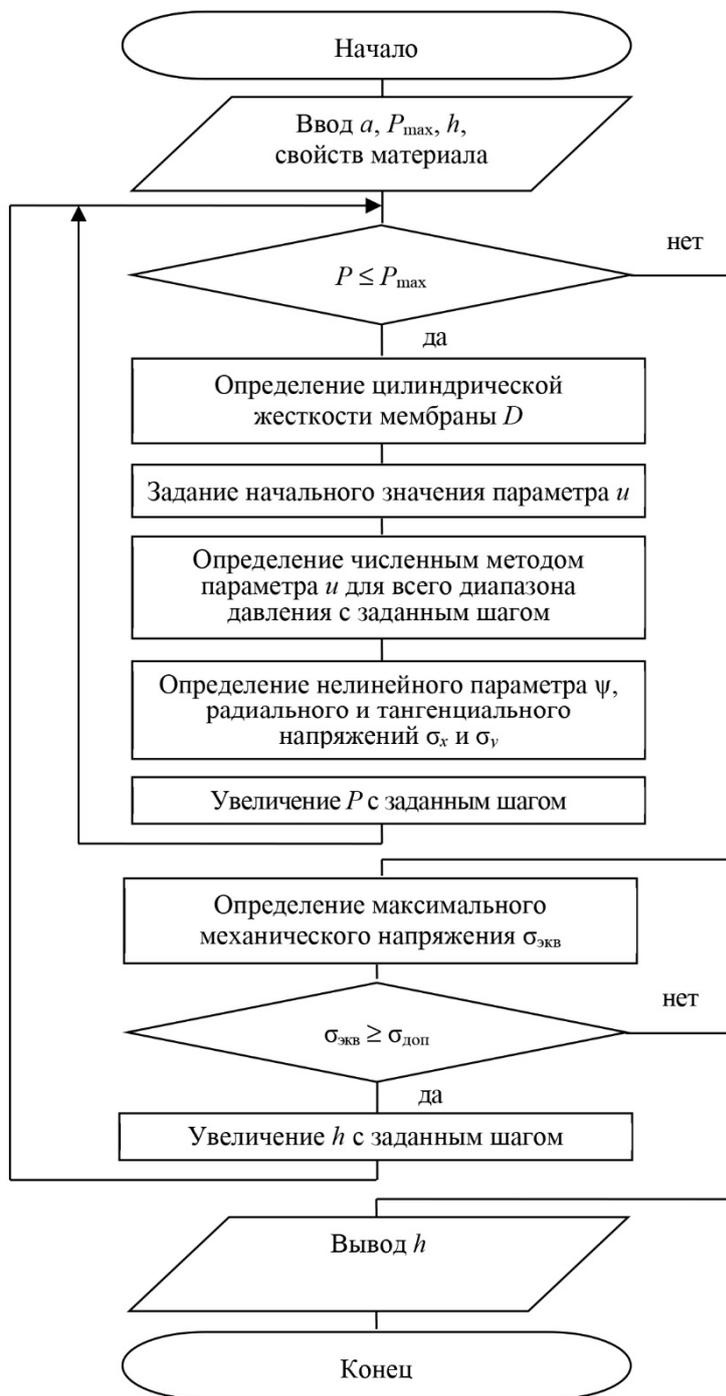


Рис. 2. Методика определения толщины мембраны

Первоначально задаются геометрические размеры мембраны и свойства материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона), с учетом того, что $b = 2a$, максимальное измеряемое давление P_{\max} и начальное значение толщины h . Далее для всего диапазона значений измеряемого давления с заданным шагом определяются цилиндрическая жесткость, параметр u и нелинейный параметр ψ по формулам (5), (8), (9)–(11). После этого проверяется условие превышения эквивалентного механического напряжения над допуском. Пока условие

выполняется, производится увеличение толщины h с заданным шагом. Как только условие перестает выполняться, это означает, что при соответствующем значении толщины выполняется условие прочности мембраны, далее соответствующее значение h выдается пользователю.

Предложенная методика была реализована в виде программы в MathCad со следующими исходными данными: модуль упругости кремния $E = 169$ ГПа, коэффициент Пуассона кремния $\nu = 0,359$, длина короткой стороны мембраны $a = 2$ мм, максимальное измеряемое давление $P_{\max} = 100$ кПа, допустимое напряжение для кремния $\sigma_{\text{доп}} = 400$ МПа. Рассчитанное по методике значение $h = 36$ мкм.

Далее было рассчитано выходное напряжение при максимальном измеряемом давлении для случаев линейного и нелинейного изгиба мембраны. Для найденного значения h рассчитывались значения механических напряжений по линейной теории для точек в серединах сторон мембраны [3–5]:

$$\sigma_{xi} = 2P \left(\frac{a}{h} \right)^2 \frac{3 \left(\frac{x}{a} \right)^2 - 1}{2}; \quad (12)$$

$$\sigma_{yi} = \sigma_{xi} \nu. \quad (13)$$

Для вычисления выходного сигнала мостовой схемы по линейной и нелинейной теории находим значение сопротивлений тензорезисторов при максимальном давлении ($i = 1 \dots 4$), где механические напряжения определяются выражениями (12), (13) [5–7]:

$$R_i = R_{0i} (1 + \pi_l \sigma_{xi} + \pi_t \sigma_{yi}), \quad (14)$$

где π_l и π_t – продольный и поперечный коэффициенты тензочувствительности кремния, равные $71,8 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ и минус $66,3 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ соответственно. Механические напряжения для нелинейного изгиба определяются по формулам (5), (8), (9)–(11).

Находим линейный выходной сигнал:

$$U_{\text{выхл}} = U_p \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (15)$$

Далее находим нелинейный выходной сигнал $U_{\text{выхл}}$, используя формулу (15), в которой сопротивления R_i находятся по формуле (14), а нелинейные механические напряжения определяются по методике, изложенной выше (см. рис. 2).

Далее задается номинальное значение сопротивления тензорезистора $R_0 = 1000$ Ом и напряжение питания мостовой схемы $U_p = 1$ В. Значение выходного сигнала при максимальном давлении с учетом нелинейного изгиба и вычисленного по линейной теории представлено на рис. 3.

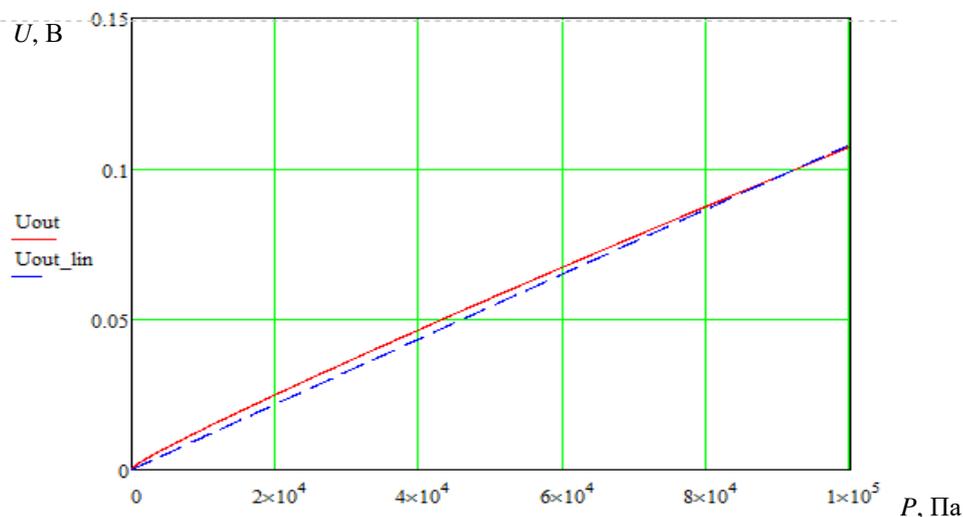


Рис. 3. Выходной сигнал при максимальном давлении по линейной теории (пунктир) и по нелинейной теории (сплошная линия)

Рассчитываем погрешность линейности выходного сигнала мостовой схемы, где индекс i перебирает весь диапазон измеряемого давления:

$$\delta = \frac{|U_{\text{вых}li} - U_{\text{вых}li}|}{U_{\text{вых}(P_{\text{max}})}} \cdot 100 \%. \quad (16)$$

Результаты и обсуждения

Зависимость погрешности линейности выходного сигнала мостовой от измеряемого давления представлена на рис. 4.

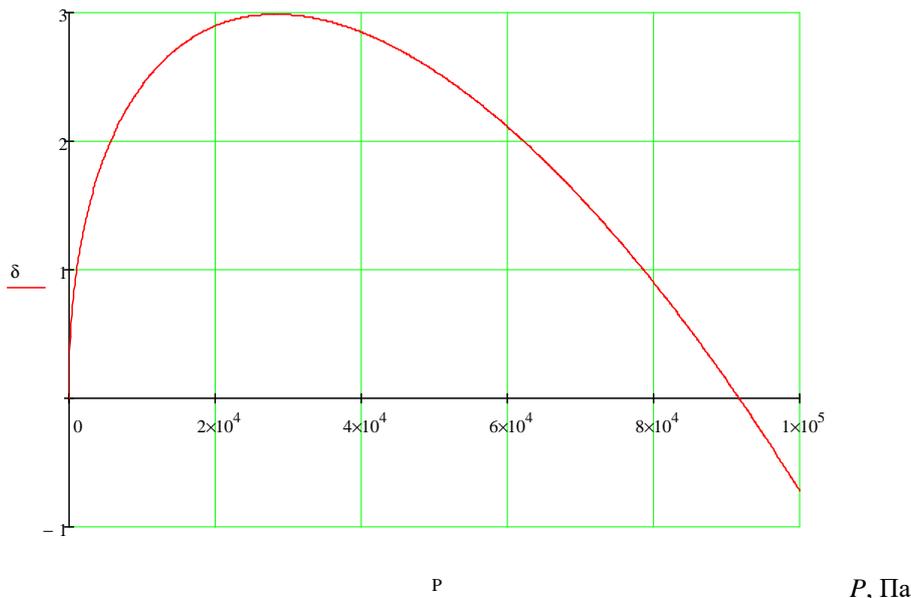


Рис. 4. Зависимость погрешности линейности выходного сигнала от измеряемого давления

Анализ рис. 4 показывает, что при увеличении измеряемого давления погрешность линейности сначала быстро возрастает, достигая максимального значения 3 % при значениях давления порядка 30 кПа, после чего плавно уменьшается до минус 0,6 % при максимальном измеряемом давлении. Полученные значения погрешности говорят о том, что при создании точных средств измерений с основной погрешностью 1 % и менее необходимо учитывать нелинейность зависимости механического напряжения от приложенного давления. Задачей дальнейшего исследования является изучение возможности снижения погрешности линейности при аппроксимации выходного сигнала полиномом различных порядков.

Список литературы

1. Khakpour R., Mansouri S. R. M., Bahadorimehr A. R. Analytical comparison for square, rectangular and circular diaphragms in MEMS applications // International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010. P. 297–299.
2. Тимошенко С. П., Войновский С. Кригер. Пластинки и оболочки. М. : Наука, 1966. 636 с.
3. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1983. 137 с.
4. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. М. : Мир, 1974.
5. Волков В. С., Французов М. В., Рыблова Е. А. Аналитическое и численное моделирование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2. С. 110–117.
6. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
7. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.

References

1. Khakpour R., Mansouri S.R.M., Bahadorimehr A.R. Analytical comparison for square, rectangular and circular diaphragms in MEMS applications. *International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010:297–299.
2. Timoshenko S.P., Voynovskiy S. Kriger. *Plastinki i obolochki = Plates and shells*. Moscow: Nauka, 1966:636. (In Russ.)
3. Vaganov V.I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli = Integral strain converters*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:137. (In Russ.)
4. Erler V., Val'ter L. *Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin poluprovodnikovymi tenzorezistorami = Electrical measurements of non-electrical quantities by semiconductor strain gages*. Moscow: Mir, 1974. (In Russ.)
5. Volkov V.S., Frantsuzov M.V., Ryblova E.A. Analytical and numerical modeling of sensitive elements of semiconductor pressure sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(2):110–117. (In Russ.)
6. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):20–28. (In Russ.)
7. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(2):51–55. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Вадим Сергеевич Волков**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

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

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

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

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the 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 23.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2024

Принята к публикации / Accepted 08.07.2024

УДК 629.7.05; УДК 519.876.5
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

М. А. Ватутин¹, И. Н. Кошель², В. В. Бурмистров³, Н. А. Петров⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В большинстве современных цифровых вольтметров используется интегрирующий аналого-цифровой преобразователь время-импульсного типа. Процесс преобразования можно условно разделить на два этапа – интегрирования и счета. Во время счета в соответствии с принципом действия преобразователя происходит сравнение проинтегрированной входной величины с опорной величиной, хранимой в преобразователе. Целью является разработка методики построения двухполярного источника опорного напряжения без снижения точностных параметров. *Материалы и методы.* Представлен подход к построению двухполярного источника опорного напряжения интегрирующего аналого-цифрового преобразователя, в котором интегрирование происходит в течение всего времени преобразования входного сигнала. Новизна подхода заключается в разработке схемотехнических решений для использования одиночного прецизионного стабилитрона для формирования двухполярного опорного напряжения. *Результаты.* Представлены: принципиальная электрическая схема двухполярного источника опорного напряжения и его математическая модель погрешности; рекомендации по выбору применяемых радиоэлементов; методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения. *Выводы.* Использование рассмотренной методики позволяет повысить стабильность пороговых уровней сравнения триггера Шмитта и тем самым осуществить более точное интегрирование входного сигнала. Результаты могут использоваться для построения интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для широкого применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, интегрирующий АЦП, генератор линейно изменяющегося напряжения, преобразователь напряжение-временной интервал, триггер Шмитта

Для цитирования: Ватутин М. А., Кошель И. Н., Бурмистров В. В., Петров Н. А. Обоснование схемотехнических предложений по повышению точностных параметров интегрирующего акселерометра // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 71–80. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

JUSTIFICATION OF CIRCUIT DESIGN SUGGESTIONS FOR IMPROVING ACCURACY PARAMETERS OF THE INTEGRATING ACCELEROMETER

M.A. Vatutin¹, I.N. Koshelev², V.V. Burmistrov³, N.A. Petrov⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Most modern digital voltmeters use an integrating time-to-pulse analogue-to-digital converter (ADC). The conversion process can be divided into two stages – integration and counting. During the counting, in accordance with the principle of the converter, the integrated input value is compared with the reference value stored in the converter. The goal is to develop a methodology for building a bipolar reference voltage source without reducing the accuracy parameters. *Materials and methods.* An approach to the construction of a bipolar reference voltage source of an integration analogue-digital converter is presented, in which integration occurs during the entire time of the input signal conversion. The novelty of the approach lies in the development of circuitry solutions for the use of a single precision Zener diode to form a bipolar reference voltage. *Results.* Presented: principal electrical scheme of a bipolar reference voltage source and its mathematical model of error; recommendations for the choice of a radio elements used; method of the schematic construction of a bipolar reference voltage source. *Conclusions.* The use of the considered technique allows to increase the stability of the threshold levels of comparison of the Schmitt trigger and, thus, to more accurately integrate

the input signal. The results can be used to build integrating ADC for wide application in industrial devices and other fields of science and technology.

Keywords: analog-to-digital converter, integrating ADC, linearly varying voltage generator, voltage-time interval converter, Schmitt trigger

For citation: Vatutin M.A., Koshel I.N., Burmistrov V.V., Petrov N.A. Justification of circuit design suggestions for improving accuracy parameters of the integrating accelerometer. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):71–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

Введение

Преобразование аналоговых сигналов в цифровой вид нашло широкое применение в технике для сопряжения датчиков различных физических величин, представляющих свой выходной сигнал в аналоговом виде, и цифровых управляющих систем, реализующих цифровые способы передачи, обработки и регистрации информации [1]. Как правило, измеряемая аналоговая физическая величина преобразуется в цифровой код опосредованно, путем предварительного преобразования ее в напряжение и в дальнейшем в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [2]. По этой причине наибольшее распространение получили АЦП «напряжение – код».

Для преобразования относительно медленно меняющихся сигналов широко применяются интегрирующие АЦП, позволяющие повысить разрядность и, соответственно, точность АЦП, а также снизить влияние различных внешних помех еще на этапе преобразования сигнала [3]. Преобразование аналоговой величины в цифровой код можно разделить на два этапа – этап преобразования аналоговой величины в дискретный вид и этап преобразования дискретной величины в цифровой код.

Важным элементом схемотехники АЦП, в значительной мере определяющим точностные параметры преобразования в дискретный вид, является схемотехника источника опорного напряжения (ИОН), относительно значения напряжения которого и осуществляется преобразование [2, 4, 5].

Материалы и методы

В работе [6] рассмотрена методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины в дискретную, используемую для построения интегрирующего аналого-цифрового преобразователя. В этой работе интегрирующую часть преобразователя предлагается построить на базе генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), выполненного на двух операционных усилителях [2, 4].

Операционный усилитель (ОУ) широко применяется и в импульсных электронных устройствах. При этом в полной мере используются такие положительные свойства ОУ, как малые дрейфы высокий и собственный коэффициент усиления, которые позволяют получить высокую стабильность работы импульсного устройства.

На рис. 1 показана принципиальная схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) на двух ОУ с входом управления [6].

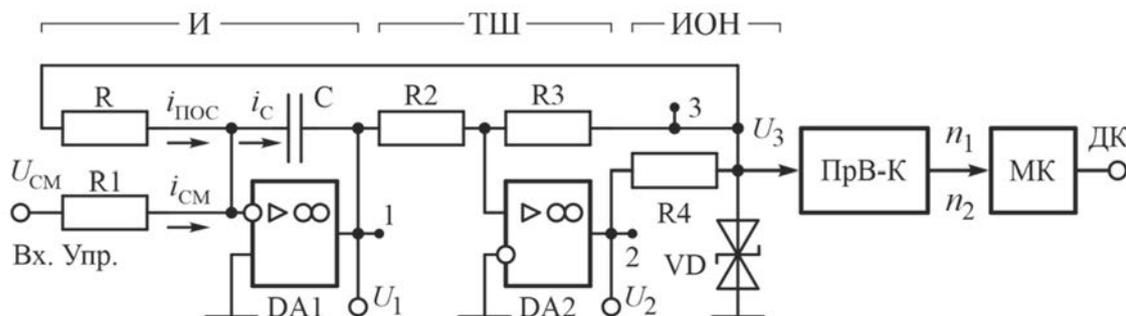


Рис. 1. ГЛИН на ОУ с дополнительным входом управления U_{CM} :

И – интегратор; ТШ – триггер Шмитта; ИОН – двухполярный источник опорного напряжения;

ПрВ-К – преобразователь «временной интервал – код»; МК – микроконтроллер;

$i_{ПЭС}$ – ток положительной обратной связи генератора; $i_{СМ}$ – ток смещения, обеспечивающий управление скважностью генератора; U_3 – опорное напряжение ИОН

Автоколебательный ГЛИН состоит из следующих основных частей: интегратора И на ОУ DA1; неинвертирующего триггера Шмитта ТШ на ОУ DA2; источника опорного напряжения ИОН, выполненного по схеме двухполярного параметрического стабилизатора напряжения на двухполярном стабилитроне VD. Назначение элементов и принцип преобразования входного сигнала подробно рассмотрены в работе [6].

Входное напряжение будет определяться как

$$U_{CM} = R1 \cdot i_{CM} = R1 \cdot i_{Пос} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{T} = R1 \cdot i_{Пос} \cdot \frac{\Delta t}{T}, \tag{1}$$

где T – период колебаний ГЛИН; t_1, t_2 , – время действия положительной и отрицательной полярности выходного напряжения ГЛИН.

Напряжение смещения U_{CM} по своей сути является входным напряжением $U_{ВХ}$: $U_{CM} = U_{ВХ}$.

Оценка стабильности преобразования входного напряжения

Анализ выражения (1) показывает, что стабильность преобразования напряжения $U_{ВХ}$ в относительный временной интервал $(\Delta t/T)$ определяется стабильностью резистора R1 и тока положительной обратной связи $i_{Пос}$. Стабильность резистора R1 определяется из справочника. Значение тока $i_{Пос}$ определяется выражением

$$i_{Пос} = U_3 / R, \tag{2}$$

а его стабильность – стабильностью резистора R и стабильностью напряжения U_3 . Для схемы ГЛИН, изображенной на рис. 1, примем $U_{оп} = U_{ст} = U_3$ ($U_{ст}$ – напряжение стабилизации стабилитрона).

Влияние отклонения параметров от номинального значения определяется как сумма частных производных от каждого параметра [7–9]

$$\Delta(y) = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta(x_1) + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta(x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} \Delta(x_n), \tag{3}$$

и это влияние тем меньше, чем меньше слагаемых в сумме и чем меньшее влияние вносит каждое из них.

Значение отклонения тока $i_{Пос}$ будет определяется следующим выражением:

$$\Delta i_{Пос} = \frac{\partial F}{\partial U_3} \Delta U_3 + \frac{\partial F}{\partial R} \Delta R = \frac{1}{R^2} (R \cdot \Delta U_3 - U_3 \cdot \Delta R). \tag{4}$$

Оценим точностные параметры радиоэлементов [10,11].

Резисторы. Современные резисторы делятся на две группы – проволочные (П) и непроволочные (н/П). Меньшим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) обладают проволочные резисторы, но они, как правило, имеют большие габариты. Параметры малогабаритных типов резисторов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры резисторов стабильных в узком диапазоне температур

Резистор	Материал	ТКС, $\times 10^{-6}$ 1/°C	L / D , мм	Масса, г
C2-29В	н/П	$\pm 5,0$ (+20...+70 °C)	6,5 · 2,3 (0,062 Вт) 8,0 · 3,5 (0,125 Вт)	0,25 0,3
C5-60	П	$\pm 1,0$ (+5...+40 °C)	8,0 · 2,3 (0,125 Вт)	0,2
P1-16	н/П	(+20...+125 °C) ± 25 (0,1...200 кОм) ± 10 (10...100 кОм)	3,2 · 1,6 · 0,5 (0,125 Вт)	0,05
P1-8П*	н/П	$\pm 5,0$ (+20...+120 °C)	1,0 · 1,25 · 0,5 (0,125 Вт)	0,01

Как видно из таблицы, наименьшее значение ТКС у проволочного резистора C5-60. Приблизительно при тех же габаритах резистор C2-29В обладает в 5 раз худшими параметрами.

Резистор для поверхностного монтажа P1-8П* имеет приемлемые параметры и малые габариты, но выпускается по спецзаказу.

Более высокими точностными параметрами обладают металлофольговые резисторы (МФ). Так, у резисторов фирмы Vishay (США) на узком температурном диапазоне (0...+60 °С) ТКС резисторов достигает значения $\pm 0,05 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, а на широком диапазоне (-55...+125 °С) – $\pm 0,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Параметры некоторых металлофольговых резисторов показаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры металлофольговых резисторов

Резистор	Материал	ТКС, $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	L/D , мм	Произв.
ММР	МФ	$\pm 5,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	3,5 · 3,2 · 2,0 (0,1 Вт)	Отеч.
ММУ*	МФ	$\pm 1,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	3,2 · 2,5 · 1,5 (0,05 Вт)	Отеч.
SMR1DZ*	МФ	$\pm 1,0 (-55...+125^\circ\text{C})$	7,3 · 4,3 · 2,8 (0,6 Вт)	Vishay

Примечание: *Резисторные сборки делителя напряжения.

Стабилитроны. Типовые параметры некоторых двуханодных стабилитронов показаны в табл. 3. В двуханодных стабилитронах в силу их конструкции осуществляется термокомпенсация напряжения стабилизации и это позволяет отнести их к стабилитронам повышенной стабильности. В целом для получения стабильного значения величины опорного напряжения критичным является значение температурного коэффициента напряжения (ТКН) стабилитрона. Разность напряжений $\Delta U_{\text{СТ}}$ считается величиной постоянной и ее можно учесть в поправочном коэффициенте.

Таблица 3

Параметры двуханодных стабилитронов

	$U_{\text{СТ}}$, В	$I_{\text{СТ}}$, мА	$P_{\text{МАХ}}$, мВт	$\Delta U_{\text{СТ}} \cdot 10^{-6}$, 1/°C	$\Delta U^*_{\text{СТ}}$, мВ	$I_{\text{СТ MIN}}$, мА	$I_{\text{СТ MAX}}$, мА
2С168В	6,8	10,0	150	± 500	340	3	20
2С170А	7,0	10,0	150	± 100	270	3	20
2С175А	7,5	5,0	150	± 400	370	3	18
КС535Б	15,0	1,0	500	± 30	–	–	40

Примечание: $\Delta U_{\text{СТ}}$ – дрейф напряжения стабилизации; $\Delta U^*_{\text{СТ}}$ – разность напряжения стабилизации для положительной и отрицательной полярности.

Стабилитрон КС535Б имеет небольшое значение нестабильности напряжения стабилизации ($\Delta U_{\text{СТ}} = \pm 30 \cdot 10^{-6}$, В/°С), но у него высокое напряжение стабилизации.

Анализ данных, представленных в табл. 1–3, показывает, что точностные параметры прецизионных резисторов в среднем на 1...2 порядка лучше точностных параметров двуханодных стабилитронов.

Выберем металлофольговый резистор ММР с номинальным значением сопротивления 100 кОм и стабилитрон 2С170:

$$\Delta i_{\text{ПОС}} = \frac{1}{R^2} (R \cdot \Delta U_3 - U_3 \cdot \Delta R) = \frac{1}{10^{10}} (10^5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 5 \cdot 10^{-6}) \approx 10^{-9} [\text{A}]. \quad (5)$$

Очевидно, что нестабильность тока $\Delta i_{\text{ПОС}}$ фактически определяется нестабильностью стабилитрона и номиналом резистора R . Для резистора $R = 10$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 10^{-8}$ [А]; для резистора $R = 1,0$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 10^{-7}$ [А].

Схемотехника ГЛИН с источником опорного напряжения на одиночных стабилитронах

Одиночные прецизионные стабилитроны по сравнению с двуханодными обладают более высокими точностными параметрами (табл. 4).

Таблица 4

Параметры прецизионных стабилизаторов

	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА	P_{MAX} , мВт	$\Delta U_{ст} \cdot 10^{-6}$, 1/°C	$\delta U_{ст}$, %	$\Delta U_{ст}$, %	T_{MIN}, T_{MAX} , °C
2С108В	6,4	7,5	70	$\pm 5,0$	$\pm 0,8$	$\pm 5,0$	-5...+60
2С166В	6,6	7,5	70	$\pm 5,0$	1,4 мВ	$\pm 5,0$	-5...+50
2С190Т	9,0	10,0	150	$\pm 5,0$	$\pm 0,02$	$\pm 5,0$	-60...+120
2С191Ф	9,1	10,0	200	$\pm 5,0$	2,0 мВ	$\pm 5,0$	-60...+120

Примечания: $\Delta U_{ст}$ – разброс напряжения стабилизации; $\delta U_{ст}$ – временная нестабильность напряжения стабилизации.

Стабильность одиночных стабилизаторов на полтора-два порядка выше стабильности удобных, с точки зрения простоты схемотехники, двуханодных стабилизаторов. Но стабилизаторы по своей сути являются параметрическими радиоэлементами и имеют технологические ограничения по повышению их стабильности. Исключение составляет режим термостатирования, но этот режим требует для своей работы большого потребления мощности от источника питания.

Для создания высокостабильных ИОН широко используются специализированные ИМС, некоторые из которых, отечественные и зарубежные, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры источников опорного напряжения параллельного типа

Параметры	$U_{ст}$, В	$I_{пот}$, мА	$I_{вых}$, мА	$\Delta U_{ст} \cdot 10^{-6}$, 1/°C	$\delta U_{ст}$, %	Страна	T_{MIN}, T_{MAX} , °C
2С120Б	1,225	0,5	125	$\pm 5,0$	0,03	(Россия)	-60...+125
1369ЕС01В4	2,5; 3,0	1,5	10,0	10,0	-	(Россия)	-60...+125
5400ТР045А-031	2,048; 2,5; 4,096	3,0	20,0	50,0	-	СОЮЗ дизайн-центр	-60...+125
5317ЕС015	2,5	0,07	-	50,0	-	Интеграл (Беларусь)	-60...+125
УР1101ЕН01	1,25	-	0,05-5	10-100	0,32-4	ДП «Квazar-ИС»	
Н142ЕН19 142ЕР2У	2,5 1,24	1-80	-	50 100	0,12 0,03	НПП ОАО «ЭлТом»	-60...+125
1309ЕС	1,25-4,096	4,0	10,0	20	-	«Миландр»	-60...+125
1394ЕС025	1,225	0,05-10	-	50	-	НЗПП «Восток»	-60...+125
МАХ6138	1,22-5	0,5-10	-	4,0	0,1-0,5	МАХИМ, США	-65...+150
ADR5040	2,048-5	0,005-15	-	10,0	$\pm 0,2$	Analog Device	-60...+120

Несомненным преимуществом интегральных ИОН является их невысокое напряжение стабилизации – 1,225...5,0 В, что недостижимо для стабилизаторов. Для построения ГЛИН с источником опорного напряжения на одиночных стабилизаторах больше подходят ИОН с параллельным включением регулирующего элемента (РЭ). Такие ИОН часто на схемах обозначают как одиночный стабилизатор.

Схема двухполярного источника опорного напряжения на двух одиночных стабилизаторах показана на рис. 2.

Пунктиром на схеме выделена часть схемы ГЛИН, касающейся триггера Шмитта на ОУ DA2. На одиночных стабилизаторах VD и балластных резисторах R_B выполнены параметрические стабилизаторы, формирующие два опорных напряжения: $+U_{оп}$ и $-U_{оп}$. Электронный переключающий ключ S с помощью устройства управления УУ осуществляет подключение напряжения ИОН к инвертирующему входу ОУ: на временном интервале нарастания напряжения на выходе интегратора – к источнику $+U_{оп}$ (рис. 2), а на временном интервале спада

напряжения на выходе интегратора – к источнику $-U_{\text{оп}}$. Устройство управления в качестве информационных сигналов использует потенциал U_2 .

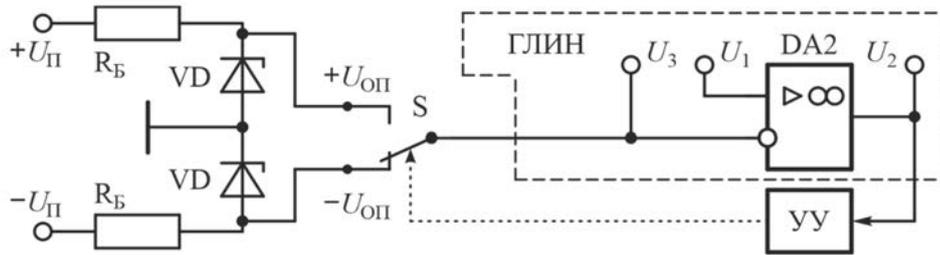


Рис. 2. Схематика ГЛИН с ИОН на двух одиночных стабилизаторах

Применение двух одиночных стабилизаторов в ИОН увеличивает его нестабильность по сравнению с одним стабилизатором, так как их дрейфы не коррелированы. В этом случае необходимо брать среднеквадратическое отклонение (СКО) напряжения стабилизации двух стабилизаторов

$$\Delta U_{\text{ст}}^* = \sqrt{(\Delta U_{\text{ст}1})^2 + (\Delta U_{\text{ст}2})^2}, \quad (6)$$

где $\Delta U_{\text{ст}1}$ и $\Delta U_{\text{ст}2}$ – дрейф первого и второго стабилизаторов VD. Для двух стабилизаторов 2С120Б СКО будет $\Delta U_{\text{ст}}^* = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07$ [мкВ/°С]. Кроме того, в редком случае одиночные стабилизаторы способны обеспечить равенство напряжений положительной и отрицательной полярности. Как правило, $|+U_{\text{оп}}| \neq |-U_{\text{оп}}|$.

Для определения значения тока $i_{\text{пос}}$ в выражении (2) необходимо учесть дрейф напряжения смещения ОУ DA1

$$i_{\text{пос}} = (U_3 + U_{\text{см оу}}) / R. \quad (7)$$

В соответствии с выражением (4) и (7)

$$\Delta i_{\text{пос}} = \frac{1}{R^2} (R(\Delta U_3 + \Delta U_{\text{см}}) - (U_3 + U_{\text{см}}) \Delta R). \quad (8)$$

Параметры некоторых прецизионных ОУ представлены в табл. 6 [12, 13].

Таблица 6

Основные параметры прецизионных ОУ

ОУ	$U_{\text{см}}$, мкВ	$\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$, мкВ/°С	K_U , $\times 10^3$	$I_{\text{вх}}$, нА	$\Delta I_{\text{вх}} / \Delta T$, нА/°С	f , МГц	$V_{\text{U вых}}$, В/мкс	$I_{\text{потр}}$, мА
140УД17	75	3,0	200	2,5	0,025	4,0	0,1	4,5
140УД26	30	0,6	1000	40,0	1,0	20,0	11,0	5,0
140УД31	25	0,6	300	2,0	0,025	0,25	–	4,0
544УД12	10	0,6	2000	1,0	0,15	0,4	0,1	1,0
140УД24	5	0,05	$1 \cdot 10^3$	0,01	0,2	0,8	2,0	4,0
МАХ4239	0,1	0,01	$3 \cdot 10^4$	0,001	–	6,5	1,6	0,6

Подставляя значения параметров, рассмотренных выше радиоэлементов и ОУ 140УД26 (544УД12), в выражение (8), получим

$$\Delta i_{\text{пос}} = \frac{1}{10^{10}} (10^5 \cdot (7,07 + 0,6) \cdot 10^{-6} - (1,25 + 3,0 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-6}) \approx 7,67 \cdot 10^{-11} \text{ [A]}. \quad (9)$$

Для резистора $R = 10$ кОм – $\Delta i_{\text{пос}} \approx 7,67 \cdot 10^{-10}$ [A]; для резистора $R = 1,0$ кОм – $\Delta i_{\text{пос}} \approx 7,67 \cdot 10^{-9}$ [A].

**Схемотехника ГЛИН с источником опорного напряжения
на одном одиночном стабилитроне**

Для исключения несимметричности напряжения U_3 ($U_{оп}$) для положительной и отрицательной полярности и повышения стабильности тока $i_{пос}$ была разработана схема двухполярного ИОН на одном стабилитроне, показанная на рис. 3.

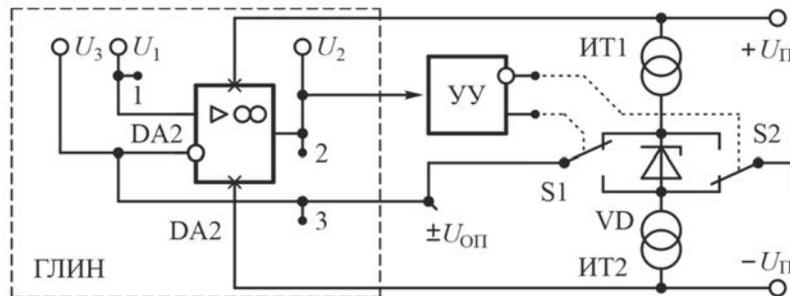


Рис. 3. Схемотехника ГЛИН с ИОН на одном одиночном стабилитроне

Пунктиром на схеме выделена часть схемы ГЛИН, касающейся триггера Шмитта на ОУ DA2. На источниках тока ИТ1 и ИТ2 выполнена цепь смещения стабилитрона, обеспечивающая рабочий режим его работы. Устройство управления управляет двумя переключающими электронными ключами S1 и S2, работающими в противофазе. В указанном на схеме положении ключей анод стабилитрона подключен к общему проводу и имеет нулевой потенциал, а катод подключен к источнику тока ИТ1 и на нем формируется напряжение $+U_{оп}$. Противоположное состояние ключей обеспечивает подключение катода стабилитрона к общему проводу и теперь на нем обеспечивает нулевой потенциал, а на аноде стабилитрона в это время формируется напряжение $-U_{оп}$.

В этом случае в соответствии с выражениями (7–9) для резистора $R = 10$ кОм дрейф тока $\Delta i_{пос} \approx 5,6 \cdot 10^{-11}$ [А].

Для получения $\Delta i_{пос}$ меньшего значения необходимо применять стабилитроны или источники опорного напряжения (ИОН) в виде интегральных схем с термостатированием. Так, термостабилизированный ИОН фирмы Linear Technology LTZ1000A имеет дрейф всего 0,05 мкВ/°С, но имеет достаточно высокое энергопотребление [14]. В этом случае для ИОН LTZ1000A и для $R = 100$ кОм возможно получить дрейф тока $\Delta i_{пос} \approx 6,5 \cdot 10^{-12}$ [А].

Для достижения высоких параметров стабильности тока $i_{пос}$, рассмотренных выше, необходимо также учесть и дрейф ($\Delta I_{вх} / \Delta T$) входного тока ОУ (табл. 6). Операционные усилители необходимо выбирать с минимальными значениями дрейфов $U_{см}$ и $i_{вх}$.

Один из вариантов построения источников тока ИТ1 и ИТ2 показан на рис. 4.

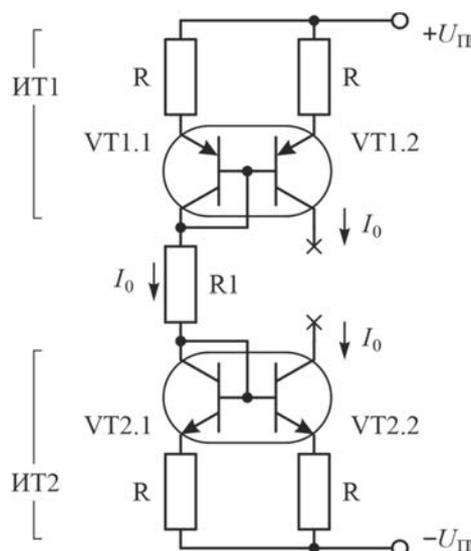


Рис. 4. Схемотехника источников тока ИТ1 и ИТ2 на токовом зеркале

Источники тока построены как токовое зеркало: ИТ1 – на дифференциальной паре биполярных транзисторов VT1.1, VT1.2; ИТ2 – на дифференциальной паре биполярных транзисторов VT2.1, VT2.2. Элементом, задающим значение тока I_0 , является резистор R_1 . Значение тока I_0 определяется следующим выражением:

$$I_0 = \left[(|+U_{\Pi}| + |-U_{\Pi}|) - (U_{БЭ\ VT1.1} + U_{БЭ\ VT2.1} + 2U_R) \right] / R_1. \quad (10)$$

Стабилитрон VD (см. рис. 3) необходимо подключать к коллекторам транзисторов VT1.2 и VT2.2.

Рассмотренная методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения позволяет повысить точность выставки пороговых напряжений триггера Шмитта и тем самым повысить стабильность работы различных электронных устройств, в которых ТШ применяется как основной элемент, и его точностные параметры определяют точностные параметры всего измерительного устройства. Так, в работах [10, 15, 16] рассматривается применение ТШ для создания автоколебательного режима работы акселерометра. Автоколебательный режим работы акселерометра позволяет повысить чувствительность акселерометра, а более высокие точностные параметры ТШ – снизить погрешность производимых измерений кажущегося ускорения.

Методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения

Методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения включает в себя следующие действия:

- 1) использование в качестве объекта модернизации преобразователь напряжение – временной код;
- 2) использование в качестве непрерывного интегратора генератора линейно изменяющегося сигнала на двух ОУ;
- 3) перевод ГЛИН в управляемый режим работы для получения временных интервалов t_1 и t_2 , значения которых зависят от значения входного управляющего сигнала;
- 4) разработка математической модели стабильности преобразования входного напряжения в зависимости от стабильности ИОН;
- 5) разработка схемотехнических решений для использования одиночного прецизионного стабилитрона для формирования двухполярного опорного напряжения;
- 6) выдача рекомендаций по выбору операционных усилителей по параметрам, обеспечивающим минимальное паразитное их влияние на работу схемы;
- 7) выдача схемотехнических рекомендаций по реализации двухполярного источника тока.

Заключение

Использование рассмотренной методики позволяет повысить точность интегрирования входного сигнала и тем самым снизить погрешность преобразования входного аналогового сигнала во временной интервал. Указанная методика может быть использована для конструирования широкого круга измерительных приборов, в которых необходимо осуществить преобразование аналоговой величины в цифровой код.

Список литературы

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2 кн. М. : Мир, 1992.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М. : Додэка-XXI, 2005. 528 с.
3. Микросхемы АЦП и ЦАП. М. : Додэка-XXI, 2005. 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. М. : Додэка-XXI, 2008. 942 с.
5. Харрисон Л. Т. Источники опорного напряжения и тока : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2015. 576 с.
6. Ватутин М. А., Ефимов В. П., Борматов Е. В., Зубков А. В. Методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины во временной интервал // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 16–22. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

7. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.
8. Слепова С. В. Основы теории точности измерительных приборов : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.
9. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Машиностроение, 1978. 831 с.
10. Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А. [и др.]. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43–46.
11. Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5
12. Операционные усилители и компараторы : справочник. Т. 12. М. : Додэка-XXI, 2001.
13. Картер Р., Манчини Р. Операционные усилители для всех : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2016. 528 с.
14. LTZ1000A. Ультрапрецизионные источники опорного напряжения. URL: http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=66781 (дата обращения: 24.10.2023).
15. Ватутин М. А., Ключников А. И., Козлов Д. М. Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 22–32.
16. Ватутин М. А., Ключников А. И. Методика повышения стабильности работы нелинейного звена с запаздыванием для автоколебательного акселерометра // Труды МАИ. 2022. № 127. doi: 10.34759/trd-2022-127-22

References

1. Ash Zh. *Datchiki izmeritel'nykh sistem: v 2 kn. = Sensors of measuring systems : in 2 books*. Moscow: Mir, 1992. (In Russ.)
2. Volovich G.I. *Skhemitekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv = Circuitry of analog and analog-digital electronic devices*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:528. (In Russ.)
3. *Mikroskhemy ATsP i TsAP = ADC and DAC chips*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:432. (In Russ.)
4. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemitekhnika: per. s nem. = Semiconductor circuit engineering : trans. from German*. Moscow: Dodeka-XXI, 2008:942. (In Russ.)
5. Kharrison L.T. *Istochniki opornogo napryazheniya i toka: per. s angl. = Sources of reference voltage and current : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2015:576. (In Russ.)
6. Vatutin M.A., Efimov V.P., Bormatov E.V., Zubkov A.V. Method of circuit design of an analog magnitude converter in a time interval. *Izmerenie. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(3):16–22. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2
7. Dushina E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)
8. Slepova S.V. *Osnovy teorii tochnosti izmeritel'nykh priborov: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of accuracy of measuring instruments : textbook*. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2008:192. (In Russ.)
9. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov = Handbook of mathematics for scientists and engineers*. Moscow: Mashinostroenie, 1978:831. (In Russ.)
10. Luchko S.V., Baluev S.Yu., Vatutin M.A. et al. Precision parameters of a nonlinear link for an auto-oscillatory accelerometer. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2013;56(12):43–46. (In Russ.)
11. Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with a semiconductor sensing element. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5
12. *Operatsionnye usiliteli i komparatory: spravochnik. T. 12 = Operational amplifiers and comparators : handbook. Vol. 12*. Moscow: Dodeka-XXI, 2001. (In Russ.)
13. Karter R., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh: per. s angl. = Operational amplifiers for all : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2016:528. (In Russ.)
14. LTZ1000A. *Ul'trapretsizionnye istochniki opornogo napryazheniya = LTZ1000A. Ultra-precision reference voltage sources*. (In Russ.). Available at: http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=66781 (accessed 24.10.2023).
15. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Kozlov D.M. Methodology for reducing the error of the self-oscillatory accelerometer. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2022;(4):22–32. (In Russ.)
16. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. A technique for increasing the stability of a nonlinear link with a delay for an auto-oscillatory accelerometer. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2022;(127). (In Russ.). doi: 10.34759/trd-2022-127-22

*Информация об авторах / Information about the authors***Михаил Алексеевич Ватутин**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автономных систем управления,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vatutinm@inbox.ru

Mikhail A. Vatutin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of autonomous control systems,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Игорь Николаевич Кошель

кандидат технических наук, начальник факультета,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Igor N. Koshel

Candidate of technical sciences, head of the faculty,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Владимир Владимирович Бурмистров

кандидат технических наук,
старший преподаватель 21 кафедры,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vladimir V. Burmistrov

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the 21 sub-department,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Никита Александрович Петров

курсант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Nikita A. Petrov

Cadet,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 03.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 01.07.2024

Принята к публикации / Accepted 30.07.2024

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.654

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АРИТМИИ

В. А. Гасанова¹, А. В. Пушкарева²

^{1,2} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹veronicka6949@yandex.ru, ²a.v.push89@gmail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обнаружение аритмии считается основой диагностики сердечно-сосудистых заболеваний в настоящее время. Аритмия может быть вызвана различными факторами, такими как заболевания сердца, прием лекарств, стресс, в некоторых случаях аритмия может быть опасной для жизни, поэтому задача ее своевременного выявления и лечения крайне актуальна. Нестационарная природа и вариативность сигналов ЭКГ у разных пациентов обуславливают отсутствие универсального подхода для выявления аритмий в момент их возникновения. Разработанные методы выделения и классификации признаков аритмии, реализованные в автоматизированных системах контроля аритмии, оптимизируют работу врачей в задачах диагностики, анализируя электрокардиограммы (ЭКГ) и другие данные для выявления признаков аритмии. Существующие автоматизированные системы диагностики аритмии основаны на использовании алгоритмов машинного обучения для анализа ЭКГ, и выделяют признаки, характерные для различных видов аритмии. Целью работы является разработка структурной схемы автоматизированной системы мониторинга аритмии, анализ основных методов анализа variability сердечного ритма и использование адаптируемых пороговых значений на примере сигнала ЭКГ при патологии. *Материалы и методы.* Проанализированы существующие автоматизированные системы диагностики аритмии, обоснована необходимость персонализации большого и репрезентативного набора данных пациентов, включая пол, возраст, хронические заболевания, данные всех предшествующих ЭКГ. *Результаты.* Предложена структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии с интеграцией личной медицинской информации и использовании искусственного интеллекта. *Заключение.* Разработана структурная схема автоматизированной системы мониторинга аритмии, проанализированы основные методы анализа variability сердечного ритма использован адаптируемый порог по возрасту пациента на примере сигнала ЭКГ при аритмии.

Ключевые слова: аритмия, персонализация, мониторинг, автоматизированная система, классификация аритмии, телемедицинские системы и технологии, персонализированная диагностика, электрокардиограмма

Для цитирования: Гасанова В. А., Пушкарева А. В. Автоматизированная персонализированная система мониторинга аритмии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 81–87. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

AUTOMATED PERSONALIZED ARRHYTHMIA MONITORING SYSTEM

V.A. Gasanova¹, A.V. Pushkareva²

^{1,2} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹veronicka6949@yandex.ru, ²a.v.push89@gmail.ru

Abstract. *Background.* The detection of arrhythmia is considered the basis for the diagnosis of cardiovascular diseases at the present time. Arrhythmia can be caused by various factors, such as heart disease, medication, stress, in some cases, arrhythmia can be life-threatening, so the task of its timely detection and treatment is extremely urgent. The non-

stationary nature and variability of the electrocardiogram form in different patients leads to the lack of a universal approach for detecting arrhythmias at the time of their occurrence. The developed methods for identifying and classifying signs of arrhythmia, implemented in automated arrhythmia monitoring systems, optimize the work of doctors in diagnostic tasks by analyzing electrocardiograms and other data to identify signs of arrhythmia. The existing automated systems for the diagnosis of arrhythmia are based on the use of machine learning algorithms for the analysis of an electrocardiogram, and identify signs characteristic of electrocardiogram analysis, and identify signs characteristic of various types of arrhythmias. The aim of the work is to develop the structure of an automated arrhythmia monitoring system, analyze the main methods for analyzing heart rate variability and use adaptable threshold values using the example of an electrocardiogram in pathology. *Materials and methods.* The study materials were electrocardiograms with arrhythmia episodes from certified databases. The study was conducted using mathematical statistics methods. *Results.* The structure of an automated personalized arrhythmia monitoring system with the integration of personal medical information and the use of artificial intelligence is proposed. *Conclusion.* The structure of an automated arrhythmia monitoring system has been developed, the main methods of analyzing heart rate variability have been analyzed and an adaptable threshold for patient age has been used on the example of an electrocardiogram for arrhythmia.

Keywords: arrhythmia, personalization, monitoring, automated system, arrhythmia classification, telemedicine system, personalized diagnostics, electrocardiogram

For citation: Gasanova V.A., Pushkareva A.V. Automated personalized arrhythmia monitoring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):81–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

Введение

Одним из жизненно важных органов является сердце [1]. Во всем мире заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) человека до сих пор являются главной причиной смертности и инвалидности населения [2]. В последние два десятилетия отчетливо наблюдается тенденция по увеличению частоты и тяжести этих заболеваний, которые все чаще встречаются в любом возрасте [3].

Выявление аритмии является основой диагностики сердечно-сосудистых заболеваний по причине возможного увеличения частоты инсультов, внезапной сердечной смерти и их осложнений [4].

В настоящее время внимание общества фокусируется на IT-технологиях, совмещающих в себе мобильность и возможность удаленной работы [5] при мониторинге состояния аритмий.

Специализированные приложения и сенсорные датчики, интегрированные в мобильные устройства связи или используемые в дополнение к ним, позволяют пользователям отслеживать, собирать и обмениваться данными, отражающими физиологические параметры и сведения о состоянии здоровья [6].

Несмотря на все достижения по улучшению качества диагностики аритмии с помощью автоматизированных систем [7], существующие системы имеют ряд недостатков: низкая точность диагностики редких или сложных форм аритмии, низкая надежность при использовании в домашних условиях, высокая стоимость, необходимость обучения врачей и отсутствие персонализации.

В настоящее время ведется активная работа по совершенствованию этих систем, направленная на повышение их точности, надежности и интерпретируемости результатов электрокардиографического обследования.

Материалы и методы

Рассматривая метод дискретного ортогонального преобразования Стоквелла (ДОПС) [8], который позволяет эффективно выделять признаки из ЭКГ сигналов для последующего анализа и классификации, можно отметить, что, как и все существующие методы по обработке и классификации аритмии, ДОПС имеет недостатки в виде сложности выбора параметров преобразования (шаг дискретизации, чувствительности к шумам и артефактам в данных ЭКГ).

Реализация автоматизированной персонализированной системы мониторинга [8] аритмии позволит минимизировать влияние шумов и артефактов на качество анализа, что особенно важно для точной диагностики аритмий.

Повышение помехоустойчивости при обработке электрокардиосигнала позволяет повысить достоверность автоматических заключений, что способствует повышению качества диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, в частности аритмий [9], а объединение информационных и статистических параметров распределений открывает новые возможности оценки параметров моделей стохастических процессов [10].

Помимо основных расчетов, используемых для анализа сигнала ЭКГ, таких как расчет сердечного ритма в ударах, нормализованного QT -интервала, PR -интервала, ST -интервала и амплитуд QRS -комплекса, T -волны и P -волны, в автоматизированной персонализированной системе мониторинга аритмий необходимо использовать алгоритм анализа ВСП, адаптированный под индивидуальные характеристики пациента. Основные формулы для расчета ВСП, используемые в алгоритме работы автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии, представлены ниже:

1. Стандартное отклонение всех RR -интервалов ($CO RR$):

$$CO RR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2}, \quad (1)$$

где RR_i – длительность i -го RR -интервала; \overline{RR} – среднее значение длительности всех RR -интервалов; N – общее количество RR -интервалов.

2. Среднее квадратичное отклонение последовательных различий между RR -интервалами (СКОПР RR):

$$СКОПР RR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}. \quad (2)$$

3. Процент RR -интервалов, различающихся более чем на 50 мс от предыдущего интервала ($pRR50$):

$$pRR50 = \left(\frac{\text{количество } |RR_{i+1} - RR_i| > 50 \text{ мс}}{N-1} \right) \cdot 100 \%. \quad (3)$$

4. Частотный анализ ВСП, включающий измерение мощности в трех основных диапазонах: менее 0,04 Гц (очень низкая частота); от 0,04 до 0,15 Гц (низкая частота); от 0,15 до 0,4 Гц (высокая частота).

Ниже представлен сигнал ЭКГ в норме и с патологией (фибриляция предсердий) с применением основных методов анализа ВСП в MATLAB (рис. 1–3).

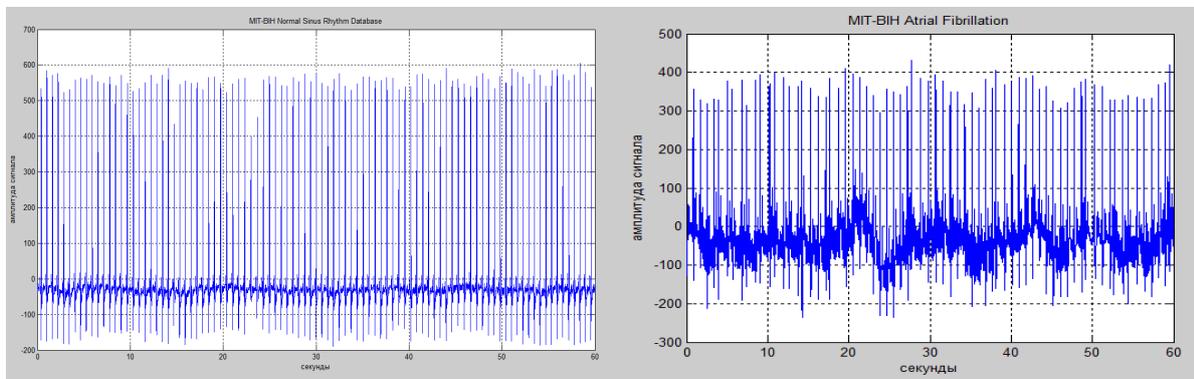


Рис. 1. Сигнал ЭКГ в норме и при патологии

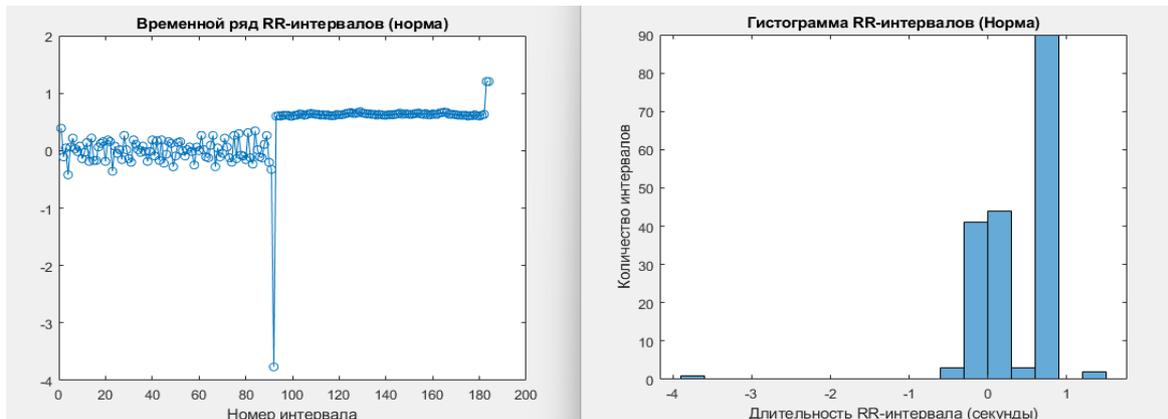


Рис. 2. Временной ряд и гистограмма распределения длительностей RR -интервалов в норме ($CO RR$: 0,46 с, СКОПР RR : 0,45 с)

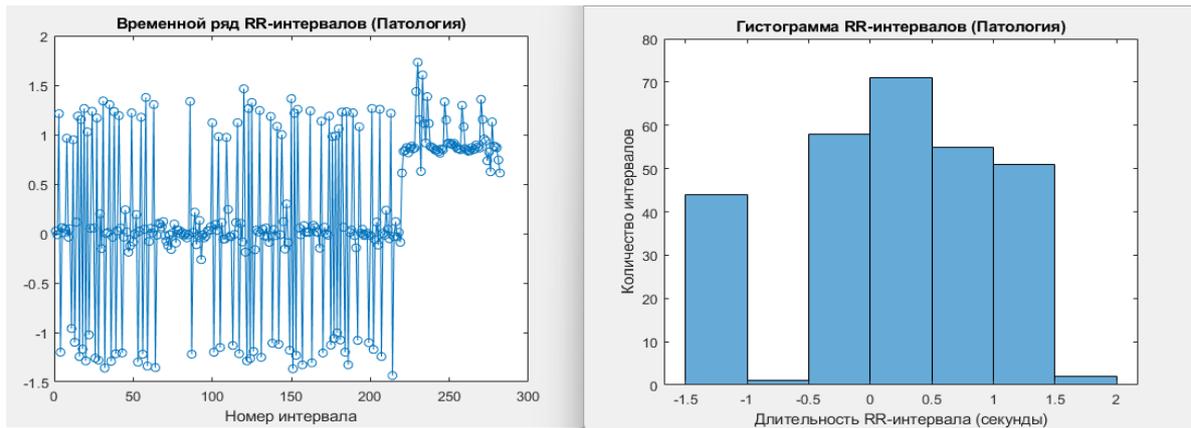


Рис. 3. Временной ряд и гистограмма распределения длительностей RR-интервалов при патологии (CO RR: 0,8 с, СКОПР RR: 1,2 с)

Данные, которые были получены в результате анализа ВСР, указывают на умеренную общую ВСР нормы, что свидетельствует о достаточной адаптации автономной нервной системы к внешним и внутренним воздействиям в отличие от патологии (фибриляция предсердий). Значения СКОПР RR нормы указывают на нормальную активность парасимпатической нервной системы, а значения СКОПР RR при патологии значительно выше нормы, что может указывать на чрезмерную активность парасимпатической нервной системы.

Представленных расчетов недостаточно для индивидуального анализа сердечного ритма. Соответственно, для персонализированного мониторинга после основных расчетов и действий по обработке сигнала необходимо сделать анализ ВСР более персонализированным, исходя из индивидуальных параметров и историй медицинских данных пользователя. Рассматриваемую задачу возможно реализовать с помощью применения адаптируемых порогов для анализ ВСР (рис. 4).

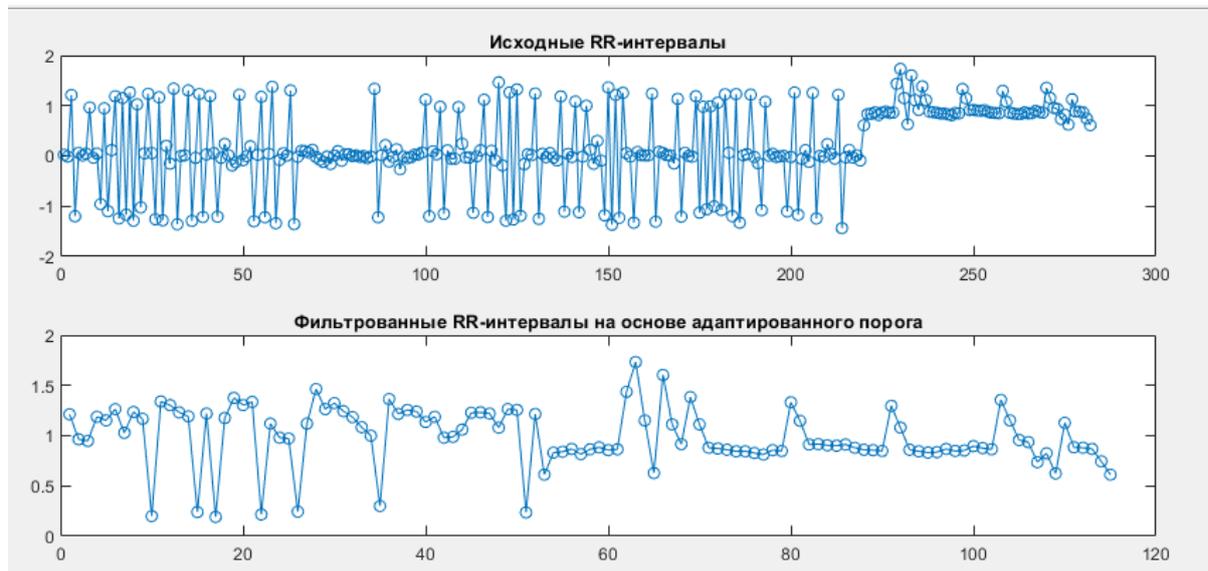


Рис. 4. Фрагмент использования адаптируемого возрастного порога (30 лет) на примере сигнала ЭКГ при аритмии (фибриляция предсердий)

На рис. 4 представлен фрагмент использования адаптируемых порогов в среде Matlab, в качестве порога использовался показатель возраста (была выбрана условная конструкция). Разработан алгоритм, который позволяет присваивать разные пороговые значения в зависимости от условия (например, возраст пользователя 30 лет). На нижнем рисунке видны только те RR-интервалы, которые превышают порог (30 лет) и, как следствие, график выглядит более ровным.

Данных подход позволяет создать более гибкую и персонализированную систему мониторинга ВСП, которая может быть адаптирована под конкретного пользователя в автоматизированной персонализированной системе мониторинга аритмии.

Результаты

Автоматизированная персонализированная система мониторинга аритмии имеет сложную структуру, которая включает в себя несколько компонентов, работающих в тесном взаимодействии (рис. 5).

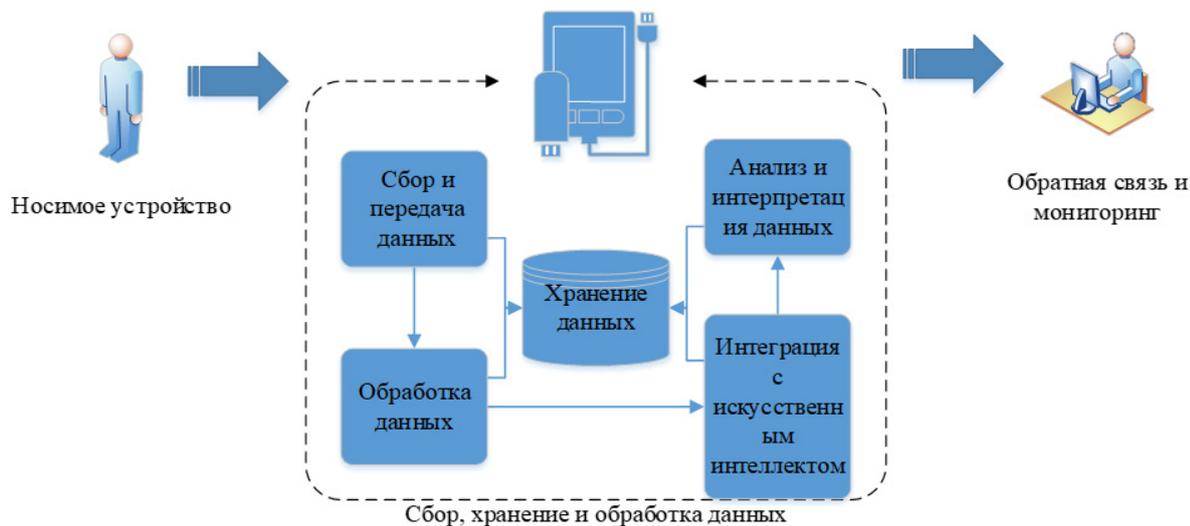


Рис. 5. Структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии

Представленная структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии на рис. 5 состоит из носимого устройства, служащего для записи сердечного ритма и регистрации электрокардиограммы, блока «Сбор и передача данных», который отвечает за сбор данных с носимого устройства и их передачу (осуществляется по беспроводной сети и в режиме реального времени) для дальнейшего анализа, а в блоке «Обработка данных», собранная информация подвергается предварительной обработке, которая включает в себя фильтрацию шума, анализ ВСП с применением адаптируемых порогов, которые учитывают индивидуальные особенности пользователя.

Блок «Анализ и интерпретация данных» реализует работу алгоритмов и методов машинного обучения, для адаптации под личные медицинские данные пользователя, далее информация поступает в блок «Интеграция с искусственным интеллектом», который используется для усовершенствования процесса анализа данных, обучаясь на большом количестве данных. Все данные, подвергающиеся обработке и анализу, сохраняются для дальнейшего использования, а обратная связь и мониторинг обеспечивают пользователю предоставление информации о состоянии его здоровья.

Интеграция личной медицинской информации в структуре, представленной на рис. 5, обеспечивает индивидуальный подход к анализу данных, что повышает точность диагностики и эффективности мониторинга, а использование искусственного интеллекта, опираясь на детальный анализ и обучение, позволяет повысить качество и быстроту мониторинга аритмий.

Структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии настроена на учет индивидуальных особенностей каждого пациента, а способность системы обеспечивать обратную связь позволяет быстро реагировать на потенциальные проблемы.

Обсуждение

Ожидается развитие автоматизированных персонализированных систем контроля аритмии в таких направлениях, как использование более мощных и эффективных алгоритмов машинного обучения, использование более крупных наборов данных ЭКГ для обучения алгоритмов машинного обучения, разработка методов автоматизированной диагностики аритмии, учитывающих более широкий спектр индивидуальных особенностей пациента и развитие

автоматизированных персонализированных систем контроля аритмии позволит улучшить качество диагностики и лечения аритмии.

Заключение

В результате работы разработана структурная схема автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии, которая включает в себя носимое устройство, сбор и передачу данных, хранение данных, обработку данных, интеграцию с искусственным интеллектом, анализ и интерпретацию данных и обратную связь.

Анализ основных методов ВСП показал существующие недостатки в виде сложности выбора параметров преобразования, таких как шаг дискретизации, чувствительности к шумам и артефактам в данных ЭКГ.

Проведенный анализ сигналов ЭКГ в норме и патологии показал разницу между $CO RR$ (в норме – 0,46, при патологии – 0,8) и $СКОПР RR$ (в норме – 0,45, при патологии – 1,2), которая указывает на повышенную вариабельность сердечного ритма (при патологии).

Представленных данных недостаточно для точной постановки диагноза, что приводит к необходимости использования персонализируемых адаптируемых порогов при обработке сигналов ЭКГ.

Отфильтрованные данные сигнала ЭКГ в результате использования адаптируемого показателя (возраста) могут эффективно использоваться для оценки состояния вегетативной нервной системы и потенциального выявления патологий сердца.

Список литературы

1. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani. A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques // *J. Clin. Med.* 2021. Vol. 10. P. 5450. doi: 10.3390/jcm10225450
2. Heron M. Deaths: Leading Causes for 2013 // *Natl Vital Stat Rep.* 2016. Vol. 65. P. 1–95. PMID: 26906146.
3. Roth G. A., Forouzanfar M. H., Moran A. E. [et al.]. Demographic and epidemiologic drivers of global cardiovascular mortality // *N Engl J Med.* 2015. Vol. 372, № 14. P. 1333–1341. doi: 10.1056/NEJMoa1406656. PMID: 25830423 ; PMID: PMC4482354
4. Kingma J, Simard C, Drolet B. Overview of Cardiac Arrhythmias and Treatment Strategies // *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023. Vol. 16, № 6. P. 844. doi: 10.3390/ph16060844. PMID: 37375791; PMID: PMC10301085
5. Балахонова С. А., Бодин О. Н., Логинов Д. С. [и др.]. Организация распределенной системы диагностики состояния сердца // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2016. № 2 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raspredelennoy-sistemy-diaagnostiki-sostoyaniya-serdtsa> (дата обращения: 12.04.2024).
6. Varma N., Cygankiewicz I., Turakhia M. P. [и др.]. Контроль аритмий с помощью технологий мобильного здравоохранения: цифровые медицинские технологии для специалистов по сердечному ритму. Консенсус экспертов 2021 // *Российский кардиологический журнал.* 2021. № S1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-aritmiy-s-pomoschyu-tehnologiy-mobilnogo-zdravoohraneniya-tsifrovye-meditsinskie-tehnologii-dlya-spetsialistov-po> (дата обращения: 24.04.2024).
7. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques // *J. Clin. Med.* 2021. Vol. 10. P. 5450. doi: 10.3390/jcm10225450
8. Raj S., Ray K. C. A Personalized Arrhythmia Monitoring Platform // *Sci Rep.* 2018. Vol. 30, № 8. P. 11395. doi: 10.1038/s41598-018-29690-2. PMID: 30061754; PMID: PMC6065378
9. Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Кривоногов Л. Ю. [и др.]. Классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2023. № 4. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8
10. Полосин В. Г., Бодин О. Н. Применение энтропийно-параметрического потенциала для мониторинга результатов электрофизиологических характеристик сердца // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2015. № 4 (14). С. 3–9.

References

1. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani. A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques. *J. Clin. Med.* 2021;10:5450. doi: 10.3390/jcm10225450
2. Heron M. Deaths: Leading Causes for 2013. *Natl Vital Stat Rep.* 2016;65:1–95. PMID: 26906146.
3. Roth G.A., Forouzanfar M.H., Moran A.E. et al. Demographic and epidemiologic drivers of global cardiovascular mortality. *N Engl J Med.* 2015;372(14):1333–1341. doi: 10.1056/NEJMoa1406656. PMID: 25830423 ; PMID: PMC4482354

4. Kingma J, Simard C, Drolet B. Overview of Cardiac Arrhythmias and Treatment Strategies. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023;16(6):844. doi: 10.3390/ph16060844. PMID: 37375791; PMCID: PMC10301085
5. Balakhonova S.A., Bodin O.N., Loginov D.S. et al. Organization of a distributed system for diagnosing the state of the heart. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raspredeleyennoy-sistemy-diagnostiki-sostoyaniya-serdtsa> (accessed 12.04.2024).
6. Varma N., Cygankiewicz I., Turakhia M. P. et al. Arrhythmia control using mobile healthcare technologies: digital medical technologies for heart rhythm specialists. Consensus of experts 2021. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2021;(S1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-aritmiy-s-pomoschu-tehnologiy-mobilnogo-zdravoohraneniya-tsifrovye-meditsinskie-tehnologii-dlya-spetsialistov-po> (accessed 24.04.2024).
7. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques. *J. Clin. Med*. 2021;10:5450. doi: 10.3390/jcm10225450
8. Raj S., Ray K.C. A Personalized Arrhythmia Monitoring Platform. *Sci Rep*. 2018;30(8):11395. doi: 10.1038/s41598-018-29690-2. PMID: 30061754; PMCID: PMC6065378
9. Bodin A.Yu., Kramm M.N., Krivonogov L.Yu. et al. Classification of electrocardiographic interference and development of a method for segmentation of the electrocardiosignal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8
10. Polosin V.G., Bodin O.N. Application of entropy-parametric potential for monitoring the results of electrophysiological characteristics of the heart. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2015;(4):3–9. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вероника Алексеевна Гасанова

аспирант,
инженер кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: veronicka6949@yandex.ru

Veronika A. Gasanova

Postgraduate student,
engineer of the sub-department
of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Анастасия Валерьевна Пушкарёва

кандидат технических наук,
доцент кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: a.v.push89@gmail.ru

Anastasiya V. Pushkareva

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.07.2024

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ПОДВИЖНОСТИ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ

М. А. Ксенофонтов¹, А. Ю. Муйземнек²

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

¹ MAKsenofontov@mail.ru, ² muyzemnek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена потребностью в паре трения для эндопротезирования тазобедренного сустава, которая могла бы обеспечить более длительное функционирование без необходимости выполнения ревизионных операций. Целью работы является сопоставление прочности конструкции головки и вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения из монолитного и немонолитного углеситалла марки УСБ. *Материалы и методы.* В основу компьютерной модели тазобедренного сустава положен метод конечных элементов. Для оценки прочности использовался критерий П. П. Баландина. *Результаты.* Разработанные компьютерные модели позволили оценить прочность различных конструкций головки и вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава. Оценка полученных данных напряжений выявила недостаточную прочность конструкции узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава с немонолитным углеситаллом марки УСБ. Конструкция эндопротеза с монолитным углеситаллом марки УСБ имеет запас прочности равный 4,5. *Выводы.* Конструкция головки и вкладыша с использованием монолитных компонентов углеситалла марки УСБ позволяет обеспечить достаточный запас прочности узла подвижности для использования в эндопротезировании тазобедренного сустава.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, эндопротезирование тазобедренного сустава, углеситалл марки УСБ, пара трения

Для цитирования: Ксенофонтов М. А., Муйземнек А. Ю. Сопоставление напряженного состояния узлов подвижности эндопротеза тазобедренного сустава разной конструкции // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 88–93. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-11

COMPARISON OF THE STRENGTH OF THE DESIGN OF THE MOBILITY UNIT OF THE HIP JOINT ENDOPROSTHESIS WITH MONOLITHIC AND NON-MONOLITHIC USB CARBOSITALL

M.A. Ksenofontov¹, A.Yu. Muiyemnek²

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

¹ MAKsenofontov@mail.ru, ² muiyemnek@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the need for a friction pair for hip replacement, which could ensure longer functioning without the need for revision operations. The purpose of the work is a comparison of the strength of the design of the head and liner of the hip joint endoprosthesis with a friction pair made of monolithic and non-monolithic USB carbosital. *Materials and methods.* The computer model of the hip joint is based on the finite element method. To assess the strength, the P.P. Balandin criterion was used. *Results.* The developed computer models made it possible to evaluate the strength of various designs of the head and liner of the hip joint endoprosthesis. Evaluation of the obtained stress data revealed insufficient strength of the design of the mobility unit of the hip joint endoprosthesis with non-monolithic USB carbosital. The design of the endoprosthesis with monolithic USB carbosital has a safety margin of 4.5. *Conclusions.* The design of the head and liner using monolithic components of USB carbosital makes it possible to provide a sufficient margin of safety for the mobility unit for use in hip arthroplasty.

Keywords: computer modelling, hip replacement, USB carbosital, friction pair

For citation: Ksenofontov M.A., Muiyemnek A.Yu. Comparison of the strength of the design of the mobility unit of the hip joint endoprosthesis with monolithic and non-monolithic usb carbosital. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):88–93. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-11

Введение

При дегенеративно-дистрофических заболеваниях тазобедренного сустава более 10 % становятся инвалидами. Одним из самых частых дегенеративно-дистрофических заболеваний является коксартроз. Частота заболеваемости коксартрозом у пациентов старше 35 лет достигает 10,8 % и с возрастом увеличивается, достигая 35,4 % у пациентов старше 85 лет [1]. При неэффективности консервативного лечения на первое место выходит хирургический способ лечения – тотальное эндопротезирование тазобедренного сустава [2–5]. В России количество операций эндопротезирования тазобедренного сустава человека в 2019 г. составило более 76 тыс. [6, 7].

Одним из основных недостатков искусственного сустава является износ материалов пары трения узла подвижности эндопротеза, так как пара трения эндопротеза в процессе функционирования подвергается циклическим механическим воздействиям, приводящим к постепенному износу контактирующих поверхностей. В результате трения и нагрузки на трущиеся поверхности узел подвижности эндопротеза тазобедренного сустава подвергается адгезивному и абразивному износу [8]. Частицы износа, различные по размеру и форме, образуются на всех поверхностях соприкосновения компонентов эндопротеза.

Одной из основных проблем образования частиц износа материалов пар трения является развитие асептической нестабильности, вызванной макрофагальной реакцией на частицы износа, с последующим развитием остеолита костной ткани вокруг имплантата [9].

Основной целью использования новых материалов в парах трения является снижение износа до такой степени, при которой количество образованных частиц износа материалов пары трения минимальное [10].

Разработки материалов для пар трения эндопротезов ведутся в направлении увеличения жесткости, ударной вязкости, способности выдерживать статические и динамические нагрузки, повышения стойкости к механическому и химическому износу. При этом все характеристики должны сочетаться с биоинертностью [11, 12]. На сегодняшний день разработка оптимальной конструкции и выбор материала пары трения сохраняют свою актуальность [13, 14].

Материалы и методика

Компьютерная модель эндопротеза создавалась для расчета напряжений в конструкциях узла подвижности методом конечных элементов. Компьютерное моделирование выполнялось в среде ANSYS. При реализации компьютерной модели предлагаемой конструкции узла подвижности тазобедренного сустава учитывались физико-механические свойства титанового сплава ВТ-6 и углеситалла марки УСБ (табл. 1 и 2). Из титана изготавливалась втулка головки и корпуса вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава. Углеситалл марки УСБ использовался как материал трущихся поверхностей головки и вкладыша. При расчетах было принято, что вышеперечисленные материалы модели (титановый сплав, углеситалл марки УСБ) имеют линейные эластичные свойства, изотропны и гомогенны.

Таблица 1

Характеристики механических свойств углеситалла марки УСБ

Модуль упругости на сжатие	Модуль упругости на растяжение	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на растяжение	Предел прочности на сжатие	Предел прочности на изгиб (средний)
9 ГПа	15 ГПа	0,3	115 МПа	455 МПа	360 МПа

Таблица 2

Характеристики механических свойств титанового сплава ВТ-6

Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Предел текучести	Временное сопротивление
113 ГПа	0,3	800–900 МПа	900–1000 МПа

При проведении расчетов напряженно-деформированного состояния узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения из углеситалла считается, что головка узла закреплена по внутренней поверхности втулки, а нагрузка к вкладышу узла подвижности приложена под углом 0° (вертикальное приложение нагрузки), 22,5° и 45°. Нагрузка, действующая на вкладыш узла подвижности, регламентировалась ГОСТ Р ИСО 14242-3-2013 и составляла

2250 Н, что соответствует максимальной нагрузке в здоровом тазобедренном суставе. Величина зазора между углеситалловыми частями головки и вкладыша равнялась 0,2 мм.

Изучались две конструкции головки и вкладыша. Первая конструкция состояла из головки узла подвижности и имела сферическую наружную поверхность диаметром 28 мм. Головка была изготовлена из немонолитного углеситалла и усилена титановой втулкой, установленной внутрь сферы. Углеситалловая сфера состояла из двух частей, соединяющихся в наклонной плоскости. Геометрическая модель представлена на рис. 1.

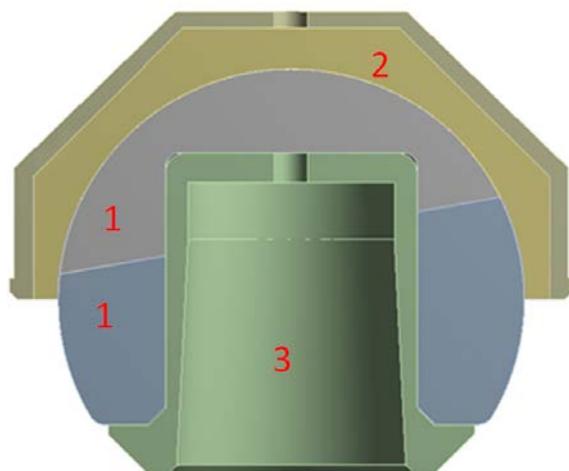


Рис. 1. Первый вариант конструкции узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения из углеситалла марки УСБ:
1 – углеситалловая часть головки, состоящая из двух компонентов;
2 – углеситалловая часть вкладыша; 3 – втулка из сплава титана

Вторая конструкция также имела головку, состоящую из титановой втулки и углеситалловой сферической части диаметром 28 мм. Головка была изготовлена из монолитного углеситалла и усилена титановой втулкой, установленной внутрь сферы. Вкладыш узла изготовлен из углеситалловой части и запрессован в титановую обойму. Геометрическая модель представлена на рис. 2. Так как на нагружаемые поверхности материалов влияет однородность структуры нагружаемой поверхности, использование монолитных компонентов позволит сделать конструкцию более прочной.

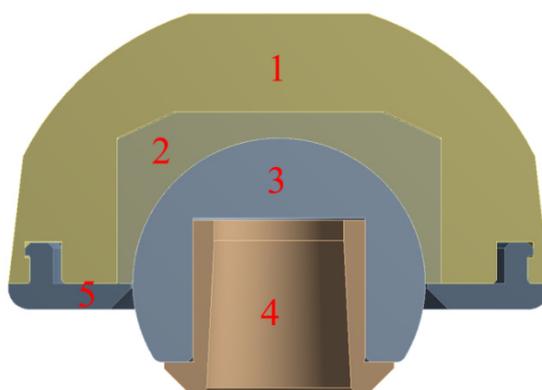


Рис. 2. Первая конструкция узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава:
1 – титановая часть вкладыша; 2 – вставка из монолитного углеситалла марки УСБ;
3 – монолитная головка из углеситалла; 4 – втулка из сплава титановая; 5 – полиэтиленовый буртик

Критерием оценки прочности деталей узлов подвижности эндопротеза из углеситалла марки УСБ являлось относительное напряжение по Баландину.

Задавались параметры механических свойств углеситалла и титанового сплава ВТ-6 в соответствии с табл. 1 и 2. Нагрузка, действующая в узле подвижности, составляла 2250 Н.

Особенностями реализации компьютерных моделей узлов подвижности тазобедренного сустава в среде моделирования ANSYS являлись:

- уникальные для каждой из рассматриваемых конструкций узлов подвижности тазобедренного сустава состав, форма и размеры деталей;
- параметры изотропной модели упругости, используемой для описания деформационного поведения элементов конструкции, выбранные модели и параметры контактного взаимодействия тел, включая значения коэффициентов трения;
- использование достаточно мелкой конечно-элементной гексаэдрической конечно-элементной сетки, состоящей из 943878 узлов и 244639 элементов в первой компьютерной модели и 992546 узлов и 257532 элементов – во второй;
- использование критерия прочности П. П. Баландина, который был реализован в программе ANSYS в виде пользовательской подпрограммы.

Результаты

Характеристики физико-механических свойств углеситалла свидетельствуют о существенном различии в его сопротивлении разрушению при растяжении и сжатии, что требует учета при оценке прочности деталей, которые изготовлены из этого материала. Поэтому, основываясь на данных о сопротивлении углеситалла марки УСБ разрушению, для оценки прочности деталей узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава был выбран критерий прочности Баландина.

Относительные напряжения по Баландину могут быть определены по зависимости

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_i}{\sigma_b(\sigma_0)},$$

где $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – приведенное по Мизесу напряжение;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\sigma_b = \sqrt{\sigma_p \sigma_c - (\sigma_c - \sigma_p) \sigma_0}$ – зависящий от среднего напряже-

ния предел прочности; $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение.

Данные распределения построены на основе результатов вычислительных экспериментов. Результаты расчета вычислительных экспериментов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Максимальные значения относительных напряжений по Баландину в головке и вкладыше с монолитными и немонолитными углеситалловыми компонентами

Вариант конструкции	Угол приложения нагрузки		
	0°	22,5°	45°
С немонолитным углеситаллом	1,628	0,580	0,390
С монолитным углеситаллом	0,149	0,222	0,202

На рис. 3 показано распределение относительных напряжений по Баландину в конструкции узла подвижности при угле приложения нагрузки 22,5°.

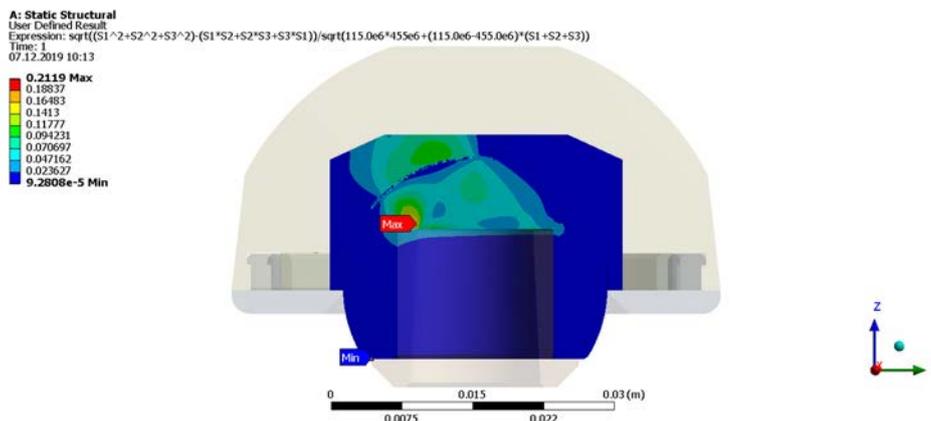


Рис. 3. Распределение относительных напряжений по Баландину в деталях узла подвижности из монолитного углеситалла (угол приложения нагрузки 22,5°)

Условие, при котором наступает повреждение конструкции, – это достижение показателя относительного напряжения по Баландину единицы. Максимальные значения относительных напряжений по Баландину в головке и вкладыше эндопротеза тазобедренного сустава с монокристаллическим углеситаллом при всех рассматриваемых углах приложения нагрузки не превышают единицы, следовательно, прочность деталей узлов подвижности эндопротеза из углеситалла марки УСБ при всех значениях угла приложения нагрузок обеспечивается. Минимальный запас прочности составил 4,5.

Заключение

Конструкция, в которой использовался монокристаллический углеситалл, обеспечивает более низкий уровень относительных напряжений в деталях узла подвижности во всем рассматриваемом диапазоне углов приложения нагрузки по сравнению с конструкцией, в которой использовался немонотонный углеситалл.

Список литературы

1. Корьяк В. А., Сороковиков В. А., Свистунов В. В., Шарова Т. В. Эпидемиология коксартроза // Сибирский медицинский журнал. 2013. № 8. С. 39–45
2. Загородний Н. В. Эндопротезирование тазобедренного сустава. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2013. 704 с.
3. Сементковский А. В. Ревизионное эндопротезирование тазобедренного сустава при асептической нестабильности бедренного компонента // Травматология и ортопедия России. 2011. № 1. С. 153–159.
4. Mihalko W. M., Haider H., Kurtz S. [et al.]. New materials for hip and knee joint replacement: What's hip and what's in kneed? // Journal of orthopaedic research. 2020. Vol. 38, № 7. P. 1436–1444.
5. Neuprez A., Neuprez H., Kaux J. F. [et al.]. Total joint replacement improves pain, functional quality of life, and health utilities in patients with late-stage knee and hip osteoarthritis for up to 5 years // Clinical Rheumatology. 2020. Vol. 39, № 3. P. 861–871.
6. Травматизм, ортопедическая заболеваемость, организация травматолого-ортопедической помощи в Российской Федерации в 2019 году. ЦИТО. М., 2019. С. 115–116.
7. Шубняков М. И. Тихилов Р. М., Шубняков И. И., Денисов А. О. Долгосрочная выживаемость эндопротезов у пациентов разных возрастных групп // Травматология Және ортопедия. 2020. № 3 (53). С. 38–41.
8. Kottinen Y. T., Zhao D. Z., Beklen A. THR microenvironment // Clin. Orthop. 2005. Vol. 93, № 1. P. 165–176.
9. Cong Y., Wang Y., Yuan T. [et al.]. Macrophages in aseptic loosening: Characteristics, functions, and mechanisms // Front Immunol. 2023. № 14. P. 1122057.
10. Morscher E. W. Failures and successes in total hip replacement – why good ideas may not work. Review // Scand. J. Surg. 2003. Vol. 92. P. 113–120.
11. Affatato S. Perspectives in Total Hip Arthroplasty: Advances in Biomaterials and Their Tribological Interactions // Elsevier Science. 2014. P. 182.
12. Aherwar A., Singh A. K., Patnaik A. Current and future biocompatibility aspects of biomaterials for hip prosthesis // AIMS Bioeng. 2015. Vol. 3. P. 23–43.
13. Таштанов Б. Р. Корыткин А. А., Павлов В. В., Шубняков И. И. Раскол керамического вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава: клинический случай // Травматология и ортопедия России. 2022. Т. 28, № 3. С. 63–73.
14. Merola M., Affatato S. Materials for hip prostheses: A review of wear and loading considerations (Review) // Materials (Basel). 2019. Vol. 12, № 3. P. 495.

References

1. Kor'yak V.A., Sorokovikov V.A., Svistunov V.V., Sharova T.V. Epidemiology of coxarthrosis. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal = Siberian Medical Journal*. 2013;(8):39–45. (In Russ.)
2. Zagorodniy N.V. *Endoprotezirovaniye tazobedrennogo sustava = Hip replacement*. Moscow: GEOTAR-Media, 2013:704. (In Russ.)
3. Sementkovskiy A.V. Revision hip replacement in aseptic instability of the femoral component. *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and orthopedics of Russia*. 2011;(1):153–159. (In Russ.)
4. Mihalko W.M., Haider H., Kurtz S. et al. New materials for hip and knee joint replacement: What's hip and what's in kneed? *Journal of orthopaedic research*. 2020;38(7):1436–1444.
5. Neuprez A., Neuprez H., Kaux J.F. et al. Total joint replacement improves pain, functional quality of life, and health utilities in patients with late-stage knee and hip osteoarthritis for up to 5 years. *Clinical Rheumatology*. 2020;39(3):861–871.

6. *Travmatizm, ortopedicheskaya zaboлеваemost', organizatsiya travmatologo-ortopedicheskoy pomoshchi v Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu. TsITO = Traumatism, orthopedic morbidity, organization of trauma and orthopedic care in the Russian Federation in 2019. CITO. Moscow, 2019:115–116. (In Russ.)*
7. Shubnyakov M.I. Tikhilov R.M., Shubnyakov I.I., Denisov A.O. Long-term survival of endoprostheses in patients of different age groups. *Travmatologiya Zhəne ortopediya = Traumatology and orthopedics. 2020;(3):38–41. (In Russ.)*
8. Kottinen Y.T., Zhao D.Z., Beklen A. THR microenvironment. *Clin. Orthop. 2005;93(1):165–176.*
9. Cong Y., Wang Y., Yuan T. et al. Macrophages in aseptic loosening: Characteristics, functions, and mechanisms. *Front Immunol. 2023;(14):1122057.*
10. Morscher E.W. Failures and successes in total hip replacement – why good ideas may not work. Review. *Scand. J. Surg. 2003;92:113–120.*
11. Affatato S. Perspectives in Total Hip Arthroplasty: Advances in Biomaterials and Their Tribological Interactions. *Elsevier Science. 2014:182.*
12. Aherwar A., Singh A. K., Patnaik A. Current and future biocompatibility aspects of biomaterials for hip prosthesis. *AIMS Bioeng. 2015;3:23–43.*
13. Tashtanov B.R. Korytkin A.A., Pavlov V.V., Shubnyakov I.I. Splitting of the ceramic insert of the hip joint endoprosthesis: a clinical case. *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and orthopedics of Russia. 2022;28(3):63–73. (In Russ.)*
14. Merola M., Affatato S. Materials for hip prostheses: A review of wear and loading considerations (Review). *Materials (Basel). 2019;12(3):495.*

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Анатольевич Ксенофонов

старший преподаватель кафедры травматологии,
ортопедии и военно-экстремальной медицины,
Медицинский институт,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: MAKsenofontov@mail.ru

Mikhail A. Ksenofontov

Senior lecturer of the sub-department
of traumatology, orthopedics
and military-extreme medicine,
Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Муземнек

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: muzemnek@yandex.ru

Aleksandr Yu. Muземнек

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
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 16.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 03.06.2024

Принята к публикации / Accepted 01.07.2024

ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕДАЧА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ

К. Д. Целикин¹, М. Н. Крамм², А. Ю. Бодин³, О. Н. Бодин⁴

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{2,3} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

⁴ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹kds777@yandex.ru, ²krammmn@mail.ru, ³bodin98@mail.ru, ⁴bodin_o@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Передача информации является основным физическим процессом, определяющим характеристики информационных систем различного назначения. В этом процессе способы и средства обеспечения информационной безопасности защищают данные от воздействия всевозможных помех и шумов, от утечки, порчи файлов или других видов атак. Поэтому развитие данного направления актуально для информационных систем различного назначения. Одним из эффективных способов борьбы с ошибками, возникающими при передаче сообщений по каналам с шумами, является применение помехоустойчивого кодирования, обеспечивающего безопасную передачу больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок. Эксплуатация системы неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов в условиях скрининга характеризуется сложной сигнально-помеховой обстановкой и обуславливает разработку технических и организационных методов борьбы с помехами. Целью статьи является обоснование использования сверточных кодов в многоканальной информационно-измерительной системе для обеспечения безопасной и достоверной передачи больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок. *Материалы и методы.* На основе критического аналитического обзора выбран способ защищенной передачи информации на основе сверточных кодов для использования в системе неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов и в бесплатформенной инерциальной навигационной системе. *Результаты.* Приведено моделирование кодирования сверточных кодов с малой длиной кодового ограничения и с декодированием по алгоритму Витерби. Разница отношений сигнал/шум при применении кодирования и без него при ее положительном значении определяет энергетический выигрыш кода, выражаемый в децибелах. *Выводы.* Полученный результат показывает преимущества использования сверточных кодов при передаче информации в системе неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов и в бесплатформенной инерциальной навигационной системе.

Ключевые слова: помехоустойчивая передача цифровой информации, сверточные коды, система неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов, бесплатформенная инерциальная навигационная система

Для цитирования: Целикин К. Д., Крамм М. Н., Бодин А. Ю., Бодин О. Н. Помехоустойчивая передача цифровой информации на основе сверточных кодов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 94–110. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-12

NOISE-RESISTANT TRANSMISSION OF DIGITAL INFORMATION BASED ON CONVOLUTIONAL CODES

K.D. Tselikin¹, M.N. Kramm², A.Yu. Bodin³, O.N. Bodin⁴

¹ Penza State University, Penza, Russia

^{2,3} National Research University "MEI", Moscow, Russia

⁴ Penza State Technological University, Penza, Russia

¹kds777@yandex.ru, ²krammmn@mail.ru, ³bodin98@mail.ru, ⁴bodin_o@inbox.ru

Abstract. *Background.* Information transfer is the main physical process that determines the characteristics of information systems for various purposes. In this process, information security methods and tools protect data from the effects of all kinds of interference and noise, leakage, file corruption or other types of attacks. Therefore, the development of this area is relevant for information systems for various purposes. One of the effective ways to deal with errors that occur when

transmitting messages over noise channels is the use of noise-resistant coding, which ensures the safe transmission of large amounts of digital information with a minimum number of errors. The operation of a noninvasive electrocardiagnostic system with multiple registration of electrocardiosignals in screening conditions is characterized by a complex signal-interference environment and leads to the development of technical and organizational methods to combat interference. The purpose of the article is to substantiate the use of convolutional codes in a multichannel information and measurement system to ensure the safe and reliable transmission of large amounts of digital information with a minimum number of errors. *Materials and methods.* Based on a critical analytical review, a method of secure information transmission based on convolutional codes has been selected for use in a noninvasive electrocardiagnostic system with multiple registration of electrocardiosignals and in a free-form inertial navigation system. *Results.* A simulation of the encoding of convolutional codes with a short code restriction length and with decoding using the Viterbi algorithm is presented. The difference in the signal-to-noise ratio when using coding and without it, with its positive value, determines the energy gain of the code, expressed in decibels. *Conclusions.* The results obtained show the advantages of using convolutional codes when transmitting information in a non-invasive electrocardiagnostic system with multiple registration of electrocardiosignals and in a free-form inertial navigation system.

Keywords: noise-resistant transmission of digital information, convolutional codes, noninvasive electrocardiagnosis system with multiple registration of electrocardiosignals, free-form inertial navigation system

For citation: Tselikin K.D., Kramm M.N., Bodin A.Yu., Bodin O.N. Noise-resistant transmission of digital information based on convolutional codes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):94–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-12

Постановка задачи

История развития методов защищенной передачи информации является постоянным процессом, где каждое новое открытие и разработка приводят к появлению более надежных и эффективных способов обеспечения конфиденциальности и целостности данных [1]. Негативное воздействие на целостность данных оказывают помехи и шумы. Классическое определение помехи относится к технике связи: «Помехой называется стороннее возмущение, действующее в системе передачи и препятствующее правильному приему сигналов» [2]. Шумами принято называть случайные аддитивные помехи [2], при этом обычно речь идет о помехах, имеющих более высокочастотный спектр, чем полезный сигнал. Различие между помехами и шумами заключается в том, что шумы образуются внутри системы передачи данных, а помехи поступают в систему передачи данных извне. Использование помехоустойчивой передачи цифровой информации на основе сверточных кодов возможно в системе неинвазивной электрокардиографии (СНЭКД) с множественной регистрацией электрокардиосигналов и в бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС) подвижного объекта. На рис. 1 приведена структурная схема СНЭКД [3].

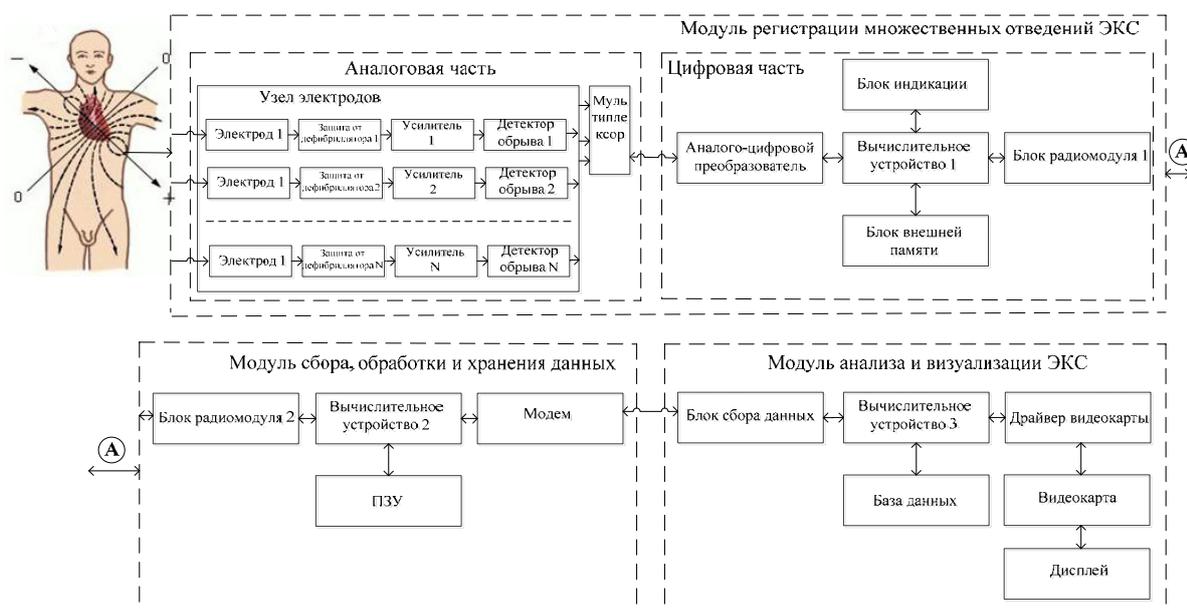


Рис. 1. Структурная схема СНЭКД

Применительно к СНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов обеспечение высокой помехоустойчивости – одна из основных проблем современной неинвазивной кардиодиагностики. Увеличение уровня внешних электромагнитных помех, повышение степени интеграции электронных компонентов, снижение мощности полезных сигналов приводит к тому, что передача электрокардиосигнала (ЭКС) на фоне помех становится сложной структурно-алгоритмической задачей. Особую сложность эта задача приобретает для СНЭКД, работающих в условиях скрининга, когда интенсивность и изменчивость помех имеют значительное дезинформационное действие.

Другим примером такой многоканальной информационно-измерительной системы (ИИС) является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) подвижного объекта, иллюстрация функционирования которой приведена на рис. 2.

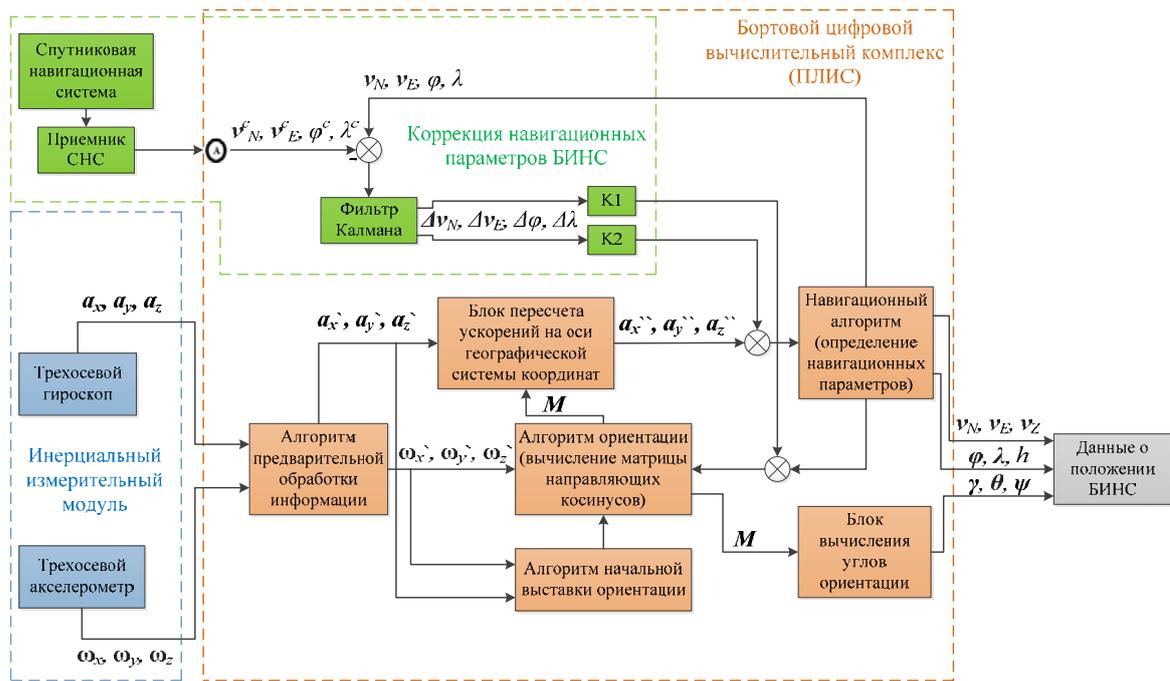


Рис. 2. Структурная схема БИНС

На рис. 2 информация с трехосевого гироскопа в виде проекций угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ и информация с трехосевого акселерометра в виде проекций вектора кажущегося ускорения a_x, a_y, a_z поступает в блок алгоритма предварительной обработки информации. Обработанные данные гироскопа $\omega_x', \omega_y', \omega_z'$ используются в алгоритме ориентации для формирования матрицы M направляющих косинусов, из которой могут быть получены углы ориентации относительно осей инерциальной системы координат. Кроме того, для блока алгоритма ориентации необходимо сделать начальную выставку ориентации. Обработанные данные с трехосевого акселерометра a_x', a_y', a_z' поступают в блок пересчета ускорений на оси географической системы координат, где пересчитываются к инерциальным осям с использованием полученной матрицы ориентации M . Вычисленные проекции кажущегося ускорения на инерциальные оси a_x'', a_y'', a_z'' передаются в блок решения навигационного алгоритма. Выходные параметры БИНС в этом случае представляются радиус-вектором местоположения $R_G = [\varphi, \lambda, h]$ (φ – широта, λ – долгота, h – высота), проекции относительной скорости движения $v_G = [v_N, v_E, v_Z]$ (v_N – северная проекция относительной скорости, v_E – восточная проекция относительной скорости, v_Z – вертикальная проекция относительной скорости) и углами ориентации в географической системе координат γ, θ, ψ (γ – крен, θ – тангаж, ψ – рыскание). Основная проблема, которая возникает при использовании БИНС для навигации, – нарастание погрешностей со временем. С помощью совершенствования чувствительных элементов трудно добиться уменьшения нарастания погрешностей. Решить эту проблему можно с помощью интегрирования в БИНС высокоточной спутниковой навигационной системы (СНС) для корректировки навигационных параметров (рис. 2).

Навигационные параметры $v_N^c, v_E^c, \varphi^c, \lambda^c$, принимаемые с СНС с помощью приемника СНС, вычитаются с навигационными параметрами $v_N, v_E, \varphi, \lambda$ БИНС. Таким образом получается разность навигационных параметров. С помощью фильтра Калмана эта разность очищается от ошибок, принимаемых с СНС, и получаем $\Delta v_N, \Delta v_E, \Delta \varphi, \Delta \lambda$. Далее эта разница в параметрах используется для снижения погрешностей с помощью введения двух дополнительных обратных связей с коэффициентами $K1$ и $K2$, использующих значение параметров от СНС для вычисления ошибки БИНС, задача которых заключается в увеличении собственной частоты ошибок БИНС и демпфировании данного колебательного процесса.

В общем виде СНЭКД и БИНС представляют собой многоканальную информационно-измерительную систему, представляющую собой совокупность функционально связанных устройств и программного обеспечения, которая реализует необходимое информационное обслуживание контролируемого объекта, включая автоматизированный сбор, представление, передачу, обработку и хранение измерительной информации.

Если передача данных осуществляется по радиоканалу, то ИИС называется радиотелеметрической [4]. Как следует из анализа рис. 1, блоки радиомодуля обеспечивают безопасную и достоверную передачу больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок, а кодирование/декодирование осуществляют первый и второй вычислительные устройства соответственно, в состав которых включен канальный кодер/декодер [5]. При этом одним из основных свойств при передаче информации является достоверность – это способность передавать информацию с заданной погрешностью.

Учитывая огромное разнообразие возникновения помех в СНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов и в БИНС, существует огромное многообразие методов борьбы с помехами. Это и технические и организационные методы борьбы с помехами. Помехи необходимо подавлять по месту их возникновения и не допускать их проникновения в электрические цепи системы [6, 7]. Обоснованию и исследованию применения сверточных кодов в многоканальной ВВС для обеспечения безопасной и достоверной передачи больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок посвящена настоящая работа.

Материалы и методы

Аналого-цифровое (АЦП) и цифроаналоговое (ЦАП) преобразования. В функционировании СНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов и в БИНС участвуют процессы аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразований. АЦП является одним из фундаментальных «строительных» блоков современных информационно-измерительных систем на этапе сбора данных. С точки зрения помехозащищенности процесс цифроаналогового преобразования не вносит собственных принципиальных погрешностей, а лишь материализует погрешности, полученные в АЦП. Реально возникающие при преобразовании погрешности носят чисто инструментальный характер.

Погрешности, обусловленные самим алгоритмом работы, возникают только на этапе аналого-цифрового преобразования и их уменьшение требует уменьшения периода дискретизации (T_d) и шага квантования (h).

При этом погрешность квантования АЦП определяется величиной младшего значащего разряда (МЗР, LSB (Least Significant Bit)) и является результатом самого процесса преобразования. Погрешность квантования – это погрешность, вызванная значением шага квантования и определяемая как 0,5 величины наименьшего значащего разряда (LSB). Учитывая, что максимальная амплитуда зарегистрированного ЭКС составляет не более 2 мВ [8, 9], погрешность квантования АЦП в СНЭКД составляет

$$\Delta D_{\text{АЦП}} = \frac{2000}{256} = 7,8 \text{ мкВ.}$$

Помехоустойчивое кодирование. Одним из эффективных способов борьбы с помехами, возникающими при передаче сообщений по каналам с шумами, является применение методов помехоустойчивого кодирования, обеспечивающих безопасную передачу больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок [10]. Смысл помехоустойчивого кодирования заключается во введении избыточности, т.е. в том, что каждый блок информации сопровождается дополнительными (избыточными) контрольными кодами, позволяющими приемнику информации обнаружить ошибку, исправить ее или запросить повторную передачу.

Теоретическим обоснованием помехоустойчивого кодирования является теорема Шеннона [11] для дискретного канала с шумом, согласно которой при любой скорости передачи двоичных символов, меньшей, чем пропускная способность канала: $C_k > V_u$, где C_k – (информационная) пропускная способность канала, т.е. максимальное количество информации, которое способен передать канал без искажений за единицу времени; V_u – (информационная) производительность источника, т.е. количество информации, производимое источником в единицу времени, существует такой код, при котором вероятность ошибочного декодирования будет сколь угодно мала, т.е. достоверность передачи сообщений тем выше, чем больше длительность кодируемой последовательности и чем менее эффективно используется пропускная способность канала. В теореме Шеннона упоминаются термины «пропускная способность канала связи» и «скорость передачи информации». Суть терминов заключается в следующем:

- пропускная способность канала связи (C_k) определяется как максимальное число переданных двоичных единиц (двоичных символов, битов) в секунду при заданной или установленной сколь угодно малой вероятности ошибочного приема двоичного символа (бита);
- скорость передачи информации (V_u) определяется реально переданным числом двоичных символов (бит) в установленную единицу времени (в секунду) и при заданной равной вероятности ошибочного приема двоичного символа (бита).

Цифровой канал связи. Цифровой канал связи (см. рис. 1 и 2) обозначен символом \textcircled{A} , представляет собой двоичный симметричный канал (binary symmetric channel – BSC), входной и выходной алфавиты которого состоят из двоичных элементов (0 и 1) [10].

Структурная схема цифрового канала связи общеизвестна и приведена на рис. 3 [12, 13].



Рис. 3. Структурная схема цифрового канала связи

Пропускная способность канала связи и скорость передачи информации измеряются в бит/с, Кбит/с, Мбит/с и Гбит/с. Согласно теореме Шеннона [11] при неограниченно малой вероятности ошибок на двоичный символ скорость передачи информации *всегда* меньше пропускной способности канала связи.

Пропускная способность канала связи СНЭКД определяется с учетом количества электродов для регистрации ЭКС и частоты дискретизации ЭКС. Согласно работе [3] количество электродов $N_{эл}$ для регистрации ЭКС равно от 60 до 90. Частота дискретизации $F_{дис}$ 8-разрядного АЦП равна 5 кГц. Тогда простейшие вычисления показывают, что пропускная способность канала связи СНЭКД должна быть равна или быть больше скорости передачи в секунду двоичных символов $V_u = N_{эл} \cdot F_{дис} = 90 \cdot 5000 = 450\,000$ двоичных символов/с, 450 Кбит/с или $450\,000/8 = 56$ Кбайт/с.

Пропускная способность канала связи БИНС определяется частотой обновления данных, получаемых с системы спутниковой навигации и равной 1–100 Гц (чаще всего 50 Гц). Тогда аналогично расчету для СНЭКД пропускная способность канала связи БИНС (в случае 90 каналов передачи данных с частотой дискретизации, равной 5 кГц) должна быть не менее 56 Кбайт/с.

Последовательный принцип передачи пакетов по каналу связи вносит задержки, которые определяются задержкой пакетирования, последовательной задержкой, задержкой кодека. Средой передачи может служить медная пара, волоконно-оптический кабель или эфир. При этом величина задержки зависит от тактовой частоты и в гораздо меньшей степени от скорости света в среде передачи.

В документации Cisco приведена таблица (табл. 1), которая позволяет оценить последовательную задержку в зависимости от длины пакетов и пропускной способности канала связи.

Таблица 1

Значение последовательной задержки в зависимости от длины пакетов и пропускной способности канала связи [14]

Размер кадра (байты)	Скорость передачи по каналу (Кбит/с)										
	19,2	56	64	128	256	384	512	768	1024	1544	2048
38	15,83	5,43	4,75	2,38	1,19	0,79	0,59	0,40	0,30	0,20	0,15
48	20,00	6,86	6,00	3,00	1,50	1,00	0,75	0,50	0,38	0,25	0,19
64	26,67	9,14	8,00	4,00	2,00	1,33	1,00	0,67	0,50	0,33	0,25
128	53,33	18,29	16,00	8,00	4,00	2,67	2,00	1,33	1,00	0,66	0,50
256	106,67	36,57	32,00	16,00	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,33	1,00
512	213,33	73,14	64,00	32,00	16,00	10,67	8,00	5,33	4,00	2,65	2,00
1024	426,67	149,29	128,00	64,00	32,00	21,33	16,00	10,67	8,00	5,31	4,00
1500	625,00	214,29	187,50	93,75	46,88	31,25	23,44	15,63	11,72	7,77	5,86
2048	853,33	292,57	256,00	128,00	64,00	42,67	32,00	21,33	16,00	10,61	8,00

Значение последовательной задержки ($T_{\text{зад}}$) определяется длиной пакета (N) и пропускной способности канала связи (C_k):

$$T_{\text{зад}} = N(8 \text{ бит}) / C_{k\text{min}}, \tag{1}$$

где $C_{k\text{min}}$ – самая медленная скорость в канале связи.

Из табл. 1 следует, что для передачи кадра длиной 1518 байт (максимальная длина для Ethernet) по каналу 64 кбит/с последовательная задержка достигает 185 мс. Если по тому же каналу передавать пакеты длиной 64 байт, задержка составит всего 8 мс, т.е. чем короче пакет, тем быстрее он достигнет приемной стороны.

Цифровой канал связи (см. рис. 3) работает следующим образом. Сигналы от источника сообщений поступают на вход кодера, задачей которого является преобразование сообщений, генерируемых источником, в последовательность комбинаций избыточного кода. Выход кодера передачи подключается к входу модулятора или устройству преобразования сигналов (УПС). Задачей УПС передачи является преобразование дискретной q -ичной (в нашем случае $q = 2$) последовательности к виду, удобному для передачи на физическом уровне. Преобразования совершаются таким образом, чтобы первоначальное сообщение, переданное по каналу с помехами, было восстановлено приемником с заданной степенью точности. Приемная сторона осуществляет обратные преобразования. Множества входных V^l и выходных U^d сигналов являются дискретными. Из множества V выделяется дискретное подмножество разрешенных сигналов и сигналы, не входящие в него, считаются запрещенными и обозначаются через s_j . Процедура декодирования реализована как канал со стираниями элементов.

Анализ канала связи основывается на понятии математической модели канала связи [15, 16]. В свою очередь, модель трактуется как система с определенными каким-либо образом детерминированными или стохастическими характеристиками, связывающими множества передаваемых и принимаемых сигналов. Согласно этой модели необходимое количество дополнительных бит n должно удовлетворять отношению

$$n > \log_2(1+k+n), \tag{2}$$

где k – количество разрядов информационного сообщения (защищаемого кода); $N = k + n$ – длина передаваемого пакета.

Классификация помехоустойчивых кодов. В современных системах радиосвязи используются четыре типа помехоустойчивого кодирования [17]:

- сверточное кодирование;
- кодирование Рида – Соломона;
- турбокодирование;
- кодирование с малой плотностью проверок на четность (Low-density-parity-check code, далее код LDPC).

Каждый из этих кодов имеет свои недостатки и достоинства. Например, использование сверточных кодов приводит к меньшему, чем у других кодов, расширению полосы пропускания. Коды Рида – Соломона и высокоскоростные LDPC коды помимо небольшого расширения полосы частот могут также указывать на наличие неисправимых ошибок. Турбокоды используются для получения максимальной эффективности кодирования при отсутствии жестких требований к расширению полосы частот. Анализ табл. 2 в работе [17] показал, что по совокупности критериев (тактовая частота, число итераций, длина блока, кодовая скорость и отношение сигнал-шум) наиболее приемлемым для использования в СНЭКД являются сверточные коды. Теоретическое обоснование экспериментальных данных табл. 2 работы [17] приведено в работе [13].

Сверточные коды. Сверточные коды широко применяются в различных системах помехоустойчивой передачи информации, начиная от кодирования речевого сигнала в системе сотовой связи GSM и заканчивая системами спутниковой связи, так как обладают высокими корректирующими свойствами. В сверточных кодах формирование проверочных символов осуществляется по рекуррентным правилам, и они перемежаются с информационными по всей длине кодовой последовательности. Сверточные коды однозначно описываются тремя целыми числами n , k и l , где отношение k/n – скорость кодирования (информация, приходящаяся на закодированный бит), а l является параметром, называемым длиной кодового ограничения. Длина кодового ограничения – это количество k -битовых сдвигов, после которых один информационный бит может повлиять на выходной сигнал кодера. Параметр l указывает на число разрядов k -кортежа в кодирующем реестре сдвига. На практике k и n – небольшие целые числа, а l изменяется с целью контроля мощности и сложности кода [10, 18].

Корректирующей способностью кода называется гарантируемое число ошибок в кодовых комбинациях, исправляемых заданным кодом. При сверточном кодировании кратность исправляемых ошибок определяется следующим образом: если в последовательности произошло не более g_u ошибок, причем удовлетворяет неравенству

$$2g_u + 1 < d_{\min}, \quad (3)$$

где d_{\min} – это минимальное кодовое расстояние, то ошибки исправляются.

Мощность кода определяет способность кодов исправлять множественные, одиночные и многократные ошибки, возникающие в канале связи. Мощность кода зависит от длины кодового ограничения l и от вида образующих полиномов. Вероятность исправления ошибок при декодировании в явном виде связана с минимальным кодовым расстоянием d_{\min} .

Энергетический выигрыш кода (ЭВК) η определяет выигрыш по помехоустойчивости при применении корректирующего кодирования:

$$\eta = 10 \lg(Rd_{\min}), \quad (4)$$

где $R = k/n$ – скорость кодирования; d_{\min} – минимальное кодовое расстояние.

Среди преимуществ сверточного декодирования можно отметить [10]:

- 1) вероятностную оценку. Предоставляет вероятностную оценку каждого символа или состояния декодированного кода. Это позволяет учесть неопределенность и шум при передаче данных;
- 2) эффективность. Может быстро и точно находить наиболее вероятную последовательность состояний и символов;
- 3) гибкость. Может быть применена к различным моделям кодирования и системам передачи данных.

К недостаткам сверточного декодирования можно отнести следующее:

- 1) высокую вычислительную сложность. Требуется значительных вычислений ресурсов, особенно при работе с большими объемами данных или сложными моделями кодирования. Это может ограничить его применение в реальном времени или на устройствах с ограниченными

вычислениями возможности. Этот недостаток можно устранить, применив алгоритм в высокопроизводительном устройстве с высоким параллелизмом и возможностью работать в реальном времени, которым является такое устройство, как программируемая логическая интегральная схема;

2) зависимость от модели. Требуется заранее известной модели кодирования, если модель неправильно спроектирована или не соответствует реальным условиям передачи данных, точность и производительность алгоритма могут снизиться;

3) требование к точности сигнала. Это эффективно работает в условиях шумных каналов, но требует достаточно точного и качественного сигнала для правильного декодирования. При слишком низком качестве сигнала результаты могут быть неточными.

Результаты и обсуждение

Известен способ сверточного декодирования [19]. Основной целью известного способа декодирования сверточных кодов является снижение вероятности ошибки при декодировании и повышение помехоустойчивости передаваемой информации за счет «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби [12]. Суть «мягкого» декодирования непосредственно вытекает из теоремы Л. М. Финка [20]: при любом коде имеет место неравенство

$$p^{(1)} > p^{(2)} > p^{(3)} > p^{(4)}, \tag{5}$$

где $p^{(1)}$ – вероятность того, что при посимвольном методе приема (суть жесткого декодера) кодовая комбинация принята с ошибкой (независимо от того, можно ли эту ошибку исправить или обнаружить); $p^{(2)}$ – вероятность того, что при посимвольном методе приема в ходе исправления максимально возможного числа ошибок произошла неисправимая ошибка; $p^{(3)}$ – вероятность того, что при идеальном приеме в целом (аналог мягкого декодера) комбинация ошибочна; $p^{(4)}$ – вероятность того, что при посимвольном приеме принятая комбинация окажется совпадающей с одной из комбинаций кода, но не с той, которая передавалась.

На рис. 4,а представлена последовательность операций рассматриваемого способа, на которой пунктиром выделены операции, поясняющие работу декодера Витерби [12]. На рис. 4,б приведен пример нумерации состояний и переходов в одной ячейке решетчатой диаграммы при декодировании по алгоритму Витерби.

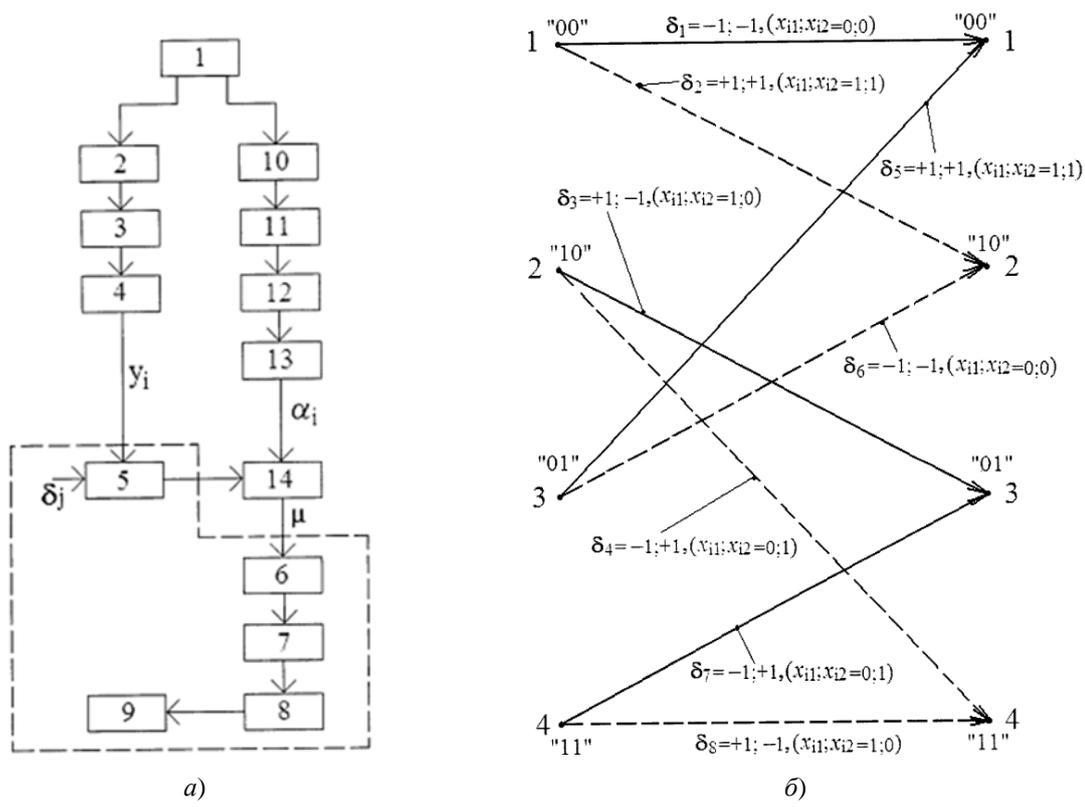


Рис. 4. Пример последовательности действий «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби (а) и пример нумерации состояний и переходов в одной ячейке решетчатой диаграммы (б)

На рис. 4,а обозначены следующие операции [12]: прием радиосигналов 1; автоматическая регулировка усиления 2; демодуляция 3; первое депережевание 4; определение метрик переходов 5; многоканальное суммирование 6; сравнение метрик путей и выбор пути с минимальной метрикой 7; переход к следующему шагу с отбрасыванием путей с большими метриками и запоминание оставленных путей 8; восстановление переданной информационной последовательности по оставшемуся пути 9; амплитудное детектирование 10; усреднение 11; второе депережевание 12; нелинейное преобразование 13; многоканальное перемножение-суммирование 14 и алгоритм Витерби 15.

В первом блоке памяти хранятся варианты кодов выходных сигналов кодера δ_j , которые он вырабатывает при поступлении на его вход очередного информационного символа и с учетом тех символов, которые поступили до этого. На рис. 4 эти состояния пронумерованы номерами соответственно, 1, 2, 3 и 4. При приходе очередного информационного символа вся последовательность записанных в регистр символов сдвигается вправо. Вновь пришедший символ помещается в первый разряд, символ из первого разряда перемещается во второй, из второго в третий, а из третьего разряда символ удаляется. Таким образом, комбинация символов во втором и третьем разрядах либо изменяется, либо нет. Левый столбец жирных точек и номерами 1–4 соответствует предыдущему состоянию кодера, правый столбец точек соответствует его последующему состоянию. Стрелками обозначены возможные варианты переходов из предыдущего состояния в последующее при приходе очередного символа. Сплошные стрелки обозначают переходы в случае, если в первом разряде сдвигового регистра записывается логический ноль, прерывистые стрелки означают, что в первом разряде записывается логическая единица.

Коды состояния 4 (см. рис. 4,б), вырабатываемые кодером, определяются той комбинацией, которая записана в регистре и состоят из групп, содержащих по два символа, x_{i1} и x_{i2} . Эти символы получаются в результате логических операций вида:

$$\begin{aligned}x_{i1} &= S1 \oplus S2 \oplus S3; \\x_{i2} &= S1 \oplus S3,\end{aligned}\quad (6)$$

где $S1$, $S2$, $S3$ – символы в первой, второй и третьей ячейках сдвигового регистра соответственно; знаком \oplus обозначена операция сложения по модулю два. Обозначим группу из значений этих двух символов через δ_j , $j = 1 \div 8$, т.е. возможны восемь вариантов кодовых групп, соответствующих восьми вариантам переходов. (На рис. 4 около переходов написаны варианты соответствующих им кодовых групп).

При этом осуществляется выбор пути по решетчатой диаграмме, обладающего минимальной метрикой, т.е. минимальной суммой евклидовых расстояний по всем принятым символам от варианта кода, соответствующего каждому символу, до значения напряжения, полученного с выхода демодулятора во время прихода этого символа. Главным достоинством такого подхода к обработке искаженной информации является энергетический выигрыш относительно жестких схем декодирования порядка 2–3 дБ.

Для каждого варианта пути при суммировании всех метрик переходов этого пути нельзя между собой приравнять их «качество». Блоки декодера Витерби дополнены многоканальным перемножителем-сумматором, который помещен после многоканального вычитателя.

Авторами представлена Simulink-модель декодера сверточных кодов на основе «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби. Она представлена на рис. 5.

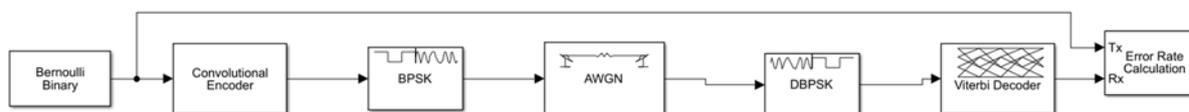


Рис. 5. Simulink-модель декодирования по алгоритму Витерби

Задачу декодирования сверточных кодов с помощью алгоритма Витерби можно рассматривать как задачу нахождения пути по решетчатой диаграмме, используя в качестве входных значений пары символов, сформированные кодером. Метод построения такой оценки легко найти, пытаясь непосредственно вычислить метрику для каждого пути на решетке. Вначале число путей растет экспоненциально с ростом длины последовательности. Однако вскоре появляется возможность исключить из рассмотрения такое число путей в каждой вершине, которое в точности уравнивает число вновь порожденных путей. Таким образом, оказывается

возможным иметь сравнительно небольшой список путей, который всегда будет содержать наиболее правдоподобный путь. Рассмотрим каждый блок данной модели. На рис. 6 показаны параметры всех блоков модели.

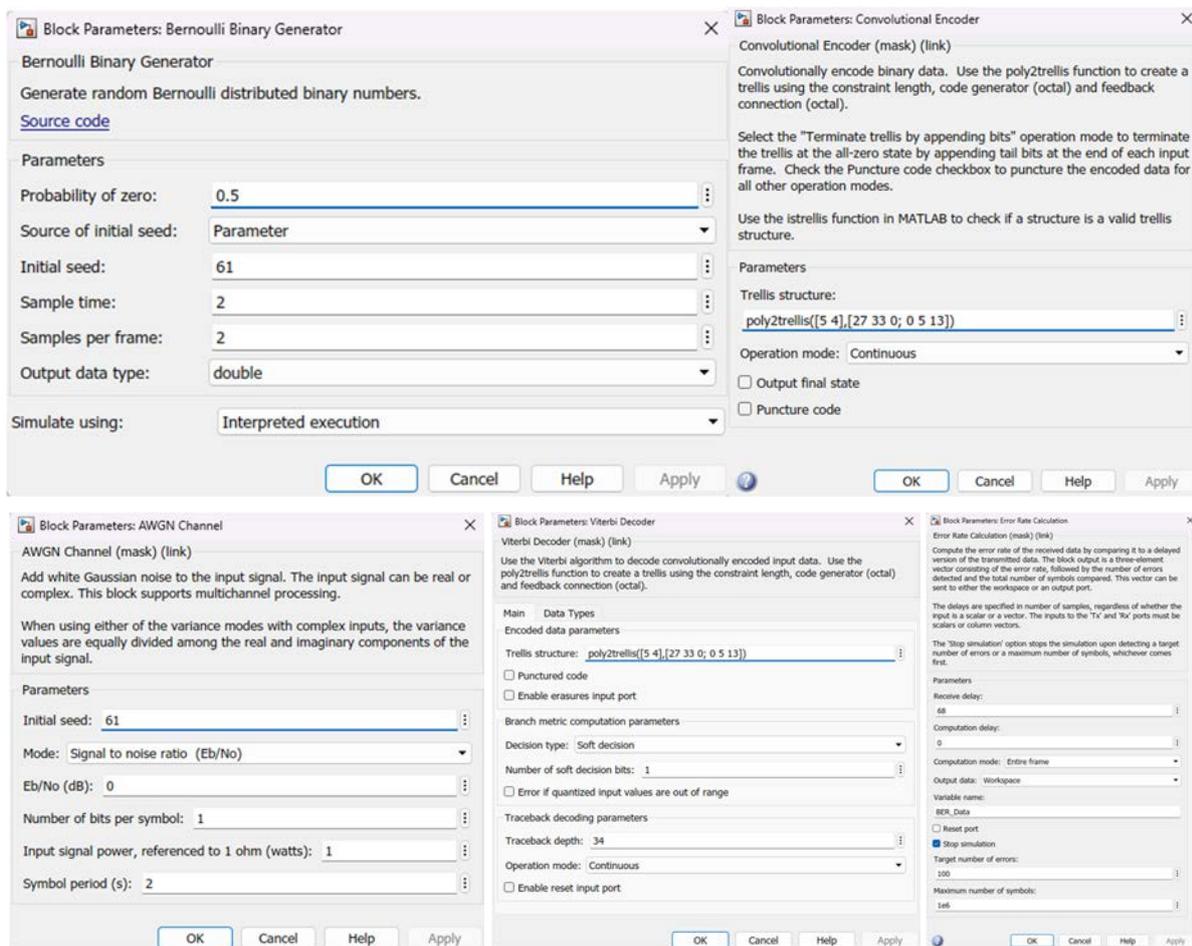


Рис. 6. Параметры блоков Simulink-модели «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби

С помощью блока Bernoulli Binary Generator генерируются случайные двоичные числа по распределению Бернулли. Эти числа поступают в блок Convolutional Encoder, где происходит сверточное кодирование этих чисел, где poly2trellis ([5 4], [27 33 0; 0 5 13]) является функцией, которая преобразовывает полиномиальное описание в решетчатое. Элементы этого вектора [5 4] указывают на число сохраненных битов в каждом сдвиговом регистре, включая текущие входные биты. Полная порождающая матрица кода равна [27 33 0; 0 5 13]. Блок BPSK Modulator Baseband модулирует сигнал, а блок BPSK Demodulator Baseband демодулируют сигнал. Блок AWGN Channel добавляет белый Гауссов шум во входной сигнал. В этом блоке можно задать любое значение соотношения сигнал/шум. Viterbi decoder является блоком декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби. В текущей модели задержка обработки равна 34, кроме того, можно выбрать тип декодирования (soft decision – «мягкое» декодирование, hard decision – «жесткое» декодирование»). Блок Error Rate Calculation определяет разницу между двумя сигналами, и таким образом можно определить разницу между сигналом на входе сверточного энкодера и сигналом на выходе декодера по алгоритму Витерби.

«Мягкое» декодирование по алгоритму Витерби (рис. 7), по большей части, осуществляется так же, как и «жесткое» декодирование (рис. 8). Единственное отличие состоит в том, что в «мягком» декодировании не используется расстояние Хэмминга. С помощью блока Error Rate Calculation можно получить вероятность битовой ошибки, количество совершенных ошибок и количество обработанных бит, а с помощью блока Score получаем сигнал на входе сверточного энкодера, сигнал с выхода «мягкого» декодера по алгоритму Витерби и сигнал сравнения этих двух сигналов.

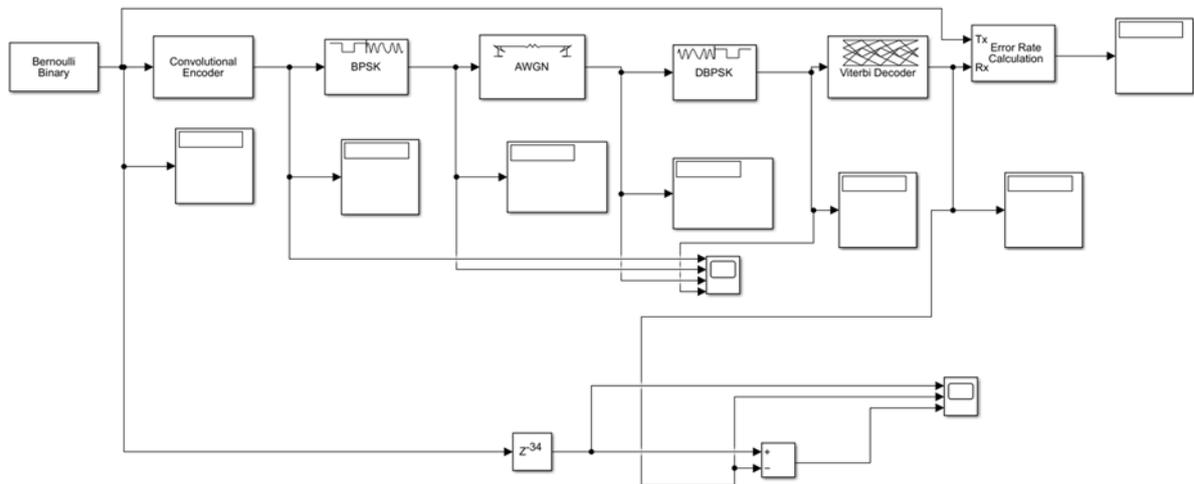


Рис. 7. Simulink-модель «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби

Получим данные с этой модели при задании отношения сигнал/шум в блоке AWGN Channel, равное 2, 3, 4, 5 дБ. Для оценки работы модели будем рассматривать блок Display, который отображает в первой строчке вероятность битовой ошибки, во второй строчке количество совершенных ошибок, а в третьей строчке количество обработанных бит и три сигнала блока Score (рис. 9–15).

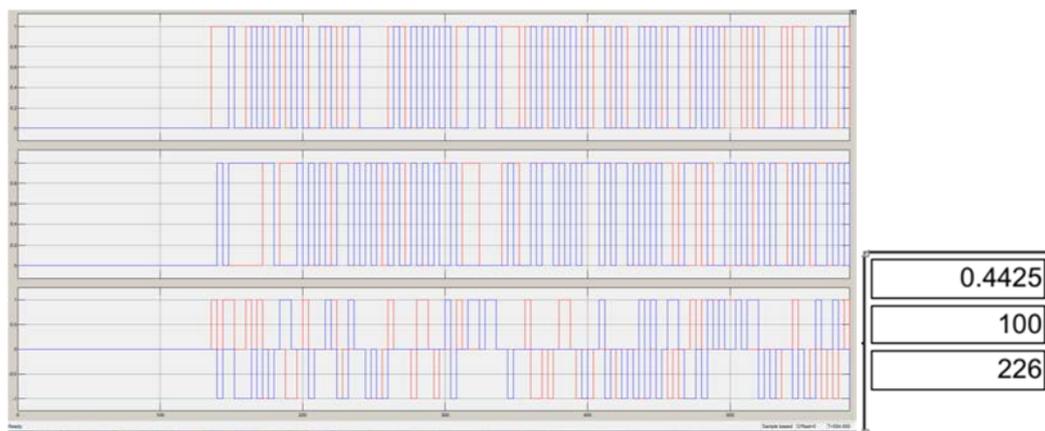


Рис. 8. Получение характеристик для «жесткого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 2 дБ

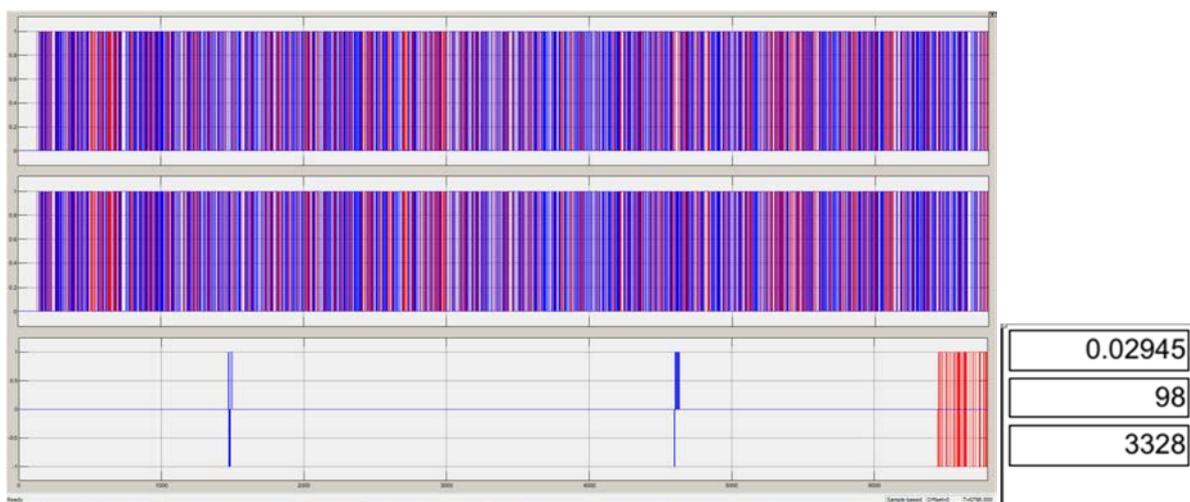


Рис. 9. Получение характеристик для «мягкого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 2 дБ



Рис. 10. Получение характеристик для «жесткого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 3 дБ

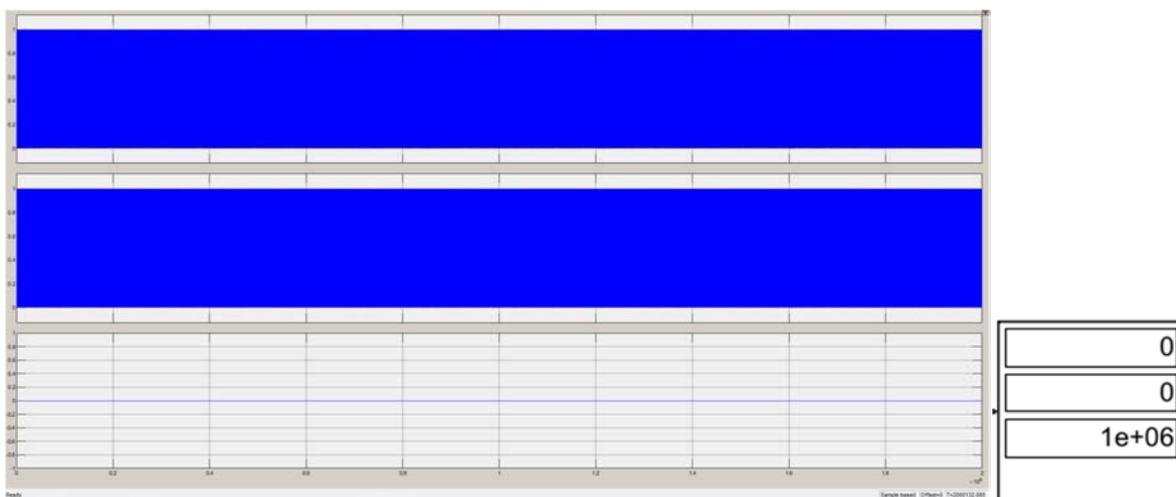


Рис. 11. Получение характеристик для «мягкого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 3 дБ

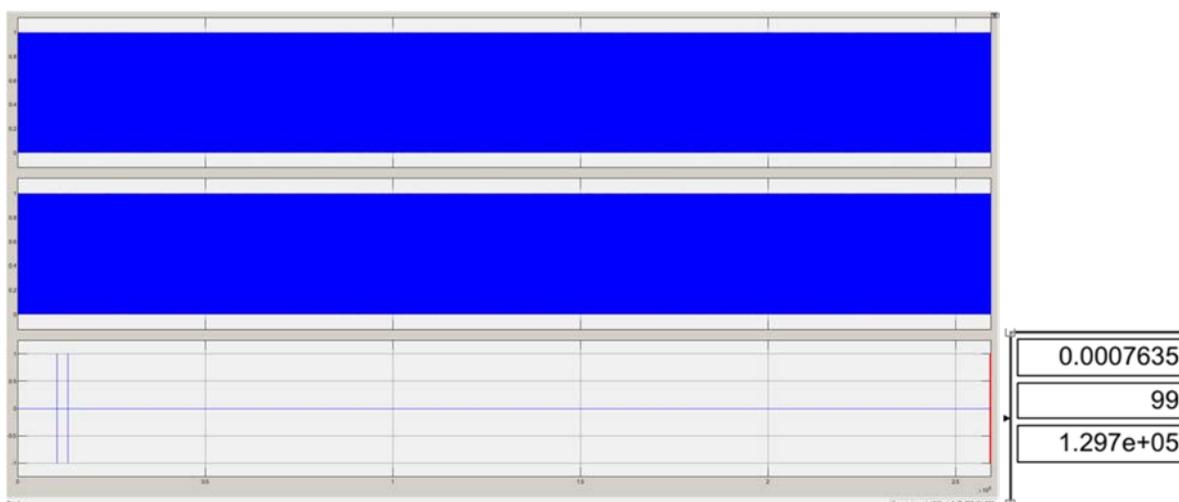


Рис. 12. Получение характеристик для «жесткого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 4 дБ

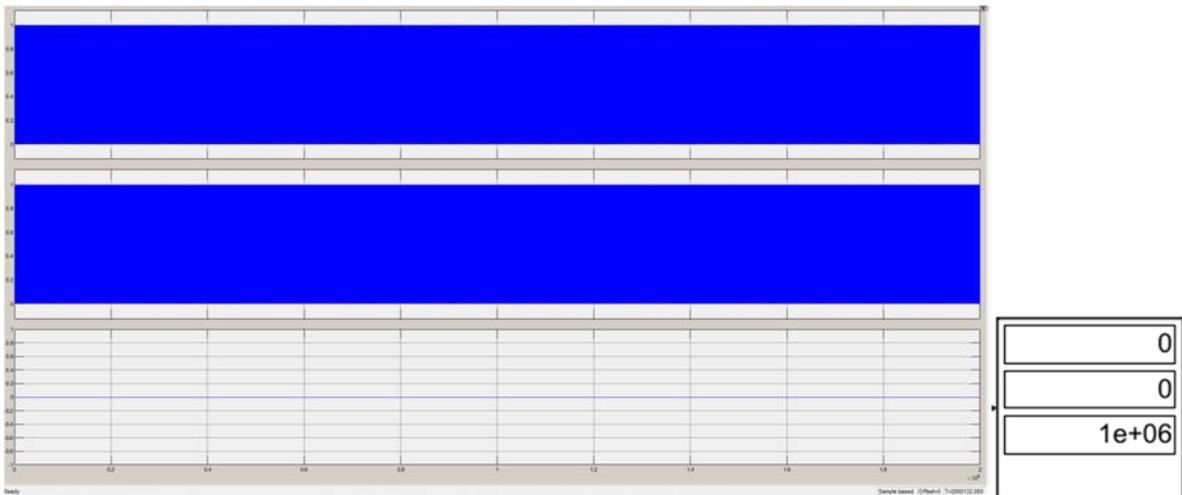


Рис. 13. Получение характеристик для «мягкого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 4 дБ



Рис. 14. Получение характеристик для «жесткого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 5 дБ

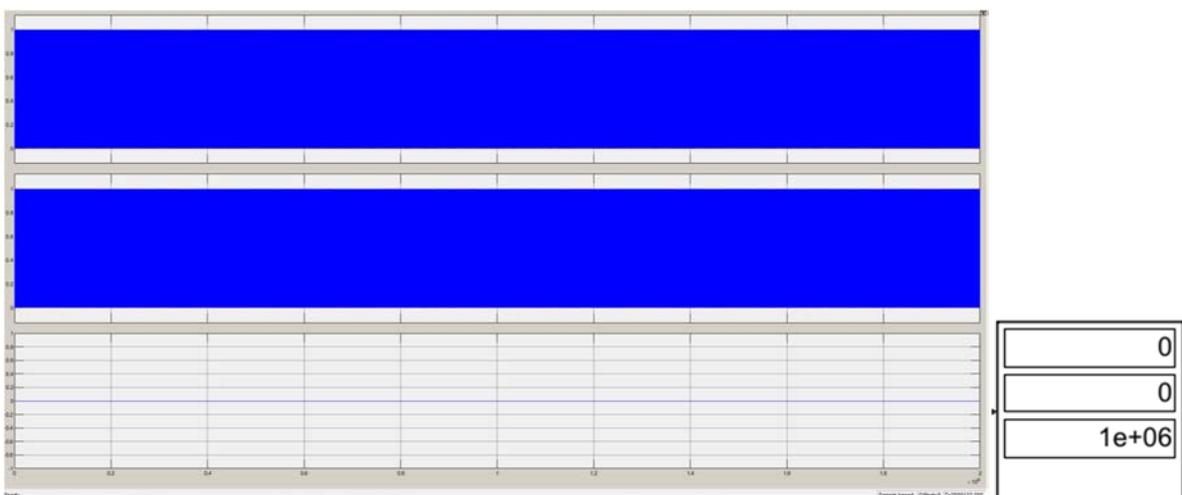


Рис. 15. Получение характеристик для «мягкого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби при отношении сигнал/шум, равное 5 дБ

Как можно заметить, использование «мягкого» декодирования дает выигрыш 2 дБ по сравнению с «жестким» декодированием. Уже при отношении сигнал/шум 3 дБ «мягкое» декодирование сверточных кодов по алгоритму Витерби не совершает ошибок, тогда как при

«жестком» декодировании сверточных кодов по алгоритму Витерби только при 5 дБ не совершаются ошибки при декодировании. На рис. 16 с помощью Matlab построены характеристики отношения сигнал/шум к вероятности битовой ошибки.

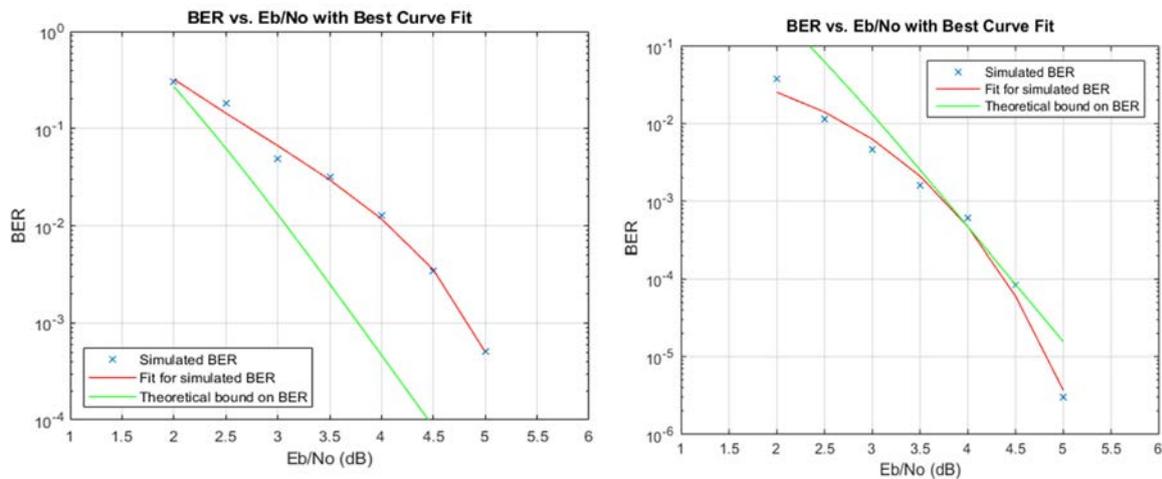


Рис. 16. Характеристики отношения сигнал/шум от вероятности битовой ошибки для «жесткого» декодирования по алгоритму Витерби (слева) и «мягкого» декодирования по алгоритму Витерби (справа)

По этим характеристикам также можно заметить, что вероятность битовой ошибки для одних и тех же соотношений сигнал/шум меньше в «мягком» декодировании по алгоритму Витерби по сравнению с «жестким» декодированием. Таким образом, при малых отношениях сигнал/шум вероятность ошибки на выходе декодера больше, чем на входе из-за эффекта размножения ошибок. Эффективность декодера увеличивается по мере увеличения качества канала.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование на примерах системы неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов и бесплатформенной инерциальной навигационной системы подвижного объекта показало:

- применение помехоустойчивого кодирования на основе сверточных кодов обеспечивает безопасную передачу больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок;
- использование «мягкого» декодирования сверточных кодов по алгоритму Витерби дает выигрыш 2 дБ по сравнению с «жестким» декодированием.

Список литературы

1. Аль-Аммори А., Дяченко П. В., Клочан А. Е. [и др.]. Методы и средства защиты информации // The Scientific Heritage. 2020. № 51-1.
2. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. 144 с.
3. Пат. 2764498 Российская Федерация. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Крамм М. Н. [и др.]. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
4. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. [и др.]. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и Техника, 2007. 672с.
5. Убиенных А. Г., Убиенных Г. Ф., Бодин О. Н. [и др.]. Применение канального кодирования в распределенной системе сбора и обработки кардиографической информации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 3. С. 77–86. doi: 10.21685/2307-5538-2019-3-9
6. Батяев А. С., Бодин О. Н., Чыонг Тхи Лан Нхи [и др.]. Обеспечение электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 89–96. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11
7. Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Кривоногов Л. Ю. [и др.]. Классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8

8. Как расшифровать ЭКГ. URL: <https://medtech30.ru/kak-rasshifrovat-ekg/>
9. Орлов В. Н., Орлов М. В. Руководство по электрокардиографии. 11-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Медицинское информационное агентство, 2023. 760 с.
10. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
11. Шеннон К. Связь при наличии шума // Теория информации и ее приложения : сб. переводов / под ред. А. А. Харкевича. М. : Гос. Изд-во физ-мат. лит., 1959. С. 82–113.
12. Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 379 с.
13. Кларк Дж. мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1987. 392 с.
14. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие. Изд. 5-е, испр. М. : Дрофа, 2006. 719 с.
15. Полоса пропускания и использование канала связи. URL: <https://networkguru.ru/polosa-propuskaniia-i-ispolzovanie-kanala-sviasi/>
16. Васильев К. К., Служивый М. Н. Математическое моделирование систем связи. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 128 с.
17. Костюков А. С., Башкиров А. В., Никитин Л. Н. [и др.]. Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 2. С. 132–138.
18. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки : пер. с англ. И. И. Грушко, В. М. Блиновский / под ред. К. Ш. Зигангирова. М. : Мир, 1986. 576 с.
19. Пат. 2516624 Российская Федерация. Способ декодирования сверточных кодов / Полушин П. А., Сеницын Д. В., Смирнов Е. А. № 2012153302 ; заявл. 10.12.2012 ; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
20. Бородин Л. Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. М. : Сов. радио, 1968. 408 с.

References

1. Al'-Ammori A., Dyachenko P.V., Klochan A.E. et al. Methods and means of information protection. *The Scientific Heritage*. 2020;(51-1). (In Russ.)
2. Kharkevich A.A. *Bor'ba s pomekhami = Anti-interference*. Moscow: Nauka, 1965:144. (In Russ.)
3. Pat. 2764498 Russian Federation. Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal. Bodin O.N., Bodin A.Yu., Kramm M.N. et al. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, bull. № 2. (In Russ.)
4. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. et al. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike = Modern telemetry in theory and in practice*. Saint Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2007:672. (In Russ.)
5. Ubiennykh A.G., Ubiennykh G.F., Bodin O.N. et al. Application of channel coding in a distributed system for collecting and processing cardiographic information. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(3):77–86. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2019-3-9
6. Batyaev A.S., Bodin O.N., Chyong Tkhi Lan Nkhi et al. Ensuring electromagnetic compatibility in the registration system of multiple leads of an electrocardiosignal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):89–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11
7. Bodin A.Yu., Kramm M.N., Krivonogov L.Yu. et al. Classification of electrocardiographic interference and development of a method for segmentation of the electrocardiosignal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8
8. *Kak rasshifrovat' EKG = How to decrypt the ECG*. (In Russ.). Available at: <https://medtech30.ru/kak-rasshifrovat-ekg/>
9. Orlov V.N., Orlov M.V. *Rukovodstvo po elektrokardiografii. 11-e izd., pererab. i dop. = Manual of electrocardiography. 11th ed., reprint. and add.* Moscow: Izd-vo Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo, 2023:760. (In Russ.)
10. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye = Digital communication. Theoretical foundations and practical application*. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2003:1104. (In Russ.)
11. Shannon K. Communication in the presence of noise. *Teoriya informatsii i ee prilozheniya: sb. perevodov = Theory of information and its applications : collection of translations*. Moscow: Gos. Izd-vo fiz-mat. lit., 1959:82–113. (In Russ.)

12. Gladkikh A.A. *Osnovy teorii myagkogo dekodirovaniya izbytochnykh kodov v stirayushchem kanale svyazi = Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in an erasing communication channel*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2010:379. (In Russ.)
13. Klark Dzh. ml., Keyn Dzh. *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi: per. s angl. = Coding with error correction in digital communication systems : trans. from English*. Moscow: Radio i svyaz', 1987:392. (In Russ.)
14. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie. Izd. 5-e, ispr. = Radio engineering circuits and signals : textbook. manual. 5th edition, rev.* Moscow: Drofa, 2006:719. (In Russ.)
15. *Polosa propuskaniya i ispol'zovanie kanala svyazi = Bandwidth and communication channel usage*. (In Russ.). Available at: <https://networkguru.ru/polosa-propuskaniia-i-ispolzovanie-kanala-sviasi/>
16. Vasil'ev K.K., Sluzhivyy M.N. *Matematicheskoe modelirovanie sistem svyazi = Mathematical modeling of communication systems*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2010:128. (In Russ.)
17. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Nikitin L.N. et al. Noise-resistant coding in modern communication formats. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(2):132–138. (In Russ.)
18. Bleykhut R. *Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki: per. s angl. I.I. Grushko, V.M. Blinovskiy = Theory and practice of error-controlling codes : translated from English by I.I. Grushko, V.M. Blinovskiy*. Moscow: Mir, 1986:576. (In Russ.)
19. Pat. 2516624 Russian Federation. Method of decoding convolutional codes. Polushin P.A., Sinityn D.V., Smirnov E.A. № 2012153302; appl. 10.12.2012; publ. 20.05.2014, bull. № 14. (In Russ.)
20. Borodin L.F. *Vvedenie v teoriyu potekhoustoychivogo kodirovaniya = Introduction to the theory of noise-resistant coding*. Moscow: Sov. radio, 1968:408. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Кирилл Дмитриевич Целикин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kdts777@yandex.ru

Kirill D. Tselikin

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

Михаил Николаевич Крамм

доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: krammmn@mail.ru

Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of fundamentals of radio engineering,
National Research University "MEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: bodin98@mail.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,
National Research University "MEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of technical quality management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 30.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2024

Принята к публикации/Accepted 15.07.2024

УДК 616-073.7+616-71
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-13

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО АЛГОРИТМА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МРТ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Е. В. Богданов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование формирования алгоритмов получения МРТ-изображений отличается высокой актуальностью. Цель работы – анализ достижений в разработках программного алгоритма получения изображений МРТ головного мозга. *Материалы и методы.* Найдено 17 статей в специализированных базах Cyberleninka, eLibrary, PubMed, ScienceDirect. Используются методы анализа, синтеза и индукции. *Результаты.* Лучшим для подавления шума изображений МРТ головного мозга является фильтр Гаусса, усовершенствование работы которого достигнуто посредством эволюции нейронных сетей. Автоматическая сегментация достигла эффективности, сопоставимой с ручной, благодаря применению комбинированной системы с интегрированными модулями для устранения влияния шума и фона, для выявления особенностей изображения и информации о краях. Оператор Собеля позволяет более четко выявить яркие края изображения МРТ для их удаления. Для объемной визуализации изображений головного мозга вследствие ее трудоемкости предлагается применение послойного представления данных МРТ. Сегментация Watershed и алгоритм классификации K-ближайшего соседа позволили получить точность изображения МРТ лишь 89 %, вейвлет-преобразование было выполнено без расчета точности. Метод опорных векторов (SVM) с использованием алгоритма GLCM показал точность до 93 %, но для обучения использовано лишь 36 изображений. На базе 150 МРТ-изображений головного мозга выполнена их классификация, и с использованием программного пакета MATLAB 2018a (Matrix Laboratory) достигнута точность тестирования 96,7 %. *Выводы.* Создаются улучшенные алгоритмы удаления шума и ярких краев изображений МРТ головного мозга, их сегментации и создания таковых с объемной визуализацией, в том числе эффективные программные модули автоматической сегментации на основе сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: МРТ, изображения, алгоритм, удаление шума, сегментация, фильтр, граница

Для цитирования: Богданов Е. В. Разработка программного алгоритма получения изображений МРТ головного мозга // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 111–118. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-13

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE ALGORITHM FOR OBTAINING MRI IMAGES OF THE BRAIN

E.V. Bogdanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Abstract. *Background.* Research into the formation of algorithms for obtaining MRI images is highly relevant. The purpose of the work is to analyze advances in the development of a software algorithm for obtaining MRI images of the brain. *Materials and methods.* Found 17 articles in specialized databases Cyberleninka, eLibrary, PubMed, ScienceDirect. Methods of analysis, synthesis and induction were used. *Results.* The best way to suppress noise in brain MRI images is the Gaussian Filter, the improvement of which has been achieved through the evolution of neural networks. Automatic segmentation achieved performance comparable to manual segmentation by using a combined system with integrated modules to eliminate the influence of noise and background, to identify image features and edge information. The Sobel operator allows the bright edges of an MRI image to be more clearly identified for removal. For volumetric visualization of brain images, due to its labor-intensive nature, the use of layer-by-layer representation of MRI data is proposed. Watershed segmentation and the K-nearest neighbor classification algorithm resulted in an MRI image accuracy of only 89 %; the wavelet transform was performed without calculating the accuracy. Support Vector Machine (SVM) using the GLCM algorithm showed an accuracy of up to 93 %, but only 36 images were used for training. Based on 150 MRI images of the brain, their classification was performed using the MATLAB 2018a software package (Matrix Laboratory) and a testing accuracy of 96,7 % was achieved. *Conclusions.* Improved algorithms for removing noise and bright edges from MRI brain

images, segmenting them, and creating them with volumetric visualization are being created, including effective software modules for automatic segmentation based on convolutional neural networks.

Keywords: MRI, images, algorithm, noise removal, segmentation, filter, edges

For citation: Bogdanov E.V. Development of a software algorithm for obtaining MRI images of the brain. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):111–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-13

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является базовым методом диагностики головного мозга (ГМ) и относится к наиболее информативным способам визуализации внутренних структур, неинвазивен, не требует дополнительного контрастирования тканей, отличается отсутствием ионизирующего излучения [1]. Алгоритмы обработки изображений стали неотъемлемой частью программного обеспечения устройства МРТ, начиная с простых операций (контроль контрастности, определение границ и преобразования на сером уровне) и заканчивая сегментацией, классификацией и диагностикой изображений ГМ [2]. Сегментация снимков МРТ ГМ с помощью компьютерной предобработки является важным этапом в функции приложений, направленных на обеспечение планирования хирургических операций, оценки активности мозга или детектирования злокачественных опухолей [1]. Исследования формирования алгоритмов получения изображений МРТ отличаются высокой актуальностью.

Цель настоящей работы – анализ достижений в разработках программного алгоритма получения изображений МРТ головного мозга.

Материалы и методы

Выполнен поиск русско- и англоязычных литературных источников по теме статьи. После предварительного поиска статей в системах Яндекс и Google проведен более глубокий мониторинг статей в специализированных базах Cyberleninka, eLibrary, PubMed, ScienceDirect. Всего найдено 17 статей, информация в которых была проанализирована и обобщена с помощью методов анализа, синтеза и индукции.

Результаты

Алгоритмы выполнения МРТ зависят от задач диагностики. Рак ГМ считается одним из самых опасных и распространенных. Исследования сосредоточиваются на улучшении качества изображений ГМ при выполнении МРТ [2] посредством методов предобработки для улучшения визуализации, обеспечения их хранения, передачи и дальнейшего анализа [1].

МРТ искажается шумом, который зависит от особенностей изображения, и вычисляется как по реальным, так и по моделированным изображениям. Шум затрудняет количественное измерение [3]. Подавление шумов происходит посредством различных фильтров (табл. 1).

Таблица 1

Наиболее распространенные фильтры удаления шумов с изображения МРТ головного мозга [1]

Фильтр (классификация, другие названия)	Описание
1	2
Усредняющий фильтр (фильтр нижних частот)	Для устранения шумовой зернистости, наиболее прост в применении. Принцип работы: генерация средних значений по маске фильтра. Снижает четкость изображения (размытие)
Фильтр Гаусса (фильтр нижних частот)	Меньше размывает изображения. Большое значение σ (стандартное отклонение распределения Гаусса) приводит к наибольшему размытию контуров. Принцип работы: пиксель маски фильтра имеет наибольшее значение яркости, соответствующее пику распределения Гаусса
Медианный фильтр (нелинейный фильтр)	Более эффективен в удалении импульсных помех. Принцип работы: сортировка амплитуд пикселей по возрастанию/убыванию, выбор значения центрального пикселя. Сохраняет пределы и разрешение изображения. Не эффективен в случае «белого» шума с нормальным законом распределения

Окончание табл. 1

1	2
Фильтр Винера (линейный по типу адаптивных фильтров, на основе инверсной фильтрации, фильтр минимального среднеквадратичного отклонения)	Принцип работы: нахождение определенной оценки для неискаженного изображения, чтобы ее среднеквадратичное отклонение было минимальным. При его большом значении сглаживает пиксели, более избирателен, чем линейная фильтрация. Сохраняет границы объектов, края, высокочастотные части, но требует больше времени для обработки. Хорошо подавляет Гауссов шум, который является постоянным «белым»

Удаление шума необходимо для сегментации изображения. Фильтр Гаусса позиционируется как лучший для устранения шума, затем по эффективности следуют фильтры Винера и Медианный [1].

Наиболее часто используемой моделью шума является модель аддитивного шума, т.е. $I = I_0 + n$, где шум n является независимым и имеет гауссово распределение с нулевым средним значением и известным стандартным отклонением, I – истинный сигнал, а I_0 – наблюдаемый сигнал. Большинство методов подавления шумов были разработаны с использованием модели аддитивного шума. Эти методы подразделяются на две основные категории: методы пространственной фильтрации и методы фильтрации в области преобразования. Методы пространственной области напрямую работают с пикселями изображения. Пространственный фильтр изображения – это операция с изображением, при которой значение $I(u)$ каждого пикселя или вокселя преобразуется в зависимости от интенсивности пикселей или вокселей в окрестности (u).

Традиционные фильтры пространственных изображений включают гауссовский, медианный, винеровский, диффузионный и двусторонний. Фильтры Гаусса и медианный удаляют шум в небольшой постоянной области и размывают изображения. Анизотропный диффузионный фильтр сохраняет границы изображений, но стирает мелкие детали и создает эффект маски в однородных областях изображений с шумоподавлением. Эти методы подавления шумов значительно устраняют шум, но приводят к размытости изображений и добавляют к ним артефакты. Фильтр изображений в области преобразования переводит изображения из пространственной области в другую область, такую как частотная и вейвлет-области, а затем обрабатывает изображения в новой области. Метод вейвлет-порогового определения может значительно снизить уровень шума, но приводит к появлению характерных артефактов.

Сглаживание фильтра Гаусса является ключевым этапом в анализе морфометрии на основе вокселей (VBM). Фильтр Винера использует окрестности для оценки своих параметров. Анизотропный фильтр объединяет локальные линейные фильтры минимальной среднеквадратичной ошибки (MSE) для удаления шума на МРТ. Трехлинейный фильтр обеспечивает результаты с сохранением границ за счет объединения геометрических, фотометрических и локальных структурных сходств. Методы оценки шума в вейвлет-области также используются при подавлении шумов на МРТ. МРТ в вейвлет-области разлагается на поддиапазоны в различных масштабах. Коэффициенты обрабатываются с мягким или жестким пороговым значением для оценки компонентов сигнала. Был предложен алгоритм нелокальных средних (NLM), который обеспечивает хорошие результаты с сохранением границ. Каждый пиксель изображения с шумоподавлением с помощью алгоритма NLM может представлять средневзвешенное значение всех пикселей зашумленного изображения с использованием функции Гаусса в качестве функции сглаживания. Доказано, что фильтр NLM является эффективным методом подавления шумов, особенно аддитивных [3].

При устранении шумов на изображениях необходимо сохранение самых важных их характеристик и удаление второстепенных. Устранение шума стало важнейшим этапом предварительной обработки во многих приложениях, таких как дистанционное зондирование, спутниковая и биомедицинская обработка изображений [4]. Некоторые шумы могут повлиять на внешний вид и повредить атрибуты изображения, другие – быть непостоянными и происходить случайно. От последних очень трудно избавиться, и было предложено множество методов для уменьшения шумов на изображениях и повышения их качества [5].

Предложен подход к устранению шумов при МРТ ГМ на основе вейвлетов в комбинации с дальнейшим применением недавно используемой улучшенной адаптивной обобщенной гауссовой распределенно-ориентированной пороговой функции (improved AGGD). Традиционная нейронная сеть с пороговым значением (TNN) и оптимизированное шумоподавление дают хорошие результаты, но не позволяют сохранить качество изображения. В системах TNN и устранения шумов на основе оптимизированных изображений требовалось использовать трудоемкие по времени алгоритмы обучения по методу наименьших квадратов (LMS) и оптимизации для нахождения оптимального порогового значения и параметров пороговых функций. Внедрен улучшенный подход по удалению шумов с помощью AGGD для повышения качественных и количественных характеристик конечного результата. Такое устранение шумов обеспечивает лучшие результаты с точки зрения пикового отношения сигнал/шум (PSNR), а также более быстрое время обработки, так как позволяет не применять алгоритмы LMS. Устранение шумов с использованием улучшенного порога AGGD эффективнее по сравнению с адаптивным и стандартным порогами, а также вейвлет-порогом [5].

Выявлено, что NLM эффективен против аддитивного (гауссовского) шума. Предложена схема для фильтра NLM с предварительным сглаживанием в сочетании с преобразованием изображения. Изображение МРТ сначала преобразуется так, что шум можно рассматривать как аддитивный, далее сглаживается с помощью традиционного метода шумоподавления. Затем применяется фильтр NLM и выполняется обратное преобразование результата с шумоподавлением. Смоделированные так и реальные данные (болезнь Альцгеймера и контроль) пациентов как способ проверки показали эффективность метода, которую оценивали путем выявления областей атрофии в гиппокампе и парагиппокампальной извилине. Было проведено сравнение различных методов предварительного сглаживания (гауссовский, медианный и анизотропный фильтры) и преобразования изображения (квадратура МРТ, прямые и обратные преобразования, стабилизирующие дисперсию – VST) для уменьшения шума. Сравнение результатов эксперимента показало, что использование фильтра предварительного сглаживания Гаусса и VST дало наилучшие результаты для определения пикового отношения сигнал/шум (PSNR) и обнаружения атрофии [3].

Автоматическая сегментация ранее была неэффективна по причине наличия шумов в исходных изображениях и необходимости удаления таких артефактов и некоторых деталей, мешающих проведению сегментации опухоли (черепная ткань, сосуды в головном мозге и т.п.) [1]. Посредством глубоких и сверточных нейронных сетей может быть достигнута эффективная сегментация изображений МРТ. Структура глубоких нейронных сетей для выполнения эффективной сегментации снимков включает слои свертки, обрабатывающие 2D- и 3D-фрагменты (патчи), и субдискретизирующие слои, выбирающие максимум (max-pooling) и уменьшающие размер карты признаков посредством слияния групп нейронов. При сравнении такого способа с ручной сегментацией не было выявлено особых отличий в конечном изображении ГМ. При этом достигнуто разбивание изображения на классы тканей. Качество классификации изображений ГМ при таком алгоритме оказывается выше, чем в случае использования только одной сети [6]. Сверточные нейронные сети показали эффективность в задаче выделения глиомы (наиболее распространенной злокачественной опухоли ГМ) [6, 7]. Разработана автоматическая система сегментации данных МРТ опухоли ГМ, которая называется AGSE-VNet, представляющая собой комбинированную модель с интегрированным модулем «Сжимать и возбуждать» (SE) и модулем «Фильтр направления внимания» (AG) для сегментации изображений 3D МРТ глиомы ГМ. В результате формируется сквозная сетевая структура и используется трехмерная свертка для обработки изображений МРТ. Изображение сжимается вместе с различными блоками кодирования, разрешение уменьшается вдвое, а количество каналов увеличивается. После свертки изображения выполняется модуль сжатия. Важность каждого функционального канала определяется автоматически в процессе обучения. В соответствии с выбранным уровнем продвигаются полезные функции текущей задачи и отменяются менее полезные. Каждый декодер получает характеристики соответствующего этапа понижающей дискретизации и распаковывает изображение, а при повышающей дискретизации интегрирован модуль AG. Блок внимания используется для устранения влияния шума и нерелевантного фона, а направляющая фильтрация изображения – для определения особенностей изображения и информации о границах. В модели используется идея пропуска соединения, чтобы избежать исчезновения градиента, и функция потерь Categorical Dice, которая эффективно решает проблему дисбаланса пикселей [7].

Известны алгоритмы обработки, направленные на удаление ярких границ изображений МРТ, характерных для снимков ГМ и влияющих на результат сегментации. Возможно наличие границ с такой же интенсивностью, что и область опухоли. Отметка таких границ и их удаление происходит в зонах резкого изменения значения яркости. Для выявления краевых пикселей применяются: фильтр Лапласа, операторы Кэнни и Собеля. Последний обеспечивает более четкие границы и скорость обработки [1].

Отмечается, что объемная визуализация МРТ ГМ является трудоемкой, хотя данный алгоритм применяется в анатомии для получения воксельных (трехмерных) моделей. Предлагается применение послойного представления изображений МРТ. Формирование срезов позволяет получить исчерпывающую информацию о структурах ГМ. На основе последнего алгоритма создана система для интеллектуального анализа снимков. Исходный код создавался с помощью метода опорных векторов (SVN) [8].

Было проведено несколько важных исследований по разработке алгоритмов получения изображений ГМ. В 2019 г. выполнена [9] классификация опухолей ГМ с использованием изображений МРТ методом К-ближайшего соседа (англ. *k-nearest neighbors* или KNN-алгоритма машинного обучения). В данном исследовании были обнаружены опухоли ГМ и классифицирована опухоль на три типа с использованием сегментации Watershed (рус. «Водораздел» – преобразование на изображении в оттенках серого похожих друг на друга объектов) и алгоритма классификации К-ближайшего соседа, но достигнутая точность была недостаточной и составила 89 %.

Исследование в 2020 г. «Обнаружение и классификация опухоли ГМ с использованием графического интерфейса на основе опорных векторов» [10], базировалось на использовании вейвлет-преобразования для извлечения признаков и технологии анализа основных компонентов (РСА) – метода машинного обучения, направленного на выявление исходных предикторов, объясняющих большинство вариаций в наборе данных. Однако точность в исследовании не была рассчитана для определения его успешности. Разработанный графический интерфейс (GUI) отображал значения извлеченных функций, малозначимых для пользователя. Позже опубликовано исследование «Семантическая сегментация изображений МРТ опухолей головного мозга и классификация SVM с использованием признаков GLCM» [11]. SVM (метод опорных векторов) заключается в классификации данных посредством гиперплоскости (линия, прямая, многомерные плоскости), а GLCM – метод исследования текстуры с учетом пространственного соотношения пикселей по матрице совпадения уровней серого. Был использован метод сегментации водоразделов и выделены признаки матрицы совпадения уровней серого (GLCM), а затем сравнивались результаты классификации с использованием шести классификаторов машины опорных векторов (SVM). Точность классификации составила 93 %, но для обучения использовалось очень мало (36) изображений.

В 2023 г. был применен более эффективный метод на основе чрезвычайно большого количества медицинских изображений, которые в стандартном режиме отнимают много времени для постановки диагноза и вызывают неспособность врача-клинициста иногда определить все подозрительные области на изображении. Разработан инновационный гибридный алгоритм на базе данных из 150 МРТ-изображений ГМ в поперечном сечении. Классификация изображений выполнялась посредством сортировки с опухолью или без нее и отображения новообразования. Первый этап состоял из нескольких: предварительной обработки и улучшения, сегментации, выделения признаков и сортировки на основе результатов трех объединенных классификаторов. Точность метода достигла 96,6 %. На втором этапе выполнена разработка и программирование графического пользовательского интерфейса и автономного приложения с использованием MATLAB 2018a (Matrix Laboratory) – программного пакета для решения задач технических вычислений. Достигнута возможность диагностировать большое количество изображений за короткий срок, снижая нагрузку на врача, с постановкой более точных диагнозов и различением областей, которые могут быть не видны невооруженным глазом. Финальная точность тестирования достигла 96,7 % [2].

Обсуждение

Обычные методы обработки изображений МРТ ГМ [12] с помощью компьютерного зрения включают: обнаружение границ, сегментацию и выделение признаков, а также обработку изображений для извлечения полезной информации. Наблюдается растущая тенденция к

использованию искусственного интеллекта (ИИ) в медицинской визуализации [13], в том числе для анализа МРТ-снимков и выявления закономерностей, связанных с конкретными заболеваниями/состояниями [14]. Алгоритмы ИИ также могут использоваться для реконструкции изображений, шумоподавления и управления 4D [15]. Наряду с усовершенствованием возможностей обработки и диагностики изображений МРТ головного мозга с помощью программных алгоритмов происходит разработка систем оценки качества изображений МРТ (бенчмаркинг), включая фантомы и тесты. Например, используются модуль оценки качества изображения Американского колледжа радиологии (ACR). Данные тесты и показатели стандартизированы и соответствуют рекомендациям ACR и Американской ассоциации физиков в медицине (AAPM) [16]. Рассматриваются также возможности перехода от ручной трудоемкой к автоматической проверке посредством ИИ и методов машинного и глубокого обучения, в частности, для оценки геометрических искажений. Способом использования ИИ в МРТ является также автоматизация проверки изображений посредством теста низкой контрастности, который считается одним из самых сложных тестов, так как включает 30 областей с различным уровнем видимости. Результаты подчеркивают потенциал методов глубокого обучения для революционизирования анализа медицинских изображений и способствуют прогрессу в уходе за пациентами и диагностике [17].

Заключение

Благодаря обширной области обработки изображений МРТ создаются широкие возможности для развития и усовершенствования визуальной диагностики. Поэтому будет происходить дальнейшая эволюция в сфере применения ИИ с внедрением более совершенных методов сегментации, извлечения большего количества признаков или даже обучения большому количеству классификаторов. Алгоритм также может быть разработан для диагностики типа опухоли в соответствии с доступными наборами данных. Среди наиболее эффективных фильтров для сегментации МРТ изображений головного мозга выделяют фильтр Гаусса, фильтр Винера и Медианный фильтр. На базе фильтра Гаусса создаются улучшенные алгоритмы сегментации изображения МРТ. Созданы эффективные программные модули автоматической сегментации снимков МРТ головного мозга на основе сверточных нейронных сетей.

Список литературы

1. Михелев В. М., Коняева Е. С. Компьютерная система предварительной обработки МРТ снимков головного мозга // Научный результат. Информационные технологии. 2020. № 1. С. 40–53.
2. Saad G., Suliman, A., Bitar L., Bshara S. Developing a hybrid algorithm to detect brain tumors from MRI images // Radiol. Nucl. Med. 2023. Vol. 54. P. 14. doi: 10.1186/s43055-023-00962-w
3. Yang J., Fan J., Ai D. [et al.]. Brain MR image denoising for Rician noise using pre-smooth non-local means filter // BioMed. Eng. OnLine. 2015. Vol. 14. P. 2. doi: 10.1186/1475-925X-14-2
4. Golilarz N.A., Gao H., Demirel H. Satellite image de-noising with Harris Hawks meta heuristic optimization algorithm and improved adaptive generalized gaussian distribution threshold function // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 57459–57468.
5. Amiri Golilarz N., Gao H., Kumar R. [et al.]. Adaptive Wavelet Based MRI Brain Image De-noising // Front Neurosci. 2020. Vol. 14. P. 728. doi: 10.3389/fnins.2020.00728
6. Шустова М. В., Анохина О. А. Методы нейросетевой обработки биомедицинских данных МРТ // Актуальные проблемы медицины в России и за рубежом : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2018. С. 37–46.
7. Guan X., Yang G., Ye J. [et al.]. 3D AGSE-VNet: an automatic brain tumor MRI data segmentation framework // BMC Med. Imaging. 2022. Vol. 22. P. 6. doi: 10.1186/s12880-021-00728-8
8. Гаджиева Н. А., Гаджиев А. М. Исследование и распознавание изображений магнитно-резонансной томографии головного мозга человека // Неделя науки – 2021 : сб. материалов 42 итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Махачкала : ФОРМАТ, 2021. С. 102–104.
9. Ramdlon R., Kusumaningty E., Karlita T. Brain tumor classification using MRI images with K-Nearest neighbor method // International electronics symposium (IES). Indonesia, 2019. P. 661–667. doi:10.1109/electsym.2019.8901
10. Khan I. U., Akhtar S., Khan Sh. Detection and classification of brain tumor using support vector machine based GUI // 7th international conference on signal processing and integrated networks. Spain, 2020. P. 740–744. doi:10.1109/SPIN48934.2020.9071146

11. Hussain A., Khunteta A. Semantic segmentation of Brain tumor from MRI images and SVM classification using GLCM features // Second international conference on inventive research in computing applications (ICIRCA). India, 2020. P. 38–43. doi: 10.1109/icirca48905.2020.9
12. Alaya I. B., Mars M. Automatic analysis of ACR phantom images in MRI // *Curr. Med. Imag. (Formerly Curr. Med. Imag. Rev.)*. 2020. Vol. 16, № 7. P. 892–901.
13. Mishra D., Chaudhury S., Sarkar M., Soin A.S. Ultrasound image segmentation: a deeply supervised network with attention to boundaries // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2019. Vol. 66, № 6. P. 1637–1648.
14. Fu C. H. Y., Erus G., Fan Y. [et al.]. AI-based dimensional neuroimaging system for characterizing heterogeneity in brain structure and function in major depressive disorder: COORDINATE-MDD consortium design and rationale // *BMC Psychiatry*. 2023. Vol. 23, № 1. P. 59. doi: 10.1186/s12888-022-04509-7
15. Chatterjee S., Breitkopf M., Sarasaen C. [et al.]. ReconResNet: regularised residual learning for MR image reconstruction of Undersampled cartesian and radial data // *Comput. Biol. Med.* 2022. Vol. 143. P. 1–3.
16. American College of Radiology. Phantom Test Guidance for the ACR MRI Accreditation Program. 2018. URL: <https://www.acraccreditation.org/-/media/ACRAccreditation/Documents/MRI/LargePhantom-Guidance.pdf?la=en>
17. Torfeh T., Aouadi S., Yoganathan S. [et al.]. Deep Learning Approaches for Automatic Quality Assurance of Magnetic Resonance Images Using ACR Phantom // *BMC Med. Imaging*. 2023. Vol. 23. P. 197. doi: 10.1186/s12880-023-01157-5

References

1. Mikhelev V.M., Konyaeva E.S. Computer system for preprocessing MRI images of the brain. *Nauchnyy rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii = Scientific result. Information technology*. 2020;(1):40–53. (In Russ.)
2. Saad G., Suliman, A., Bitar L., Bshara S. Developing a hybrid algorithm to detect brain tumors from MRI images. *Radiol. Nucl. Med.* 2023;54:14. doi: 10.1186/s43055-023-00962-w
3. Yang J., Fan J., Ai D. et al. Brain MR image denoising for Rician noise using pre-smooth non-local means filter. *BioMed. Eng. OnLine*. 2015;14:2. doi: 10.1186/1475-925X-14-2
4. Golilarz N.A., Gao H., Demirel H. Satellite image de-noising with Harris Hawks meta heuristic optimization algorithm and improved adaptive generalized gaussian distribution threshold function. *IEEE Access*. 2019;7:57459–57468.
5. Amiri Golilarz N., Gao H., Kumar R. et al. Adaptive Wavelet Based MRI Brain Image De-noising. *Front Neurosci*. 2020;14:728. doi: 10.3389/fnins.2020.00728
6. Shustova M.V., Anokhina O.A. Methods of neural network processing of biomedical MRI data. *Aktual'nye problemy meditsiny v Rossii i za rubezhom: sb. nauch. tr. po itogam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Actual problems of medicine in Russia and abroad : collection of scientific papers based on the results of the International scientific and practical conference*. Novosibirsk, 2018:37–46. (In Russ.)
7. Guan X., Yang G., Ye J. et al. 3D AGSE-VNet: an automatic brain tumor MRI data segmentation framework. *BMC Med. Imaging*. 2022;22:6. doi: 10.1186/s12880-021-00728-8
8. Gadzhieva N.A., Gadzhiev A.M. Investigation and image recognition of magnetic resonance imaging of the human brain. *Nedelya nauki – 2021: sb. materialov 42 itogovoy nauch.-tekhn. konf. prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU = Science Week – 2021 : collection of materials 42 of the final scientific and technical conference conf. of teachers, staff, graduate students and students of DSTU*. Makhachkala: FORMAT, 2021:102–104. (In Russ.)
9. Ramdlon R., Kusumaningtyas E., Karlita T. Brain tumor classification using MRI images with K-Nearest neighbor method. *International electronics symposium (IES)*. Indonesia, 2019:661–667. doi:10.1109/elecsym.2019.8901
10. Khan I.U., Akhtar S., Khan Sh. Detection and classification of brain tumor using support vector machine based GUI. *7th international conference on signal processing and integrated networks*. Spain, 2020: 740–744. doi:10.1109/SPIN48934.2020.9071146
11. Hussain A., Khunteta A. Semantic segmentation of Brain tumor from MRI images and SVM classification using GLCM features. *Second international conference on inventive research in computing applications (ICIRCA)*. India, 2020:38–43. doi: 10.1109/icirca48905.2020.9
12. Alaya I.B., Mars M. Automatic analysis of ACR phantom images in MRI. *Curr. Med. Imag. (Formerly Curr. Med. Imag. Rev.)*. 2020;16(7):892–901.
13. Mishra D., Chaudhury S., Sarkar M., Soin A.S. Ultrasound image segmentation: a deeply supervised network with attention to boundaries. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2019;66(6):1637–1648.
14. Fu C.H.Y., Erus G., Fan Y. et al. AI-based dimensional neuroimaging system for characterizing heterogeneity in brain structure and function in major depressive disorder: COORDINATE-MDD consortium design and rationale. *BMC Psychiatry*. 2023;23(1):59. doi: 10.1186/s12888-022-04509-7
15. Chatterjee S., Breitkopf M., Sarasaen C. et al. ReconResNet: regularised residual learning for MR image reconstruction of Undersampled cartesian and radial data. *Comput. Biol. Med.* 2022;143:1–3.

16. *American College of Radiology. Phantom Test Guidance for the ACR MRI Accreditation Program.* 2018. Available at: <https://www.acraccreditation.org/-/media/ACRAccreditation/Documents/MRI/Large-PhantomGuidance.pdf?la=en>
17. Torfeh T., Aouadi S., Yoganathan S. et al. Deep Learning Approaches for Automatic Quality Assurance of Magnetic Resonance Images Using ACR Phantom. *BMC Med. Imaging.* 2023;23:197. doi: 10.1186/s12880-023-01157-5

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Владимирович Богданов

аспирант,

Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана

(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)

E-mail: evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Evgeniy V. Bogdanov

Postgraduate student,

Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,

Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.07.2024

Принята к публикации/Accepted 01.08.2024

УДК 519.6

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-14

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕАБИЛИТАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВЫХ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ

А. Н. Тычкова¹, А. К. Алимуратов²

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

¹tychkova-anna@mail.ru, ²alansapfir@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Оперативная и эффективная реабилитация людей с умственной отсталостью посредством обработки и анализа потоковых речевых данных имеет важное значение для своевременного реагирования систем поддержки принятия врачебных решений, направленных на улучшение состояния человека с ограниченными возможностями здоровья. Целью данной работы является представление оригинального методологического подхода, обеспечивающего повышение эффективности и оперативности оценки процесса реабилитации людей с умственной отсталостью посредством анализа информативных параметров речевых сигналов в условиях аудиовизуального стимулирования. *Материалы и методы.* Для достижения поставленных целей в работе использованы математические и статистические методы обработки и обнаружения амплитудных, частотных и временных параметров речевых сигналов, программирование и математическое моделирование. *Результаты.* Разработана схема формирования информационной подсистемы регистрации речевых сигналов у человека с умственной отсталостью, которая включает различные этапы обработки и анализа речевых сигналов с целью формирования набора информативных значимых параметров. *Выводы.* Представлен и обоснован методологический подход повышения эффективности процесса реабилитации за счет применения оригинальных алгоритмов и программ обнаружения и сравнения значимых параметров речевых сигналов до и после процесса реабилитации и корректировки процесса посредством отрицательной обратной связи.

Ключевые слова: речевой сигнал, система принятия врачебных решений, база данных, значимые параметры, чувствительность и специфичность

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта № FSGE-2023-0006 «Социально-средовая, социально-педагогическая и социально-психологическая реабилитация детей-инвалидов с психическими расстройствами и расстройствами поведения», за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Тычкова А. Н., Алимуратов А. К. Методологический подход повышения результативности процесса реабилитации на основе анализа потоковых речевых данных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 119–124. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-14

METHODOLOGICAL APPROACH TO IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE REHABILITATION PROCESS BASED ON THE ANALYSIS OF STREAMING SPEECH DATA

A.N. Tychkova¹, A.K. Alimuradov²

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

¹tychkova-anna@mail.ru, ²alansapfir@yandex.ru

Abstract. *Background.* Prompt and effective rehabilitation of people with mental retardation through processing and analysis of streaming speech data is important for the timely response of medical decision support systems aimed at improving the condition of a person with disabilities. The purpose of this work is to present an original methodological approach that ensures increased efficiency and efficiency of assessing the rehabilitation process of people with mental retardation through the analysis of informative parameters of speech signals under audiovisual stimulation. *Materials and methods.* To achieve the stated goals, the work uses mathematical and statistical methods for processing and detecting amplitude, frequency and time parameters of speech signals, programming and mathematical modeling. *Results.* A scheme has been developed for forming an information subsystem for recording speech signals in a person with mental

retardation, which includes various stages of processing and analyzing speech signals in order to form a set of informative significant parameters. *Conclusions.* A methodological approach to increasing the efficiency of the rehabilitation process through the use of original algorithms and programs for detecting and comparing significant parameters of speech signals before and after the rehabilitation process and adjusting the process through negative feedback is presented and substantiated.

Keywords: speech signal, medical decision making system, database, significant parameters, sensitivity and specificity

Financing: the work was carried out within the framework of the FSGE-2023-0006 project "Socio-environmental, socio-pedagogical and socio-psychological rehabilitation of disabled children with mental disorders and behavioral disorders", at the expense of the federal budget.

For citation: Tychkova A.N., Alimuradov A.K. Methodological approach to improving the effectiveness of the rehabilitation process based on the analysis of streaming speech data. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):119–124. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-14

Введение

По различным статистическим данным министерств и ведомств как в России, так и за рубежом около 10 % рожденных детей имеют ограниченные возможности здоровья, среди которых около 2–3 % имеют диагноз умственная отсталость. В России уход, диагностика и реабилитация за данной категорией детей контролируются соответствующими стандартами. Данные стандарты имеют определенные ограничения, не позволяющие в широком смысле внедрять современные технологии на стыке медицины, приборостроения и информационных технологий. Однако в России и мире известны определенные научные школы и коллективы, которые активно изучают вопросы поведения детей с умственной отсталостью и возможности внедрения новых инженерных решений с целью реабилитации [1, 2].

Для повышения эффективности процесса реабилитации известны различные методы психоэмоционального стимулирования в качестве инструментов реабилитации [3, 4]: когнитивно-поведенческая терапия, межличностная терапия, диалектическая поведенческая терапия, физические упражнения, электромагнитная стимуляция и аудиовизуальная стимуляция. В свою очередь методы и средства аудиовизуальной стимуляции включают: акустическую стимуляцию (цифровая музыка, звуки), обонятельную стимуляцию (запахи), тактильную стимуляцию (интерактивные игры, инструментальная музыка, температурные изменения), визуальную стимуляцию (цвет, свет, изображение), художественную стимуляцию (рисование, лепка), виртуальную и дополненную реальность. Выявлено, что метод аудиовизуальной терапии является самым перспективным, востребованным и широко распространенным среди неврологов и психологов.

Согласно информации из открытых источников литературы [5, 6], известны определенные методы и средства инструментальной диагностики умственной отсталости. Среди всего многообразия методов диагностика речевого развития является наиболее оперативным и простым для принятия решения врачом [7]. Следует отметить, что среди различных методов диагностики по уровню речевого развития анализ параметров речевых сигналов у детей с умственной отсталостью является малоизученным и перспективным направлением исследования. Несмотря на огромный научный задел в области цифровой обработки речевых сигналов для различных целей и назначения, анализ речевых сигналов у говорящих детей с умственной отсталостью в настоящей работе выполнен впервые. Целью настоящей работы является представление нового методологического подхода, направленного на повышение эффективности и оперативности оценки процесса реабилитации детей с умственной отсталостью посредством анализа информативных параметров речевых сигналов.

Основной раздел

Речевой сигнал – слабо структурированный и нестационарный сигнал сложной формы, который невозможно описать четкой аналитической функцией в различных временных, частотных и энергетических формах представления. Для формирования речи используются различные органы речевого аппарата. Однако у большинства детей с умственной отсталостью отмечаются определенные физиологические особенности формирования речи, например, замедленное развитие речи, ограниченный словарный запас, нарушения звукопроизношения, нарушения грамматики, нарушения связной речи и ряд других изменений [8]. Следует также отметить, что в данной работе исследуются такие просодические компоненты, как темп, ритм, интонация, голос.

На рис. 1 приведен методологический подход повышения эффективности процесса реабилитации за счет применения оригинальных алгоритмов и программ обнаружения и сравнения значимых параметров речевых сигналов до и после процесса реабилитации и корректировки процесса посредством отрицательной обратной связи. Методологический подход включает в себя следующие основные этапы: регистрацию речевого сигнала до и после аудиовизуального стимулирования, базы данных речевых сигналов и пороговых значений значимых параметров, блок обработки речевых сигналов, блоки обнаружения и сравнения значимых параметров, блок результатов сравнения значимых параметров и принятия решения, блок корректировки аудиовизуального стимулирования. Применение такого подхода в качестве дополнительного источника информации в системе принятия врачебных решений позволит улучшить качество жизни говорящих детей с умственной отсталостью.

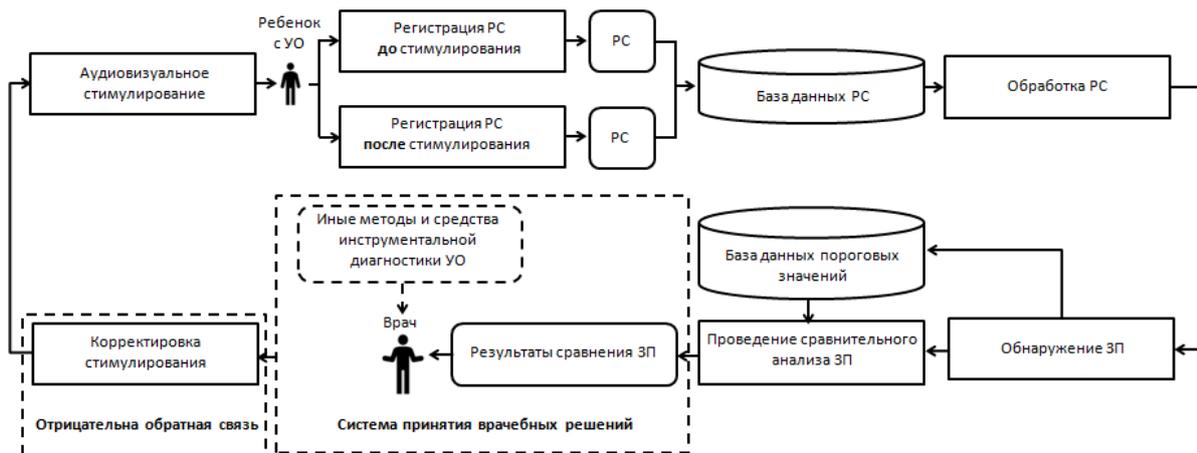


Рис. 1. Методологический подход повышения эффективности процесса реабилитации

Для реализации методологии разработана схема формирования информационной подсистемы регистрации речевых сигналов у детей с умственной отсталостью (рис. 2), которая включает различные этапы обработки и анализа речевых сигналов с целью формирования набора информативных значимых параметров.

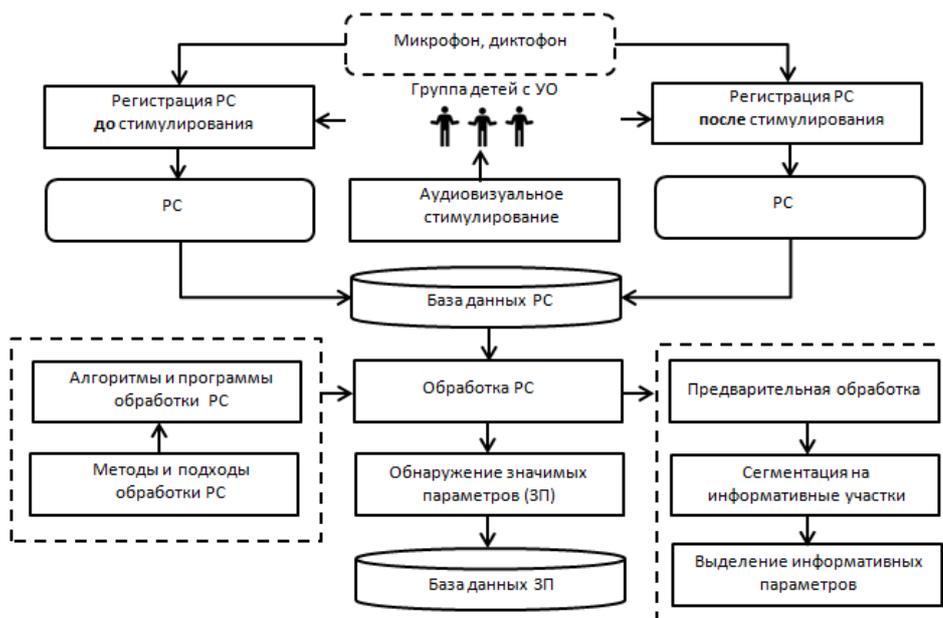


Рис. 2. Схема формирования информационной подсистемы регистрации речевых сигналов

Схема формирования информационной подсистемы регистрации речевых сигналов включает в себя следующие этапы: блоки регистрации речевых сигналов до и после аудиовизуального стимулирования, блок аудиовизуального стимулирования, микрофон и диктофон, база

данных речевых сигналов, блоки обработки, обнаружения и хранения значимых параметров речевых сигналов. В свою очередь, блок обработки речевых сигналов включает в себя блок предварительной обработки, сегментации и выделения информативных параметров исследуемых сигналов. Для реализации данного блока обработки используются современные математические и статистические методы, подходы, алгоритмы и программы цифровой обработки нелинейных и нестационарных сигналов, каким и является речевой сигнал.

В соответствии с результатами собственных исследований [9], а также обзора источников литературы [10, 11] сформирован оптимальный набор информативных параметров речевых сигналов для темпа, ритма, интонации и речи испытуемого.

Известно значительное число параметров речевых сигналов, характеризующих речь в различных амплитудных, временных и частотных представлениях. В настоящей работе исследованы 15 информативных параметров, среди которых только семь параметров показали наилучшие результаты, отражающие динамические характеристик речевых сигналов в период реабилитации с использованием различных аудиовизуальных средств стимулирования, такие как:

- 1) скорость речи;
- 2) ускорение речи;
- 3) энтропия распределения временных интервалов тональных, нетональных участков и участков пауз;
- 4) стандартное отклонение контура ЧОТ;
- 5) энергия;
- 6) среднее значение амплитуды;
- 7) стандартное отклонение контура амплитуды.

Для оценки результатов исследования использовались понятия чувствительности и специфичности, которые были рассчитаны для 15 и 7 значимых параметров соответственно.

Расчет чувствительности осуществлялся согласно следующей формуле:

$$Se = \frac{TP}{TP - FN} 100 \%,$$

где TP – истинные положительные результаты; FP – ложные положительные результаты; FN – ложные отрицательные результаты; TN – истинные отрицательные результаты.

На рис. 3 приведены графические результаты расчетов чувствительности и специфичности для исследованных информативных параметров речевых сигналов. Показано, что предложенная методология обнаружения значимых параметров речевых сигналов обеспечивает чувствительность и специфичность параметров темпа 96 и 92 % соответственно, ритма 93 и 90 %, речи 82 и 89 %, интонации 85 и 91 %, что может быть использовано врачом или специалистом на этапе оценки процесса реабилитации детей с умственной отсталостью в системе принятия врачебных решений.

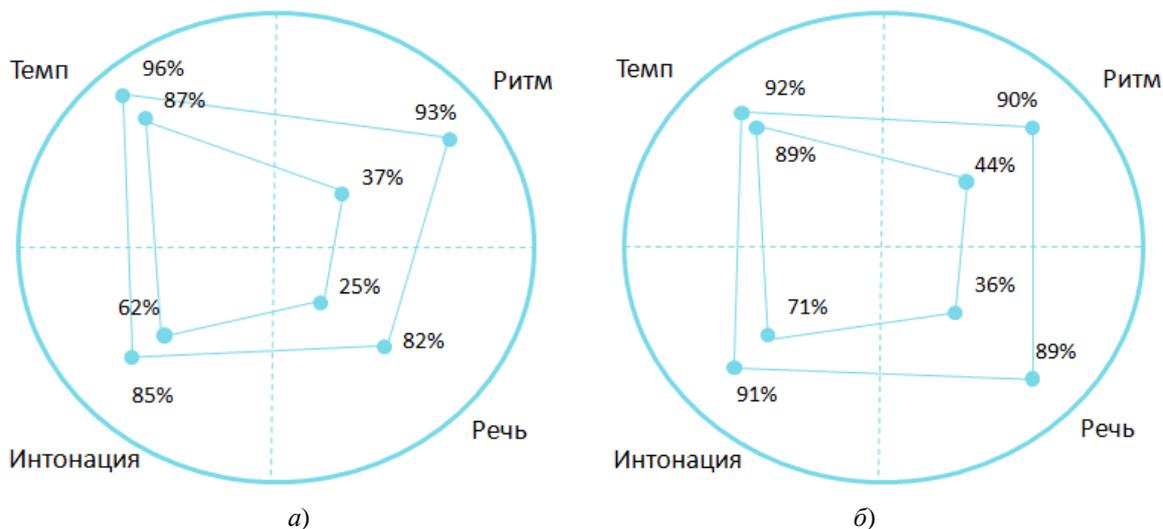


Рис. 3. Графические результаты расчетов:

a – чувствительности информативных параметров речевых сигналов;

б – специфичности информативных параметров речевых сигналов

Заклучение

Разработан методологический подход повышения эффективности оценки процесса реабилитации с использованием аудиовизуальных средств стимулирования за счет применения оригинальных алгоритмов и программ обнаружения и сравнения значимых параметров речевых сигналов до и после процесса реабилитации и отрицательной обратной связи как дополнительного источника информации в системе принятия врачебных решений для улучшения качества жизни детей (говорящих) с умственной отсталостью.

Список литературы

1. Озеретский Н. И. Психопатология детского возраста : пособие для высших пед. учеб. заведений. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л. : Учпедгиз, 1938. 328 с.
2. Гуревич М. О., Серейский М. Я. Учебник психиатрии. Перераб. 4-е изд. М.-Л. : Медгиз, 1940. 316 с.
3. Емалетдинов Б. М. «Психические расстройства» или «психические нарушения» // Вестник Башкирского университета. 2020. Т. 25, № 3. С. 681–687.
4. Корень Е. В. Психосоциальная реабилитация детей и подростков с психическими расстройствами в современных условиях // Социальная и клиническая психиатрия. 2008. № 4. С. 5–14.
5. Первова И. Л., Келасьев В. Н. Социальная реабилитация инвалидов с тяжелыми и множественными нарушениями развития // Ученые записки СПбГИПСР. 2020. Вып. 2, Т. 34. С. 76–81.
6. Реабилитация инвалидов / под ред. Г. Н. Пономаренко. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. 736 с.
7. Тычкова А. Н., Агейкин А. В., Алимуратов А. К. [и др.]. Анализ и оценка сигнальных систем диагностики пограничных психических расстройств // Биотехносфера. 2017. № 1 (49). С. 35–39.
8. 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.
9. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю. Повышение эффективности обнаружения психических расстройств на основе адаптивной декомпозиции и кепстрального анализа речевых сигналов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ'2018). 2018. Кн. 1. С. 405–409.
10. Schuller B. Towards intuitive speech interaction by the integration of emotional aspects // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2002. Vol. 6. P. 6.
11. Алдошина И. А. Связь акустических параметров с эмоциональной выразительностью речи и пения // Звукорежиссер. 2003. № 2. С. 34–46.

References

1. Ozeretskiy N.I. *Psikhopatologiya detskogo vozrasta: posobie dlya vysshikh ped. ucheb. zavedeniy. Izd. 2-e, dop. i pererab.* = *Psychopathology of childhood: a manual for higher educational institutions. institutions. 2nd edition, add. and rev.* Leningrad: Uchpedgiz, 1938:328. (In Russ.)
2. Gurevich M.O., Sereyskiy M.Ya. *Uchebnyk psikhiiatrii. Pererab. 4-e izd.* = *Textbook of psychiatry. Pererab. 4th ed.* . Moscow-Leningrad: Medgiz, 1940:316. (In Russ.)
3. Emaletdinov B.M. "Mental disorders" or "mental disorders". *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of Bashkir University*. 2020;25(3):681–687. (In Russ.)
4. Koren' E.V. Psychosocial rehabilitation of children and adolescents with mental disorders in modern conditions. *Sotsial'naya i klinicheskaya psikhiiatriya = Social and clinical psychiatry*. 2008;(4):5–14. (In Russ.)
5. Pervova I.L., Kelas'ev V.N. Social rehabilitation of the disabled with severe and multiple developmental disorders. *Uchenye zapiski SPbGIPSR = Scientific notes of the SPbGIPSR*. 2020;34(2):76–81. (In Russ.)
6. Ponomarenko G.N. (ed.). *Reabilitatsiya invalidov = Rehabilitation of the disabled*. Moscow: GEOTAR-Media, 2018:736. (In Russ.)
7. Tychkova A.N., Ageykin A.V., Alimuradov A.K. et al. Analysis and evaluation of signaling systems for the diagnosis of borderline mental disorders. *Biotehnosfera = Biotechnosphere*. 2017;(1):35–39. (In Russ.)
8. 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.
9. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu. Improving the effectiveness of detecting mental disorders based on adaptive decomposition and cepstral analysis of speech signals. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii (FREME'2018) = Physics and radioelectronics in medicine and ecology (FRAME'2018)*. 2018;(bk. 1):405–409. (In Russ.)
10. Schuller B. Towards intuitive speech interaction by the integration of emotional aspects. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2002;6:6.
11. Aldoshina I.A. The connection of acoustic parameters with the emotional expressiveness of speech and singing. *Zvukorezhisser = Sound engineer*. 2003;(2):34–46. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Анна Николаевна Тычкова**

начальник отдела координации
научных мероприятий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkova-anna@mail.ru

Anna N. Tychkova

Head of scientific events coordination department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алан Казанферович Алимуратов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: 4alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radioelectronic 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 03.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 01.07.2024

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024