

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Чуввыкин Б. В., Рыблова Е. А., Волков В. С., Трофимов А. А.

КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
МЕМБРАННОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БПЛА

5

Трофимов В. Ю., Шахмейстер А. Е.

ЦИФРОЧАСТОТНЫЕ УМНОЖИТЕЛИ В АВТОНОМНЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

16

Минаков Е. И., Хазов Н. И.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ
ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА

25

Вавилов Р. Е., Гольдберг В. А.

КАЛИБРОВКА МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА
ВНУТРИТРУБНОГО МАГНИТНОГО ДЕФЕКТОСКОПА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

32

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Мамонтов В. С., Гурин С. А., Новичков М. Д., Агафонов Д. В., Закирова К. А.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАССИВИРУЮЩИХ СТРУКТУР
МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

43

Зинченко Т. О., Чихрина У. С.

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ОКСИДЫ
НА ОСНОВЕ НЕДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

49

Александров В. Р., Азарнов Н. В., Щеткин А. А.,

Кушнир А. П., Огорельцев Р. М.

КВАЗИНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ
МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

57

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Чайковский В. М.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

68

Трофимов А. А., Чихрина У. С., Попченков Д. В., Гулиева Д. А.

БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

74

Ватутин М. А., Шевкунов И. А.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЕМКОСТНЫМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

80

Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Козлов Г. В., Александров В. С.

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВЫМ
МЕТОДОМ

91

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Богданов Е. В.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МУКОПОЛИСАХАРИДОЗА 1 ТИПА
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МРТ

97

Безбородова О. Е., Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н., Мартынов Д. В.

СЖАТИЕ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В БИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

105

Мохова А. О., Геращенко С. М.

ОБЗОР МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
В СИСТЕМАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ
ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ В СТОМАТОЛОГИИ

115

Земцов В. В., Иващенко А. В.

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ
УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

126

Хрящев В. В.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ В ЭНДОСКОПИИ
ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

137

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Chuvykin B.V., Ryblova E.A., Volkov V.S., Trofimov A.A.

PRESSURE MEASUREMENT CHANNEL BASED ON
A SEMICONDUCTOR MEMBRANE STRAIN GAUGE
FOR THE UAV INFORMATION AND CONTROL SYSTEM

5

Trofimov V.Yu., Shakhmeister L.E.

DIGITAL FREQUENCY MULTIPLIERS IN AUTONOMOUS
INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

16

Minakov E.I., Khazov N.I.

A METHOD FOR DETERMINING THE COORDINATES
AND SPEED OF A MOVING OBJECT USING A MOBILE PHONE

25

Vavilov R.E., Goldberg V.A.

PIPELINE INSPECTION GAUGE MAGNETIC SENSOR CALIBRATION
USING TIME-HARMONIC ELECTROMAGNETIC FIELD

32

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Mamontov V.S., Gurin S.A., Novichkov M.D., Agafonov D.V., Zakirova K.L.

SYNTHESIS OF PASSIVATING STRUCTURES
OF MULTILAYER THIN-FILM RESISTORS

43

Zinchenko T.O., Chikhrina U. S.

TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BASED ON
NON-DEFICIT MATERIALS

49

Aleksandrov V.R., Azarnov N.V., Schetkin A.A., Kushnir A.P., Ogoreltcev R.M.

UASI-PRECISE CONTROL OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

57

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Chaykovskiy V.M.

MEASURING CIRCUIT FOR CONVERSION PARAMETERS
OF THE MIS-STRUCTURE

68

<i>Trofimov A.A., Chikhrina U.S., Popchenkov D.V., Gulieva D.A.</i> NON-CONTACT SYSTEM FOR MEASURING VIBRATION DISPLACEMENTS	74
<i>Vatutin M.A., Shevkunov I.A.</i> CIRCUIT DESIGN PROPOSALS FOR IMPROVING THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A MICROMECHANICAL ACCELEROMETER WITH A CAPACITIVE DISPLACEMENT SENSOR	80
<i>Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Kozlov G.V., Aleksandrov V.S.</i> A DEVICE FOR MEASURING THE SURFACE RESISTANCE OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BY THE FOUR-PROBE METHOD	91
MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS	
<i>Bogdanov E.V.</i> ANALYSIS OF MUCOPOLYSACCHARIDOSIS TYPE 1 PROGRESSION BASED ON MRI DATA	97
<i>Bezborodova O.E., Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N., Martynov D.V.</i> DATA COMPRESSION USING WAVELET TRANSFORM IN BIOTELEMETRY SYSTEMS	105
<i>Mokhova A.O., Gerashchenko S.M.</i> REVIEW OF METHODS AND ALGORITHMS USED IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS TO SUPPORT MEDICAL DECISION-MAKING IN INSTRUMENTAL DIAGNOSTICS IN DENTISTRY	115
<i>Zemtsov V.V., Ivaschenko A.V.</i> IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR LOW-POWER DEVICES OF THE INTERNET OF MEDICAL THINGS	126
<i>Khryashchev V.V.</i> CONCEPT FOR A CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN GASTROINTESTINAL ENDOSCOPY	137

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 629.7.067.8

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МЕМБРАННОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БПЛА

Б. В. Чувькин¹, Е. А. Рыблова², В. С. Волков³, А. А. Трофимов⁴

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

² СКБ АО «Электромеханика», Пенза, Россия

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² Elizaveta.ryblova@mail.ru, ³ vadimv_1978@mail.ru, ⁴ alex.t1978@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальность применения беспилотных летательных аппаратов для решения задач в различных отраслях техники. Анализируются особенности построения высотомеров различного типа. Целью работы является улучшение характеристик барометрических высотомеров на основе датчиков давления, применяемых в системах управления беспилотных аппаратов. *Материалы и методы.* Исследование проводится методом имитационного моделирования чувствительных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics и определения чувствительности преобразования и погрешности нелинейности каждого из них. *Результаты.* Определены геометрические параметры чувствительного элемента, рассчитана чувствительность преобразования и погрешность нелинейности выходного сигнала. *Выводы.* Профилированная мембрана с определенными геометрическими параметрами позволяет добиться улучшенных технических характеристик в сравнении с плоскими мембранами по критериям чувствительности преобразования и погрешности нелинейности выходного сигнала.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система, высота полета, полупроводниковый чувствительный элемент, погрешность нелинейности, чувствительность преобразования, профилированная мембрана

Для цитирования: Чувькин Б. В., Рыблова Е. А., Волков В. С., Трофимов А. А. Канал измерения давления на основе полупроводникового мембранного тензопреобразователя для информационно-управляющей системы БПЛА // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

PRESSURE MEASUREMENT CHANNEL BASED ON A SEMICONDUCTOR MEMBRANE STRAIN GAUGE FOR THE UAV INFORMATION AND CONTROL SYSTEM

B.V. Chuvykin¹, E.A. Ryblova², V.S. Volkov³, A.A. Trofimov⁴

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

² SKB JSC "Electromechanika", Penza, Russia

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² Elizaveta.ryblova@mail.ru, ³ vadimv_1978@mail.ru, ⁴ alex.t1978@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the use of unmanned aerial vehicles for solving problems in various branches of technology is considered. The features of constructing altimeters of various types are analyzed. The aim of the work is to improve the characteristics of barometric altimeters based on pressure sensors used in control systems of unmanned

vehicles used in UAVs. *Materials and methods.* The study is carried out by the method of simulation of sensitive elements in the COMSOL Multiphysics software package and determination of the sensitivity of the transformation and the linearity error of each of them. *Results.* The geometric parameters of the sensing element are determined, the sensitivity of the conversion and the linearity error of the output signal are calculated. *Conclusions.* A profiled membrane with certain geometric parameters allows you to achieve the best technical characteristics in comparison with flat membranes in terms of conversion sensitivity and linearity error of the output signal.

Keywords: unmanned aerial vehicle, information and control system, flight altitude, semiconductor sensing element, linearity error, conversion sensitivity, profiled membrane

For citation: Chuvykin B.V., Ryblova E.A., Volkov V.S., Trofimov A.A. Pressure measurement channel based on a semiconductor membrane strain gauge for the uav information and control system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

Введение

В настоящее время как за рубежом, так и в России стремительно развивается новое научно-техническое направление – беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в том числе малоразмерные БПЛА (МБПЛА) [1].

Одним из главных достоинств МБПЛА является независимость от взлетных полос и посадка на неподготовленную поверхность. Вместе с уменьшением взлетной массы БПЛА ужесточаются требования к информационно-измерительным системам по массе, габаритам, энергопотреблению и др. [1].

Распределение количества БПЛА по категориям показано на рис. 1 [2].

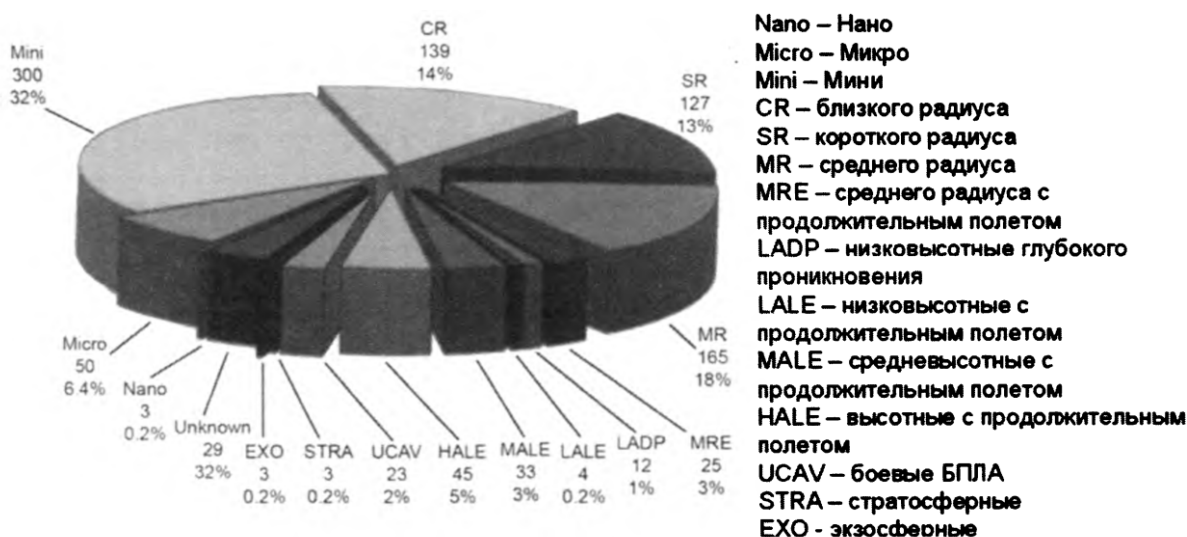


Рис. 1. Распределение количества БПЛА по категориям

Характеристики БПЛА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики БПЛА

Категория	Префикс	Дальность действия, км	Высота, м	Время полета, ч	Масса, кг	Используется в настоящее время
1	2	3	4	5	6	7
Тактические						
Нано	η	<1	100	<1	<0,025	Да
Микро	μ	<10	250	1	<5	Да
Мини	Mini	<10	150–300	<2	<30	Да
Ограниченной дальности	CR	10–30	3000	2–4	150	Да
Ближней дальности	SR	30–70	3000	3–6	200	Да
Средней дальности	MR	70–200	5000	6–10	1250	Да
Износостойчивые средней дальности	MRE	>500	8000	10–18	1250	Да

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Низковысотные глубокого проникновения	LADP	>250	50–9000	0,5–1	350	Да
Низковысотные особо износостойчивые	LALE	>500	3000	>24	<30	Да
Средневысотные особоизносостойчивые	MALE	>500	14000	24–48	1500	Да
Стратегические						
Высотные особо износостойчивые	HALE	>2000	20000	24–48	(4500) 12000	Да
Спецназначения						
Боевые	UCAV	1500	10000	2	10000	Да
Одноразовые	LETH	300	4000	3–4	250	Да
Ложные цели	DEC	0–500	5000	<4	250	Да
Стратосферные	STRATO	>2000	>20000 и <30000	>48	TBD	Нет

Из рис. 1 видно, что МБПЛА массой до нескольких килограммов составляют порядка 40 % от общего количества БПЛА всех категорий.

В гражданских целях МБПЛА могут решать следующие задачи: аэрофотосъемка; контроль экологической обстановки; контроль морского судоходства; океанология; обеспечение сельскохозяйственных работ и геологоразведки [1, 2].

В задачи, решаемые БПЛА в военных целях, входят: ведение разведывательных полетов; разведка и обнаружение малоразмерных целей; корректировка артиллерийского огня; радиотехническая разведка; поражение наземных целей в зонах с сильной ПВО.

Размеры МБПЛА накладывают серьезные ограничения на бортовую аппаратуру управления. Основные требования, предъявляемые к авионике МБПЛА: высокие точность, качество и производительность; малые размеры и простая схемотехника; низкое энергопотребление; высокие надежность и отказоустойчивость; низкая цена [1].

На рис. 2 представлен один из возможных вариантов функциональной схемы информационно-управляющей системы БПЛА [3].

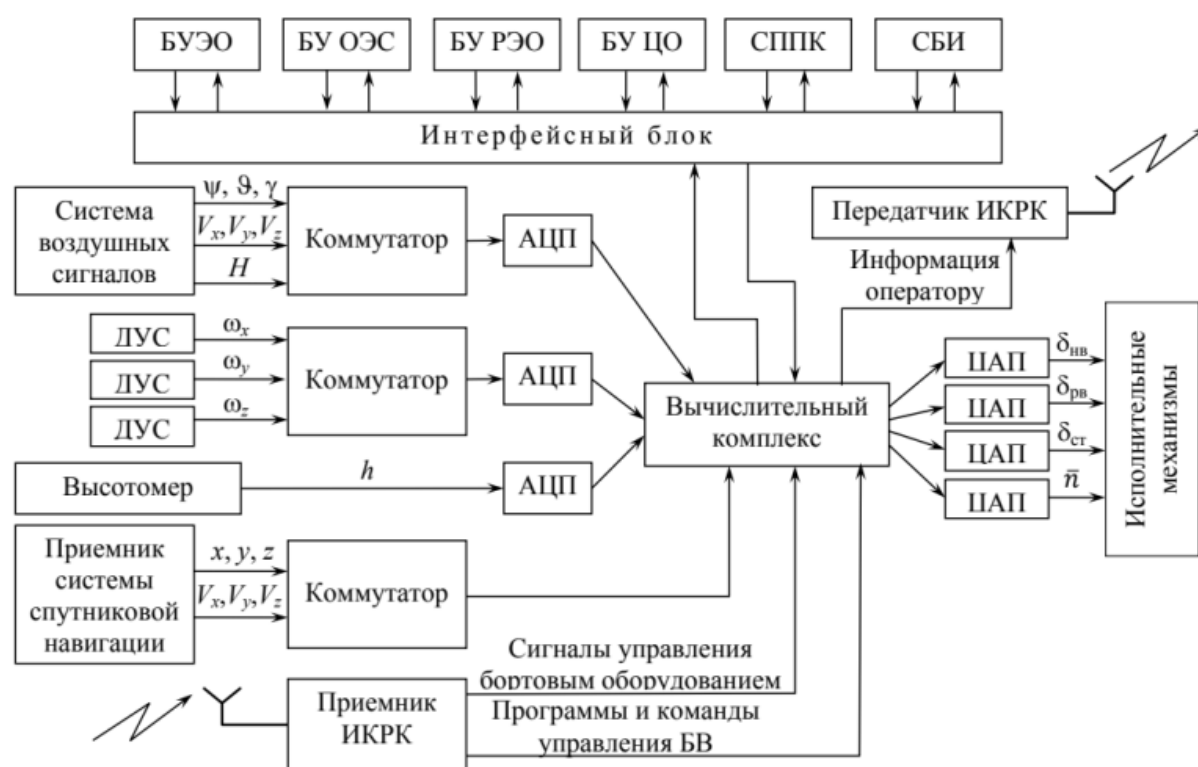


Рис. 2. Функциональная схема информационно-управляющей системы БПЛА

Здесь БУ ЭО, БУ ОЭС, БУ РЭО, БУ ЦО – блоки управления энергетическим, оптико- и радиоэлектронным, а также целевым оборудованием. Системы СБИ и СППК означают системы бортовых измерений и предполетного контроля. Вычислительный комплекс (ВК) реализует все алгоритмы управления полетом. Для получения необходимой информации используется набор соответствующих устройств:

- система воздушных сигналов (СВС);
- бесплатформенная инерциальная система (БИНС);
- датчики угловых скоростей (ДУС);
- высотомер;
- информационно-командный радиоканал (ИКРК);
- приемники сигналов системы спутниковой навигации;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) [3].

Проведенный анализ показывает, что одним из важнейших параметров, подлежащим измерению в полете, является высота [4]. Важнейшей частью канала измерения давления является высотомер, так как его параметры во многом определяют точность измерения высоты, что особенно актуально для БПЛА, функционирующих на малых и сверхмалых высотах, где точность должна составлять доли метра. Это позволяет БПЛА совершать автономные полеты без радара по цифровой карте высоты поверхности, находящейся в памяти блока управления, ориентируясь на показания высотомера, который откалиброван в момент старта по реперной точке высоты [4].

Современные барометрические высотомеры на основе датчиков абсолютного давления позволяют измерить высоту с точностью не хуже 1–2 м. [4]. Например, датчик абсолютного давления тензорезистивного типа компании BOSCH BMP 280 Digital Pressure sensor, который представляет собой кремниевую мембрану, выполненную с использованием МЭМС-технологии с расположенным на ее поверхности измерительным мостом из четырех кремневых тензорезисторов [5], имеет следующие параметры:

- диапазон давлений – 300...1100 гПа (экв. к +9000...–500 м выше/ниже уровня моря);
- абсолютная погрешность – $\pm 0,12$ гПа (± 1 м);
- температурный коэффициент смещения – 1,5 Па/К (12 см/К);
- диапазон температур – $-40 \dots +85$ °C.

Традиционные барометрические приборы, основанные на измерении абсолютного давления, имеют в своем составе мембранные anerоидные коробки, размеры которых составляют не менее нескольких сантиметров в диаметре, а также передаточный механизм достаточно больших размеров. Применение МЭМС-датчиков абсолютного давления позволяет использовать чувствительные элементы в виде кремниевых мембран размером до 5 мм, на которых сформирована тензосхема из полупроводниковых тензорезисторов, преобразующая деформацию мембраны в электрический сигнал [6].

Для повышения точности измерения высоты необходимо вносить поправку в выходной сигнал, вызванную влиянием температуры окружающего воздуха на высоте полета БПЛА. Это можно сделать, используя в качестве датчика температуры полупроводниковый терморезистор, размещенный на чувствительном элементе МЭМС-датчика в зоне, свободной от деформации мембраны. Такое техническое решение позволит отслеживать колебание температуры в реальном времени, при этом терморезистор так же, как и тензорезисторы, может быть изготовлен интегральным способом в едином технологическом цикле, что не приведет к существенному увеличению себестоимости чувствительного элемента, а применение групповой микромеханической технологии изготовления позволит получить высокую воспроизводимость его метрологических характеристик. Это делает конструкцию барометрического высотомера на основе полупроводникового чувствительного элемента датчика абсолютного давления максимально пригодной к изготовлению в условиях серийного и массового производства.

Для снижения энергопотребления с целью увеличения дальности полета БПЛА необходимо увеличивать чувствительность мембран датчиков давления. Наиболее распространенные круглые и квадратные мембраны постоянной толщины при увеличении чувствительности за счет уменьшения толщины характеризуются значительной погрешностью нелинейности. По этой причине перспективным направлением совершенствования чувствительных элементов датчиков давления является использование профилированных мембран с сечением сложной геометрической формы [7].

Цель работы – определение геометрических параметров ЧЭ с повышенной чувствительностью преобразования и сниженной погрешностью нелинейности для канала измерения давления информационно-управляющих систем БПЛА.

Материалы и методы

Для определения наилучших размеров сечения ЧЭ, при которых будет наблюдаться максимальное значение выходного сигнала и минимальная погрешность нелинейности, было выполнено имитационное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Результаты

Преимуществами конструкции прототипа, используемого в данной работе, являются повышенная чувствительность и низкая погрешность нелинейности выходного сигнала [8, 9].

Однако данная мембрана имеет практически такую же чувствительность 1170 отн. ед., что и плоская мембрана такого же диаметра 1,5 мм и толщиной 30 мкм – 1129 отн. ед. Поэтому было принято решение исследовать конструкцию профилированной мембраны с целью повышения чувствительности, так как во многих случаях чувствительность является одной из основных технических характеристик.

Для исследования были предложены четыре интегральных преобразователя с мембранами различной конструкции. На рис. 3–6 ниже представлены эскизы исследуемых ЧЭ, причем показана половина сечения каждой из мембран (мембрана 1 – это мембрана, описанная в прототипе [8], мембраны 2–4 были спроектированы на основе мембраны 1).

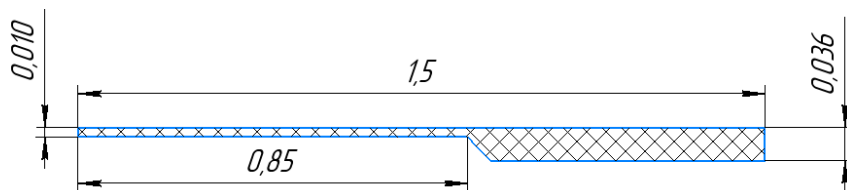


Рис. 3. Профилированная мембрана (мембрана 1)

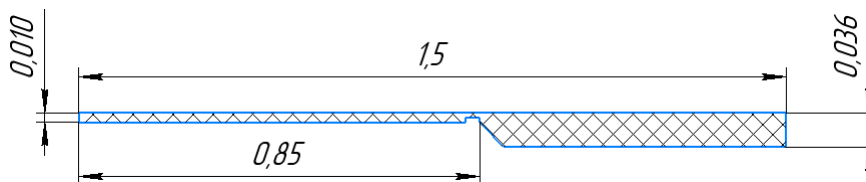


Рис. 4. Профилированная мембрана с выемкой в области ступеньки (мембрана 2)

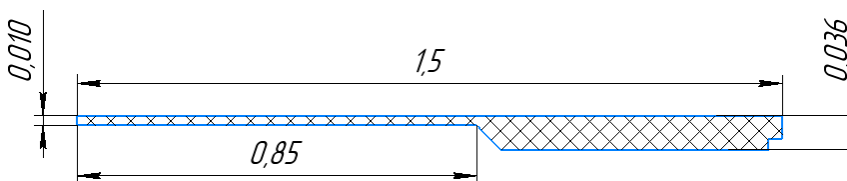


Рис. 5. Профилированная мембрана с выемкой в области жесткой заделки (мембрана 3)

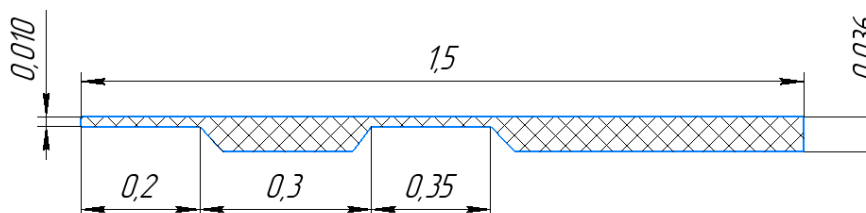


Рис. 6. Профилированная мембрана с двумя жесткими центрами (мембрана 4)

На каждую из мембран подавалось давление 0,2 МПа и было смоделировано деформированное состояние. Для определения, выдержит ли каждая из мембран заданную нагрузку, были построены графики распределения напряжения по Мизесу. Максимальное значение напряжения

по Мизесу для мембраны 1 составило 320 МПа, для мембраны 2 – 255 МПа, для мембраны 3 – 370 МПа и для мембраны 4 – 32 МПа.

Таким образом, напряжение по Мизесу каждой из мембран не превышает 400 МПа (допускаемого напряжения для кремния).

Для определения чувствительности каждой из мембран были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления (рис. 7–10).

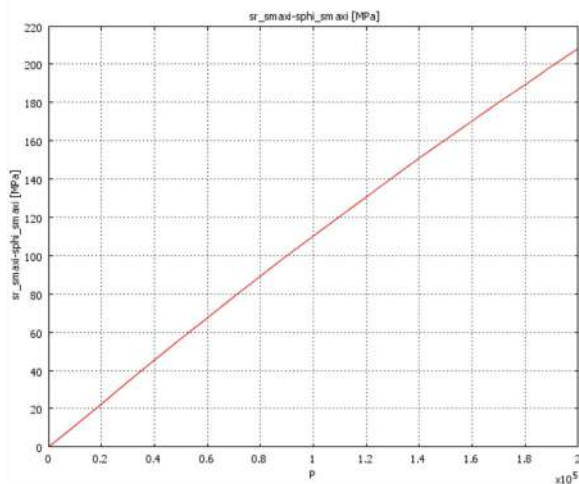


Рис. 7. Зависимость разности σ_r и σ_φ от P (мембрана 1)

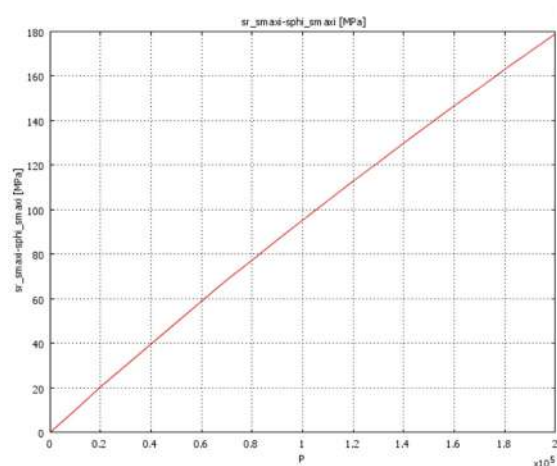


Рис. 8. Зависимость разности σ_r и σ_φ от P (мембрана 2)

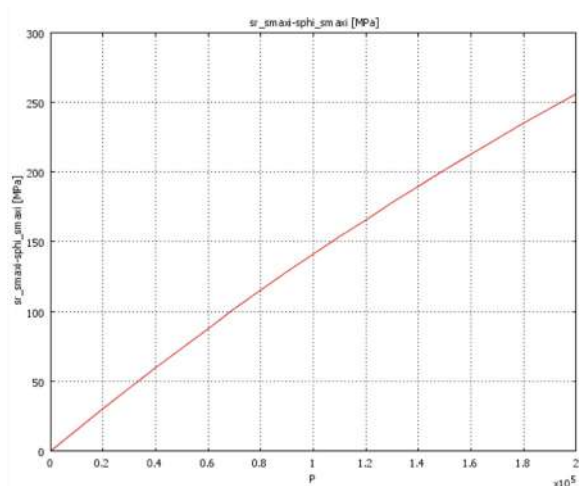


Рис. 9. Зависимость разности σ_r и σ_φ от P (мембрана 3)

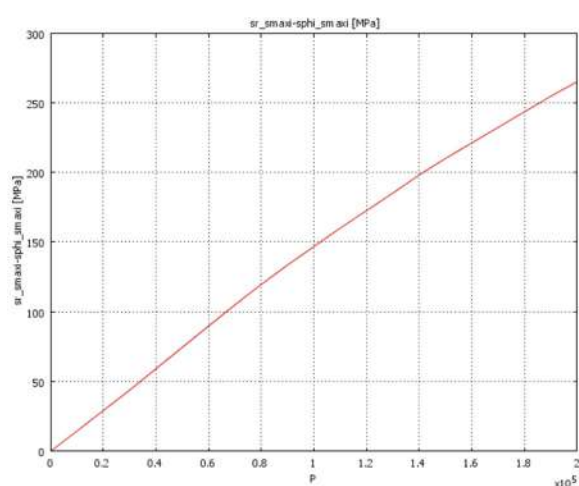


Рис. 10. Зависимость разности σ_r и σ_φ от P (мембрана 4)

Мембрана 3, которая имеет концентратор напряжений в области жесткой заделки, и мембрана 4, которая имеет два жестких центра, обладают наибольшей чувствительностью. Однако жесткие центры мембраны 4 могут вести себя подобно инерционной массе. Для дальнейшего исследования выбрана мембрана 3 с выемкой, прилегающей к области жесткой заделки.

Сведения о чувствительности каждой из мембран сведены в табл. 2

Таблица 2

Номер мембраны	Чувствительность
1	1170
2	892
3	1275
4	1305

Для определения геометрических характеристик сечения мембраны 3, обеспечивающих наибольшую чувствительность преобразования, изменялась глубина концентратора напряжений от 2 до 10 мкм с шагом 2 мкм, при этом ширина выемки (концентратора напряжений)

оставалась неизменной и равной 20 мкм. Для каждого случая была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления (0,2 МПа). Кроме того, была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от глубины концентратора напряжений (рис. 11).

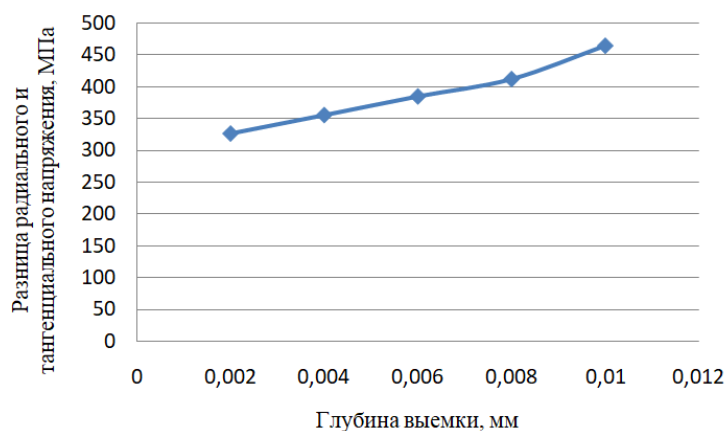


Рис. 11. Зависимость разности σ_r и σ_t от глубины выемки (концентратора напряжений)

Для каждого случая было рассчитано значение чувствительности, данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость чувствительности тензопреобразователя
от глубины выемки (концентратора напряжений)

Глубина выемки, мм	Чувствительность
0,002	1626
0,004	1772
0,006	1919
0,008	2043
0,01	2318

Из полученных значений видно, что наилучшая чувствительность соответствует мембране с глубиной выемки (концентратора напряжений) 10 мкм и составляет 2318. Для определения соответствия предложенной конструкции критерию прочности был построен график распределения напряжения по Мизесу (рис. 12).

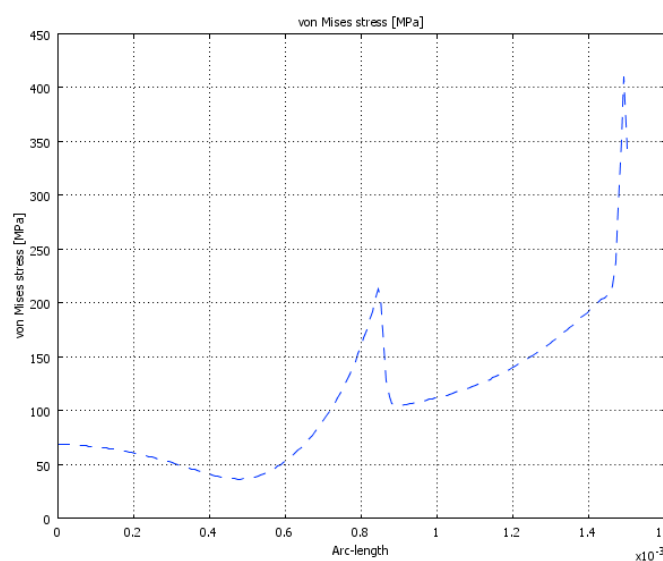


Рис. 12. Распределение напряжения по Мизесу для мембраны 3 с выемкой глубиной 10 мкм

Из графика, представленного на рис. 12, видно, что напряжение по Мизесу превышает 400 МПа, следовательно, такую конструкцию применять нельзя. Поэтому был построен график распределения напряжения по Мизесу для мембраны 3 с глубиной выемки 8 мкм (рис. 13).

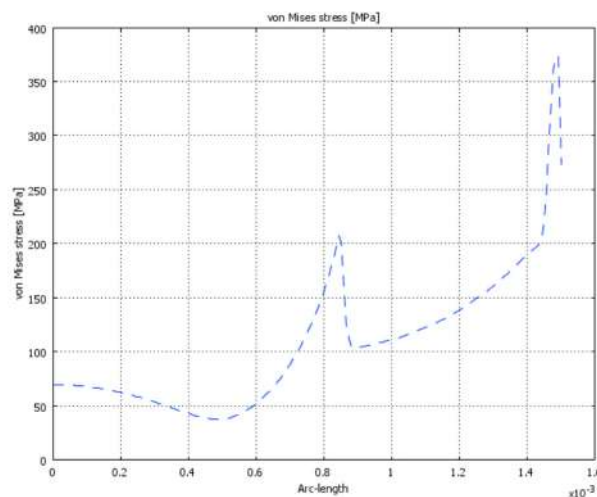


Рис. 13. Распределение напряжения по Мизесу для мембраны 3 с выемкой глубиной 8 мкм

Из данного графика видно, что напряжение по Мизесу не превышает 400 МПа, т.е. мембрана 3 выдержит приложенное давление 0,2 МПа без разрушения. Чувствительность преобразования мембраны 3 с глубиной выемки 8 мкм составляет 2043 отн. ед., при этом погрешность нелинейности выходного сигнала равна 2,44 %, что на 1 % выше, чем у мембраны 1, однако чувствительность значительно выше, практически в 2 раза, так как у мембраны 1 чувствительность составляет 1170 отн. ед.

Для определения наименьшей погрешности нелинейности выходного сигнала изменялась ширина выемки (концентратора напряжений) от 10 до 90 мкм, с шагом 10 мкм, при этом глубина выемки оставалась неизменной 8 мкм, для каждого случая рассчитывалась чувствительность преобразования и погрешность нелинейности выходного сигнала. Полученные данные сведены в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость характеристик тензопреобразователя от ширины выемки

Ширина выемки	Чувствительность	Погрешность нелинейности
0,1	2113	2,32
0,2	2043	2,44
0,3	1999	2,56
0,4	1897	2,68
0,5	1891	2,81
0,6	1804	2,93
0,7	1782	3,05
0,8	1763	3,15
0,9	1721	3,25

На основе полученных данных были построены зависимости чувствительности преобразования от ширины выемки (рис. 14) и погрешности нелинейности от ширины выемки (рис. 15).

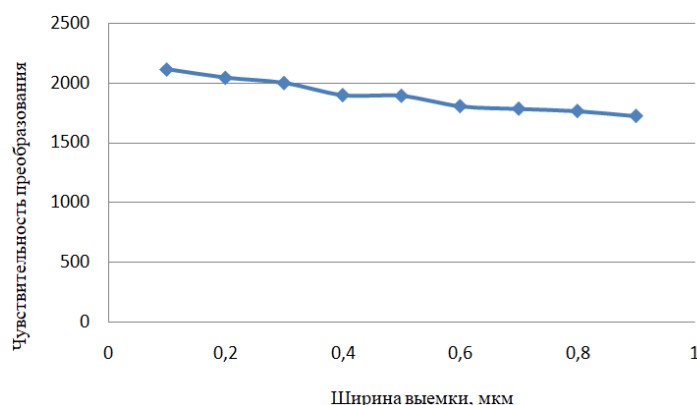


Рис. 14. Зависимость чувствительности преобразования от ширины выемки (концентратора напряжений)



Рис. 15. Зависимость погрешности нелинейности от ширины выемки (концентратора напряжений)

Таким образом, из рис. 14 и 15 видно, что наилучшее соотношение чувствительности и погрешности нелинейности соответствует мембране с выемкой глубиной 8 мкм и шириной 10 мкм. При такой конструкции максимальная чувствительность 2113 и погрешность нелинейности 2,32 %

Таблица 5

Сравнение мембран различного типа

Тип мембраны	Погрешность нелинейности	Чувствительность
Профилированная (мембрана 1)	1,46 %	1170,1
Профилированная с выемкой (мембрана 3)	2,32 %	2113

Из данных табл. 5 видно, что наилучшая чувствительность соответствует профилированной мембране с выемкой (мембрана 3), однако погрешность нелинейности выходного сигнала выше, чем у профилированной мембраны (мембрана 1).

Следует отметить, что все расчеты погрешности нелинейности делались для максимального давления 0,2 МПа. Современные БПЛА летают в основном на относительно небольшой высоте, поэтому целесообразно исследовать характеристики мембран при заданных геометрических размерах и давлении, соответствующем 1 атмосфере (0,1 МПа). Поэтому была рассчитана погрешность нелинейности мембраны 3, при подаваемом на нее давлении 0,1 МПа, при различной ширине выемки (от 10 до 90 мкм, с шагом 10 мкм, при этом глубина выемки оставалась неизменной 8 мкм), полученные данные представлены на рис. 16.

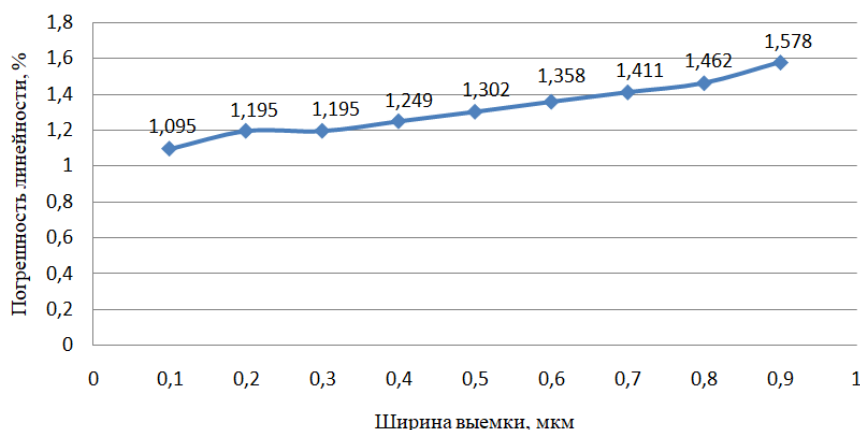


Рис. 16. Зависимость погрешности нелинейности от ширины выемки

Таким образом, из графика видно, что наименьшая погрешность нелинейности выходного сигнала соответствует ширине выемки 10 мкм и составляет 1,1 %, а максимальная погрешность нелинейности выходного сигнала соответствует ширине выемки 90 мкм и составляет 1,58 % [7].

Для сравнения была рассчитана чувствительность и погрешность нелинейности выходного сигнала мембраны 1, данные сведены в табл. 6

Таблица 6

Сравнение профилированных мембран с плоской мембраной

Тип мембраны	Чувствительность	Погрешность нелинейности, %
Мембрана 1	1120	1,46
Мембрана 4	1480	1,09
Плоская мембрана	1118	2,88

Результаты моделирования показывают, что при погрешности нелинейности, равной фактически 1 %, чувствительность предложенной конструкции (мембраны 4) превышает чувствительность обычной плоской мембраны более чем на 30 %, а погрешность нелинейности мембраны 4 на 34 % ниже, чем у мембраны 1, и более чем в 2 раза меньше, чем у плоской мембраны аналогичного диаметра.

Заключение

Из полученных данных табл. 6 видно, что мембрана 4 превосходит мембрану 1 и плоскую мембрану по критериям чувствительности и линейности. При использовании преобразователя давления в конструкции барометрического высотомера БПЛА предложенной конструкции (мембрана 4) можно добиться снижения энергопотребления, так как выходной сигнал тензомоста, сформированного на мембране, пропорционален напряжению питания. Следовательно, повышение чувствительности на 30 % означает возможность пропорционального снижения напряжения питания тензомоста и тем самым увеличения автономности полета БПЛА за счет снижения энергопотребления датчиковой аппаратуры.

Список литературы

1. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В. Я. Распопова. М. : Машиностроение, 2011. 184 с.
2. UAS. The Global Perspective 2008/2009. URL: <http://www.uvs-info.com/>
3. Моисеев В. С. Комплексы бортового оборудования перспективных беспилотных вертолетов. Казань : Ред.-изд. центр «Школа», 2021. 248 с.
4. Искендеров И. А., Мурад Р. Г. Особенности современных барометрических датчиков и возможности их применения на летательных аппаратах // International Scientific and Practical Conference World science. 2016. Т. 1, № 5 (9). С. 55–59.
5. BOSCH sensortec, BMP280 "Digital Pressure Sensor" datasheet, BST-BMP280-DS001-11. 2015. 50 p.
6. Искандеров И. А., Гюндюз М. Р. Особенности современных барометрических датчиков и возможности их применения на летательных аппаратах // World Science. 2016. Vol. 1, № 5 (9).
7. Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 39–46.
8. Пат. RU 2732839 C1. Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной точностью и чувствительностью / Волков В. С., Рыблова Е. А. № 2019121377 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 23.09.2020.
9. Пат. RU 224032 U1. Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной чувствительностью / В. С. Волков, Е. А. Рыблова. № 2023132858 ; заявл. 06.12.2023 ; опубл. 13.03.2024.

References

1. Raspopov V.Ya. (ed.). *Mikrosistemy orientatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov = Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles*. Moscow: Mashinostroenie, 2011:184. (In Russ.)
2. UAS. *The Global Perspective 2008/2009*. Available at: <http://www.uvs-info.com/>
3. Moiseev V.S. *Kompleksy bortovogo oborudovaniya perspektivnykh bespilotnykh vertoletov = Avionics complexes for advanced unmanned helicopters*. Kazan': Red.-izd. tsentr «Shkola», 2021:248. (In Russ.)
4. Iskenderov I.A., Murad R.G. Features of modern barometric sensors and the possibility of their use on aircraft. *International Scientific and Practical Conference World science*. 2016;1(5):55–59. (In Russ.)
5. BOSCH sensortec, BMP280 "Digital Pressure Sensor" datasheet, BST-BMP280-DS001-11. 2015:50.
6. Iskanderov I.A., Gyundyuz M.R. Features of modern barometric sensors and their application on aircraft. *World Science*. 2016;1(5). (In Russ.)
7. Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of parameters of a semiconductor sensing element in the form of a circular membrane in order to increase sensitivity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):39–46. (In Russ.)

8. Patent RU 2732839 C1. *Poluprovodnikovyy preobrazovatel' davleniya s povyshennoy tochnost'yu i chuvstvitel'nost'yu* = *Semiconductor pressure converter with increased accuracy and sensitivity*. V.S. Volkov, E.A. Ryblova. № 2019121377; appl. 09.07.2019; publ. 23.09.2020. (In Russ.)
9. Patent RU 224032 U1. *Poluprovodnikovyy preobrazovatel' davleniya s povyshennoy chuvstvitel'nost'yu* = *Semiconductor pressure transducer with increased sensitivity*. V.S. Volkov, E.A. Ryblova. № 2023132858; appl. 06.12.2023; publ. 13.03.2024. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Викторович Чувькин

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvukin_bv@mail.ru

Boris V. Chuvykin

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

Елизавета Анатольевна Рыблова

инженер-конструктор,
СКБ АО «Электромеханика»
(Россия, г. Пенза, ул. Гоголя, 51/53)
E-mail: Elizaveta.ryblova@mail.ru

Elizaveta A. Ryblova

Design engineer,
SKB JSC "Electromechanika"
(51/53 Gogol street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков

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

Vadim S. Volkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor 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 04.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025

Принята к публикации / Accepted 21.04.2025

ЦИФРОЧАСТОТНЫЕ УМНОЖИТЕЛИ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В. Ю. Трофимов¹, Л. Е. Шахмейстер²

^{1,2} Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ"
имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

¹v.y.trofimov@onegroup.ru, ²l.e.shahmeister@onegroup.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение быстродействия дистанционно управляемой бортовой аппаратуры автономных информационных и измерительных систем при вводе в нее данных полетного задания требует использования тактовой частоты, значительно большей необходимой при автономной работе аппаратуры, выбираемой, исходя из минимального тока ее потребления. Задача по устранению этого противоречия, усложненная необходимостью наличия информации о точном соотношении используемых частот, является актуальной. *Материалы и методы.* Решение указанной задачи может быть осуществлено использованием цифрочастотных умножителей частоты. *Результаты.* Рассмотрены варианты построения умножителей частоты. Показано, что известные варианты построения умножителей не могут в полной мере удовлетворить необходимым требованиям. Умножители с использованием генератора пачек импульсов имеют большую неравномерность выходных импульсов, а умножители с использованием автоматической подстройки частоты не имеют мгновенного выхода на режим, причем у умножителей с автоподстройкой и частотным детектором на микросхеме 512ПС8ВК длительность переходных процессов может превышать несколько десятков секунд. Предложен комбинированный способ умножения частоты. *Вывод.* Показано, что комбинированный способ умножения частоты на основе генерации пачек импульсов и автоматической подстройки с фазовым детектированием сочетает положительные качества генерации пачек импульсов в части мгновенности выхода на режим и малую неравномерность выходных импульсов автоподстройки.

Ключевые слова: цифрочастотные умножители частоты, автоматическая подстройка частоты, автономные информационные и измерительные системы, микросхема 512ПС8ВК

Для цитирования: Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Цифрочастотные умножители в автономных информационных и измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 16–24. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-2

DIGITAL FREQUENCY MULTIPLIERS IN AUTONOMOUS INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

V.Yu. Trofimov¹, L.E. Shakhmeister²

^{1,2} Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

¹v.y.trofimov@onegroup.ru, ²l.e.shahmeister@onegroup.ru

Abstract. *Background.* Increasing the performance of remotely controlled on-board equipment of autonomous information and measurement systems when entering flight task data into it requires the use of a clock frequency significantly higher than that required for autonomous operation of equipment selected based on the minimum current consumption. The task to eliminate this contradiction, complicated by the need to have information about the exact ratio of the used frequencies, is urgent. *Materials and methods.* The solution of the above problem can be realized by using digital frequency multipliers. *Results.* The variants of frequency multipliers construction are considered. It is shown that the known variants of multipliers construction cannot fully satisfy the necessary requirements. Multipliers using a pulse pack generator have a large unevenness of the output pulses, and multipliers using automatic frequency adjustment do not have instantaneous mode output, moreover, multipliers with automatic tuning and a frequency detector on a 512PS8VC chip can have a duration of transients exceeding several tens of seconds. A combined method of frequency multiplication is proposed. *Conclusions.* It is shown that the combined method of frequency multiplication based on generation of pulse packs and auto-tuning with phase detection combines positive qualities of pulse packs generation in the part of instantaneous output to the mode and small non-uniformity of output pulses of auto-tuning.

Keywords: digital frequency multiplier, automatic frequency adjustment, autonomous information and measurement systems, 512PS8VK chip

For citation: Trofimov V.Yu., Shakhmeister L.E. Digital frequency multipliers in autonomous information and measurement systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2): 16–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-2

В дистанционно управляемой бортовой аппаратуре автономных информационных и измерительных систем (АИИС) обработка информации осуществляется с использованием тактового генератора. В процессе подготовки к работе бортовая аппаратура принимает от наземной аппаратуры данные, содержащие программу работы (вид действия) и значения требуемых параметров (времени дальнего взведения, дистанционного действия, замедления, параметры коррекции и пр.). Часть параметров вводится времяимпульсными методами [1], требующими высокоточного времяимпульсного преобразования временных интервалов в цифровой код. Отводимое время для ввода параметров для ряда задач не должно превышать единиц миллисекунд. Сокращение времени ввода данных и обеспечение высокоточного времяимпульсного преобразования достигается использованием тактового генератора повышенной частоты, лежащей от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц. При автономной работе и реализации программы, заложенной в бортовую аппаратуру, обеспечение малого тока потребления требует снижения частоты тактового генератора до нескольких десятков килогерц. Таким образом, возникает противоречие в выборе значения тактовой частоты генератора. Ввод данных требует повышения частоты генератора, а реализация записанной в аппаратуру программы – ее понижения. Задача обеспечения тактирования бортовой аппаратуры различными частотами усложняется спецификой использования в АИИС времяимпульсного преобразования [1], связанной с необходимостью иметь информацию о точном соотношении применяемых частот.

Решение задачи может быть осуществлено применением цифрочастотного умножителя частоты, осуществляющего умножение своей входной частоты $f_{\text{вх}}$, используемой при автономной реализации заложенной в бортовую аппаратуру программы, на постоянный коэффициент K с получением выходной частоты $f_{\text{вых}}$, используемой при приеме бортовой аппаратурой данных от внешней по отношению к ней аппаратуры.

Для цифрочастотного умножения используются: двоичные умножители [2], генераторы пачек импульсов, генераторы пилообразного напряжения (ГПН) [3], схемы с автоматической подстройкой частоты (АПЧ) [4–7].

Двоичный умножитель строится на основе двоичного счетчика импульсов, на вход которого подается входная частота $f_{\text{вх}}$. На выходе счетчика формируются частоты, равные входной частоте, деленной на 2, 4, 8... Выходная частота формируется как сумма отдельных выходных частот счетчика. Суммируемые частоты определяются подаваемым на схему двоичным кодом. Коэффициент умножения K двоичного умножителя равен

$$K = \frac{k}{2^n}, \quad k = \sum_{i=1}^n k_i 2^{n-i},$$

где k – число, соответствующее двоичному коду, подаваемому на двоичный умножитель; n – разрядность подаваемого кода; i – номер разряда двоичного кода, $i = 1, 2, \dots, n$.

Отечественная промышленность выпускает микросхему (МС) 155ИЕ8 6-разрядного двоичного умножителя, аналог SN5497 [2].

Достоинством двоичного умножителя является простота, высокая точность, мгновенный выход на режим; недостатком – невозможность получения коэффициента умножения $K > 1$ и неравномерность выходных импульсов.

В АИИС двоичные умножители используются в блоках коррекции коэффициента преобразования частотных акселерометров 143Б1 и АЛЕ 055 [8].

Большой единицы коэффициент умножения K можно получить, используя схему с генератором пачек импульсов. В этом умножителе с приходом каждого импульса входной частоты $f_{\text{вх}}$ формируется пачка импульсов частотой $f_{\text{п}}$ (период $T_{\text{п}} = \frac{1}{f_{\text{п}}}$), число которых равно требуемому коэффициенту умножения K . Условия работы такой схемы:

$$f_{\text{п}} \geq K f_{\text{вх}}.$$

При невыполнении указанного условия происходит пропуск импульсов и работоспособность схемы нарушается.

Неравномерность $T_{\text{нер}}$ выходных импульсов схемы, под которой понимается максимальное отклонение периода выходных импульсов от номинального значения, равна

$$T_{\text{нер}} = T_{\text{вх}} - KT_{\text{п}}, \quad T_{\text{вх}} = \frac{1}{f_{\text{вх}}}.$$

При использовании выходной частоты умножителя для преобразования временных интервалов в код и отсутствии синхронизации начала преобразования с фазой поступления импульсов генератора пачки импульсов составляющая абсолютной погрешности Δ , обусловленная дискретностью преобразования, определяется выражением

$$\Delta = \pm T_n (1 - K\delta),$$

где δ – относительное отклонения периода T_n импульсов в пачке от требуемого значения

$$T_n = \frac{T_{\text{вх}}}{K}, \quad \delta \leq 0.$$

При $K=16$ и $\delta = -(1; 5; 10; 20) \%$ составляющая погрешности измерения $\Delta = (\pm 1,2; 1,8; 2,6; 4,2)T_n$. При отклонении δ периода T_n от требуемого значения на 1–5 % увеличение составляющей абсолютной погрешности может оказаться приемлемым, а на 10–20 % – нет.

Умножители входной частоты $f_{\text{вх}}$ с использованием ГПН [3] имеют в своем составе делители напряжения питания, число которых равно требуемому коэффициенту умножения K .

Коэффициенты деления этих делителей напряжения равны $\frac{K}{1, 2, 3, \dots K}$. Выходные импульсы частотой $f_{\text{вых}}$ формируются при равенстве пилообразного напряжения выходным напряжениям делителей. Неравномерность выходных импульсов определяется отклонением напряжения питания делителей от амплитуды пилообразного напряжения, напрямую зависящую от частоты входных импульсов.

Параметры схем с ГПН и генератором пачек импульсов идентичны, но схема с ГПН сложнее, в связи с чем область ее использования ограничена.

Наилучшими характеристиками обладают цифрочастотные умножители с АПЧ, структурная схема которых приведена на рис. 1.

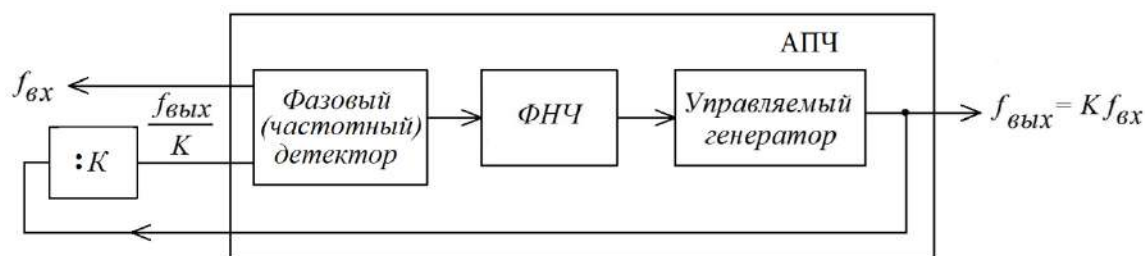


Рис. 1. Цифрочастотный умножитель частоты с АПЧ

Построение АПЧ (рис. 1) основано на выделении с помощью фазового или частотного детектора разности фазы или частот входного $f_{\text{вх}}$ и выходного сигнала частотой $f_{\text{вых}}$, деленной на коэффициент умножения K , с дальнейшим выделением фильтром низкой частоты (ФНЧ) составляющей, используемой управляемым генератором для формирования выходной частоты [4].

АПЧ с частотным детектированием сигналов может быть осуществлена на МС цифрочастотного и времяимпульсного преобразователя 512ПС8ВК [9]. В этой МС детектор частоты выполнен на схеме вычитания частот, управляемый генератор – на делителе частоты с управляемым кодом коэффициента деления частоты задающего генератора с внешними RC элементами, ФНЧ – на реверсивном счетчике импульсов. АПЧ на указанной МС показана на рис. 2.

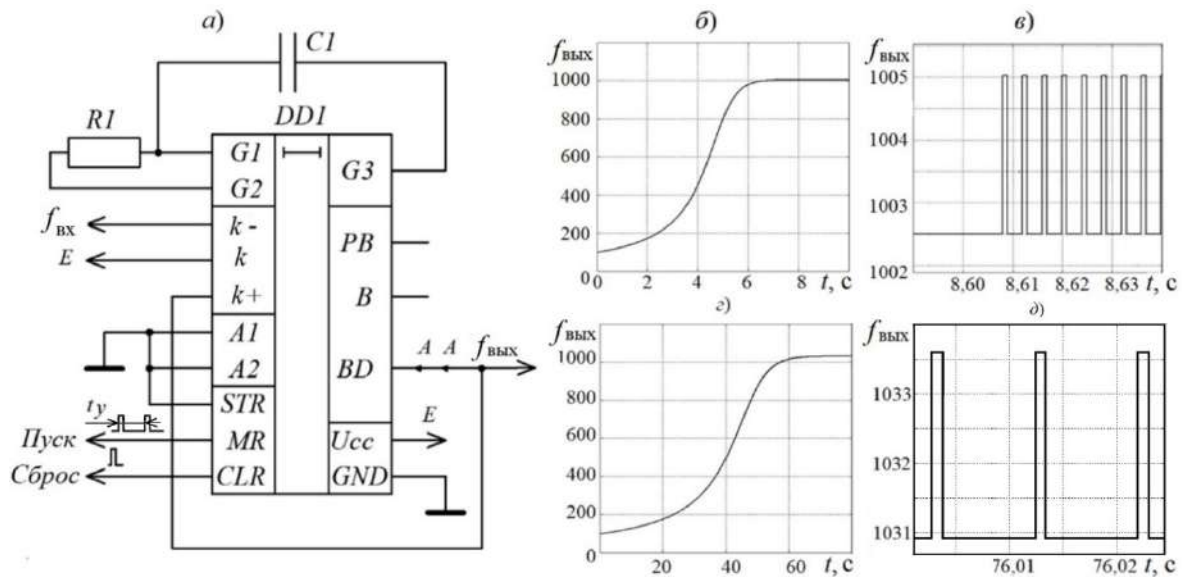


Рис. 2. АПЧ на МС 512РС8ВК:

а – схема; б–д – циклограммы выходных сигналов

После сброса на вывод MR МС (рис. 2,а) подаются два в данном случае пусковых импульса, временной интервал между которыми равен t_y . Для сокращения времени АПЧ этот временной интервал выбирается равным $t_y \approx \frac{1}{f_{\text{ВХ}}}$.

Состояние реверсивного счетчика импульсов МС определяется разностью частот $f_{\text{ВХ}}$ и $f_{\text{ВЫХ}}$ импульсов, поступающих соответственно на входы МС « $-k$ » и « $+k$ ».

Схема АПЧ рис. 2,а обеспечивает при подстройке частоты равенство выходной частоты входной, $f_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ВХ}}$.

Для реализации умножения частоты в разрыве точек A схемы включается дополнительный делитель частоты. Выходные параметры схемы АПЧ с детектором частоты определяются выражениями:

$$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{f_{\text{Г}}}{P_n}, \quad f_{\text{ВЫХ}0} = \frac{f_{\text{Г}}}{P_0}, \quad P_n = P_0 - \text{fix} \left(\sum_{i=0}^{n-1} P_i \frac{f_{\text{ВХ}}}{f_{\text{Г}}} \right) + \text{fix} \left(\frac{n}{K} \right), \quad t_n = \text{fix} \left(\frac{1}{f_{\text{Г}}} \sum_{i=0}^{n-1} P_i \right),$$

где P_0, P_i, P_n – коэффициенты деления частоты МС $DD1$, начальное, при формировании i -го и n -го импульсов выходной частоты соответственно; n – число импульсов выходной частоты $f_{\text{ВЫХ}}$ с начала АПЧ; $f_{\text{Г}}$ – частота задающего генератора с RC цепочкой $R1, C1$; K – коэффициент деления дополнительного делителя частоты, включаемого в разрыв точек A схемы рис. 2,а, равный при реализации операции умножения коэффициенту K умножения частоты; $\text{fix}(\dots)$ – целая часть числа; t_n – время, соответствующее приходу n -го выходного импульса, $f_{\text{ВЫХ}0}$ – начальное значение выходной частоты.

На рис. 2,б приведено изменение частоты $f_{\text{ВЫХ}}$ в процессе автоподстройки при $f_{\text{ВХ}} = (1000 + \pi) \approx 1003,14$, (π – число пи), $f_{\text{Г}} = 400$ кГц, $f_{\text{ВЫХ}0} \approx 100$ Гц.

Номинальное значение выходной частоты является дробным иррациональным числом. Обеспечить его целочисленным значением коэффициента деления не представляется возможным. В установившемся режиме, как это следует из рис. 2,в, выходная частота принимает два значения – $f_{\text{ВЫХ}} = 1002,5$ и $1005,0$ Гц. Отклонение среднего значения частоты от номинального за 100 импульсов выходной частоты не превышает $0,0013\%$. Отклонение мгновенного значения частоты от номинального не превышает $0,2\%$.

На рис. 2,г приведено изменение частоты $f_{\text{ВЫХ}}$ при включении в разрыв точек A рис. 2,а делителя частоты с коэффициентом деления $K = 10$. Для этого случая частота входного сигнала изменена и равна $f_{\text{ВХ}} = 100 + \pi \approx 103,14$ Гц.

Из графиков рис. 2,б,г видно, что для АПЧ без умножения частоты (рис. 2,б) время автоподстройки примерно 7 с, а для АПЧ с умножением частоты на 10 (рис. 2,г) это время увеличилось в 10 раз. По окончании АПЧ выходная частота имеет два разных значения в пределах $f_{\text{вых}} = (1030,9 \div 1033,6)$ Гц. Отклонение среднего значения частоты от номинального за 100 импульсов выходной частоты не превышает 0,0013 %. Максимальное отклонение мгновенного значения выходной частоты от номинального не превышает 0,2 %.

На рис. 3,б для $K = 1$, $f_{\Gamma} = 400$ кГц, $f_{\text{вых}0} \approx 800$ Гц приведено изменение частоты $f_{\text{вых}}$ при скачкообразном увеличении входной частоты (рис. 3,а) с $f_{\text{вх}} \approx 1003,14$ Гц на 100 Гц, а затем ее уменьшении на 200 Гц.

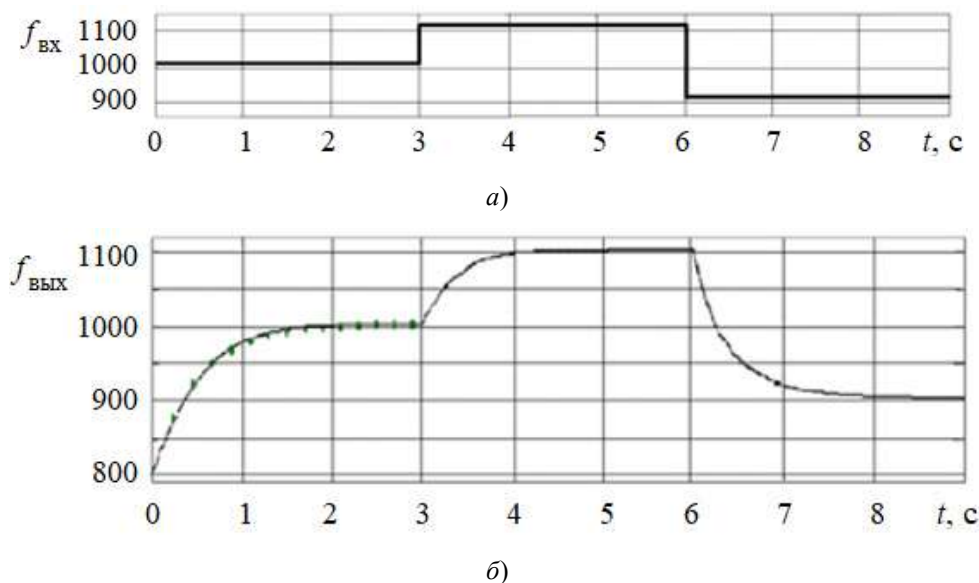


Рис. 3. Скачкообразное изменение входной частоты:
а – входная частота; б – выходная частота

При небольших отклонениях выходной частоты $f_{\text{вых}}$ от входной $f_{\text{вх}}$ переходной процесс $f_{\text{вых}}$ приближенно может быть описан зависимостью

$$f_{\text{вых}} = (f_{\text{н}} - f_{\text{вх}}) e^{-\frac{t}{\tau}} + f_{\text{вх}},$$

где t – текущее время; τ – постоянная времени.

График этого выражения на рис. 3,б отмечен точками и соответствует начальной частоте $f_{\text{вых}0} = 800$ Гц, входной частоте $f_{\text{вх}} \approx 1003,14$ Гц, $\tau = 0,5$ с.

Достоинствами использования схемы рис. 2 является высокая точность. Недостатком АПЧ с детектированием частот и формированием выходной частоты делением частоты тактового генератора на управляемый коэффициент является большая инерционность, приводящая к большому времени автоподстройки. В графиках на рис. 2,б,в и 3,б время автоподстройки составляет несколько секунд, а при использовании умножения частоты значительно увеличивается (см. рис. 2,г,д). Кроме того, недостатком использования таких АПЧ является необходимость тактового генератора с частотой $f_{\Gamma} \gg f_{\text{вых}}$.

Основной причиной большой инерционности рассматриваемого АПЧ является использование частотного детектора. Импульсы выходных сигналов частотного детектора появляются с частотой, равной разности подаваемых на него частот. Так, при разности частот 0,1 Гц период импульсов, по которым осуществляется коррекция, равен 10 с. Несколько импульсов коррекции требуют десятков секунд. Это позволяет использовать АПЧ с частотным детектированием в качестве фильтра инфранизких частот.

Значительно более высоким быстродействием обладают АПЧ с фазовым детектором. На рис. 4 приведена схема умножителя с такой АПЧ [6].

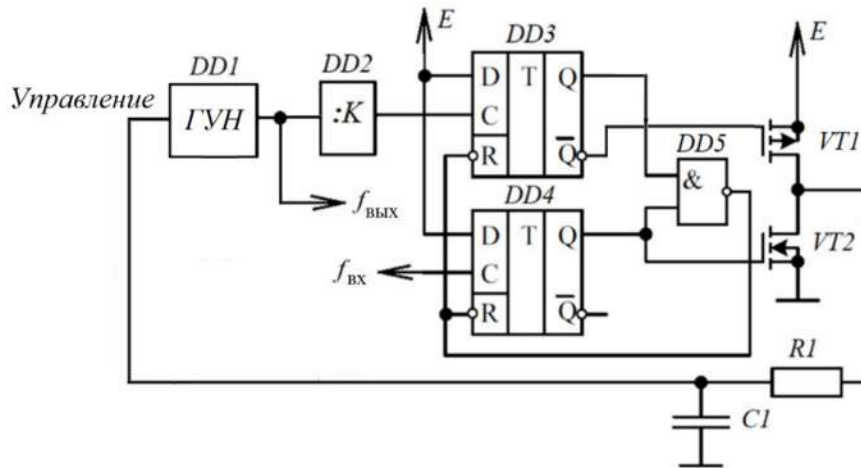


Рис. 4. Умножитель частоты с АПЧ и фазовым детектором

Фазовый детектор умножителя выполнен в виде фазового компаратора на D -триггерах $DD3$, $DD4$, логическом элементе 2ИНЕ $DD5$, МОП (металл-окисел-полупроводник) ключах на p -МОП транзисторе $VT1$ и n -МОП транзисторе $VT2$ с каналами p и n типа соответственно. ФНЧ выполнен на RC -цепочке $R1$, $C1$. Выходная частота умножителя $f_{\text{ВЫХ}}$ формируется генератором, управляемым напряжением (ГУН). С выхода ГУН через делитель частоты $DD2$ частота поступает на компаратор.

Сигнал на выходе фазового компаратора определяется разностью фаз, поступающих на его входы сигналов. Если первым на вход фазового компаратора приходит импульс выходной частоты $f_{\text{ВЫХ}}$, деленной элементом $DD2$ на коэффициент K , D -триггер $DD3$ переключается, транзисторный ключ $VT1$ открывается, напряжение на конденсаторе $C1$ увеличивается, частота ГУН $DD1$ уменьшается. Если первым приходит импульс частоты $f_{\text{ВХ}}$, то переключается D -триггер $DD4$, открывается транзисторный ключ $VT2$, напряжение на конденсаторе $C1$ уменьшается, частота ГУН повышается.

Схема умножителя частоты с фазовым детектором имеет высокую точность, малую неравномерность выходных импульсов и значительно меньшее время выхода на режим по сравнению со схемой умножителя с АПЧ и частотным детектором. Вместе с тем до окончания АПЧ число выходных импульсов частоты $f_{\text{ВЫХ}}$ не равно K импульсам за период импульсов входной частоты $f_{\text{ВХ}}$, что делает работу умножителя некорректной.

Устранить указанный недостаток можно предлагаемым комбинированным методом, использующим в начале измерения временного интервала генерацию пачек импульсов с мгновенным выходом на режим, с переходом на имеющую малую неравномерность выходных импульсов АПЧ, завершающую автоподстройку до окончания преобразовываемого временного интервала. Реализация указанного комбинированного метода приведена на рис. 5.

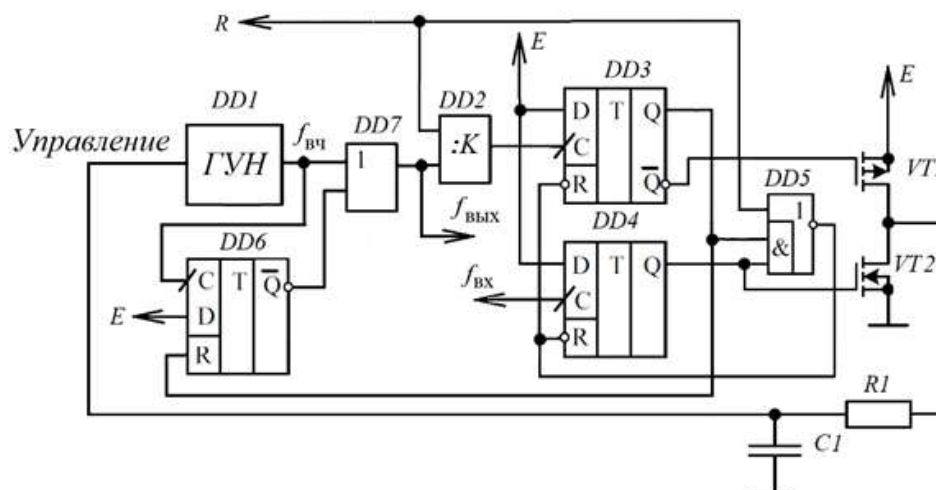


Рис. 5. Комбинированная схема умножителя частоты

В отличие от схемы рис. 4 в схему рис. 5 введены D -триггер $DD6$, логический элемент 2ИЛИ $DD7$. Вместо логического элемента 2И НЕ установлен логический элемент 2И ИЛИ НЕ $DD5$. До прихода импульса, длительность t_u которого подлежит преобразованию, присутствует сигнал сброса R . D -триггеры $DD3$, $DD4$ (рис. 5) находятся в исходном состоянии, транзисторные ключи $VT1$, $VT2$ закрыты, конденсатор $C1$ разряжен, делитель частоты $DD2$ заблокирован. D -триггер $DD6$ находится в состоянии, обеспечивающем прохождение импульсов ГУН частотой $f_{вч}$ на вывод $f_{вых}$. Частота ГУН $f_{вч} > Kf_{вх}$. Сигнал сброса R снимается одновременно с приходом импульса, длительность t_u которого подлежит преобразованию.

Циклограмма сигналов приведена на рис. 6.

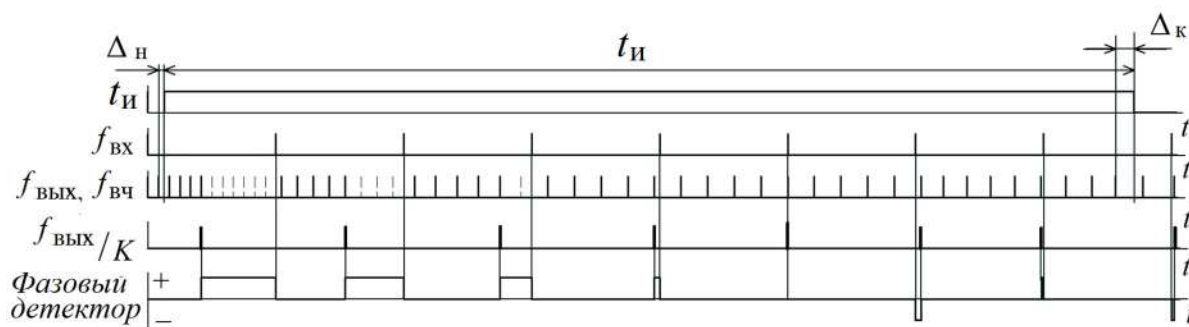


Рис. 6. Циклограмма сигналов комбинированного метода умножения

Снятие сигнала сброса снимает блокировку делителя частоты $DD2$. Отсчитав K импульсов, делитель частоты $DD3$ формирует импульс, переключающий D -триггер $DD3$ фазового детектора. D -триггер $DD6$ сбрасывается, прохождение импульсов генератора на вывод $f_{вых}$ логическим элементом $DD6$ блокируется. Транзисторный ключ $VT1$ открывается, конденсатор $C1$ заряжается, увеличивая напряжение на входе ГУН «Управление». Заряд конденсатора продолжается до момента появления импульса входной частоты $f_{вх}$, с приходом которого переключается D -триггер $DD4$. На выходе логического элемента $DD5$ появляется короткий импульс, устанавливающий D -триггеры $DD4$, $DD5$ фазового компаратора в исходное состояние. Оба транзисторных ключа $VT2$, $VT3$ закрываются. Изменение напряжения на конденсаторе $C2$ прекращается. Сигнал сброса с D -триггера $DD6$ снимается и импульсы ГУН вновь поступают на счетчик $DD2$. Если первым на фазовый детектор приходит импульс частоты $f_{вх}$, то на время, соответствующее разности фаз импульсов входной частоты и выхода делителя $DD2$, открывается транзисторный ключ $VT2$ и конденсатор $C1$ разряжается, увеличивая частоту ГУН. На рис. 6 пунктиром показаны импульсы на выходе при использовании схемы рис. 4. При этом видно, что число импульсов, проходящее на выход схемы умножения в течение периода следования входных импульсов, в схеме, использующей комбинированный метод умножения частоты, равно коэффициенту умножения K , а в схеме рис. 4 нет.

Поскольку в начале преобразования период следования импульсов ГУН меньше требуемого значения, максимальное значение составляющей погрешности Δ_n , обусловленной дискретностью преобразования, по абсолютной величине меньше случая использования схемы рис. 4:

$$\Delta_n < \left| -\frac{1}{Kf_{вх}} \right|.$$

К моменту окончания преобразуемого импульса в схеме рис. 5 АПЧ завершено и составляющая Δ_k , обусловленная дискретностью фиксации окончания преобразования длительности импульса так же, как в схеме рис. 4, равна

$$\Delta_k = \frac{1}{Kf_{вх}}.$$

Если к моменту окончания преобразования АПЧ закончится не полностью, то максимальное значение Δ_k незначительно будет отличаться от записанного, но работоспособность схемы сохранится.

Таким образом, комбинированная схема умножения частоты позволяет начинать преобразование временного интервала в код до окончания АПЧ без внесения дополнительной погрешности дискретизации.

Заключение

Выбор тактовой частоты обработки информации дистанционно управляемых изделий АИИС наталкивается на противоречие, связанное с необходимостью для сокращения времени ввода в изделие данных программы его работы иметь высокую тактовую частоту, значительно превышающую необходимую для уменьшения тока потребления при отработке изделием заложенной в него программы. Указанное противоречие может быть устранено использованием цифрочастотных умножителей частоты.

Известные методы умножения частоты не решают указанную задачу. Использование двоячного умножителя не позволяет получать коэффициент умножения, больший 1. Умножение частоты с использованием генераторов пачки импульсов или пилообразного напряжения имеет большую неравномерность выходных импульсов. Умножение частоты на основе АПЧ требует времени для выхода на режим.

Применение для АПЧ микросхемы цифрочастотного преобразования 512ПС8ВК с частотным детектором позволяет обеспечить высокоточное умножение частоты, но имеет большое время автоподстройки, в ряде случаев достигающее нескольких десятков секунд.

Использование фазового детектирования позволяет сократить это время до единиц миллисекунд, но возможность исключить его полностью, необходимая для времяимпульсного преобразования, отсутствует.

Решение задачи цифрочастотного умножения может быть осуществлено предлагаемым комбинированным методом, одновременным использованием генератора пачек импульсов с мгновенным выходом на режим и АПЧ, позволяющей иметь малую неравномерность выходных импульсов.

Список литературы

1. Захаров А. В., Либкинд И. В., Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Времяимпульсные преобразователи в автономных информационных и измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 59–69.
2. Synchronous 6-Bit Binary Rate Multipliers datasheet. Texas Instruments Incorporated SN5497, SN779713. URL: <https://radio-hobby.org/uploads/datasheet/35/sn54/sn5497.pdf> (дата обращения: 15.05.2024).
3. Шустов М. А. Целочисленно-варьируемый умножитель частоты цифровых сигналов. Томск, 2022. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=653347> (дата обращения: 15.05.2024).
4. Хоровитц П. Основы теории синтезаторов частоты / Гарвардский университет, корпорация морских данных. Ньютон, Массачусетс, 1922. URL: <http://rfanat.qrz.ru/sint/sy-te.html?ysclid=1w8s2nldbz199053098> (дата обращения: 16.05.2024).
5. Фазовая автоподстройка. Области использования ФАПЧ – Elektrolife. URL: <https://elektrolife.ru/teoriya/fazovaya-avtopodstrojka/?ysclid=1wam87q8pw134426959> (дата обращения: 10.05.2024).
6. Микушин А. В., Сажнев А. М. Цифровые устройства и микропроцессоры : учеб. пособие. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 832 с.
7. Михалев П. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе // Компоненты и технологии. 2006. № 4. URL: https://ecworld.ru/media/bip/pdfs/mikhalev_ct406.pdf (дата обращения: 10.09.2024).
8. Папко А. А., Кирянина И. В., Комбарова И. В. Об исследовании повторяемости и воспроизводимости метрологических характеристик прецизионных акселерометров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1. С. 21–24.
9. Микросхемы интегральные 512ПС8ВК. Технические условия ЛСАР.431239.001ТУ. ЕКПС 5962.2021. АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод. 2021. 62 с.

References

1. Zakharov A.V., Libkind I.V., Trofimov V.Yu., Shakhmeyster L.E. Time-pulse converters in autonomous information and measurement systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):59–69. (In Russ.)
2. Synchronous 6-Bit Binary Rate Multipliers datasheet. Texas Instruments Incorporated SN5497, SN779713. Available at: <https://radio-hobby.org/uploads/datasheet/35/sn54/sn5497.pdf> (accessed 15.05.2024).
3. Shustov M.A. *Tselochislennno-var'iruemyy umnozhitel' chastoty tsifrovyykh signalov = Integer-variable frequency multiplier of digital signals.* Tomsk, 2022. (In Russ.). Available at: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=653347> (accessed 15.05.2024).

4. Khorovits P. *Osnovy teorii sintezatorov chastoty / Garvardskiy universitet, korporatsiya morskikh dannykh = Fundamentals of the Theory of Frequency Synthesizers*. N'yuton, Massachusetts, 1922. (In Russ.). Available at: <http://rfanat.qrz.ru/sint/sy-te.html?ysclid=lw8s2nldbz199053098> (accessed 16.05.2024).
5. *Fazovaya avtopodstroyka. Oblasti ispol'zovaniya FAPCh – Elektrolife = Phase auto-tuning. Areas of use of PLL – Elektrolife*. (In Russ.). Available at: <https://elektrolife.ru/teoriya/fazovaja-avtopodstroyka/?ysclid=lwam87q8pw134426959> (accessed 10.05.2024).
6. Mikushin A.V., Sazhnev A.M. *Tsifrovye ustroystva i mikroprotessory: ucheb. posobie = Digital devices and microprocessors : a textbook*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010:832. (In Russ.)
7. Mikhalev P. LL microcircuits and synthesizers based on them. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*. 2006;(4). (In Russ.). Available at: https://ecworld.ru/media/bip/pdfs/mikhalev_ct406.pdf (accessed 10.09.2024).
8. Papko A.A., Kiryanina I.V., Kombarova I.V. On the study of repeatability and reproducibility of metrological characteristics of precision accelerometers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(1):21–24. (In Russ.)
9. *Mikroskhemy integral'nye 512PS8VK. Tekhnicheskie usloviya LSAR.431239.001TU. EKPS 5962.2021. AO «Voskhod» – Kaluzhskiy radiolampovyy zavod = Integrated circuits 512PS8VC. Technical specifications of LSAR.431239.001TU. ECPS 5962.2021. Voskhod JSC is the Kaluga Radio Tube Plant*. 2021:62. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вадим Юрьевич Трофимов

кандидат технических наук,
доцент кафедры автономных информационных
и вычислительных систем,
Балтийский государственный технический
университет "ВОЕНМЕХ" имени Д. Ф. Устинова
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. 1-я Красноармейская, 1)
E-mail: v.y.trofimov@onegroup.ru

Vadim Yu. Trofimov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of autonomous information and computing systems,
Baltic State Technical University "Voenmeh"
named after D.F. Ustinov
(1, 1st Krasnoarmeyskaya street,
Saint Petersburg, Russia)

Леонид Ефимович Шахмейстер

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автономных
информационных и вычислительных систем,
старший научный сотрудник,
Балтийский государственный технический
университет "ВОЕНМЕХ" имени Д. Ф. Устинова
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. 1-я Красноармейская, 1)
E-mail: l.e.shahmeister@onegroup.ru

Leonid E. Shakhmeister

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of autonomous information and computing systems,
senior researcher,
Baltic State Technical University "Voenmeh"
named after D.F. Ustinov
(1, 1st Krasnoarmeyskaya street,
Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 29.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 29.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.03.2025

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА

Е. И. Минаков¹, Н. И. Хазов²

^{1,2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ eminakov@bk.ru, ² nikita.hazov511@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Большинство людей регулярно сталкиваются с дорожными заторами, вызванными особенностями городской дорожной сети, увеличением трафика в часы пик, а также случайными факторами, такими как дорожно-транспортные происшествия. Целью данной работы является разработка метода определения координат и скорости транспортных средств для последующего создания алгоритмов управления транспортным потоком. *Материалы и методы.* Приведен краткий обзор систем, использующихся для определения местоположения объектов. Разработанный метод основывается на алгоритме опроса датчика GPS и обмене информационными сообщениями с сервером по протоколу TCP. *Результаты.* Разработан и реализован метод, который позволяет определять координаты и скорость транспортных средств с минимальными экономическими затратами, используя мобильные устройства участников дорожного движения. Показан разработанный алгоритм определения и передачи данных. Описаны основные этапы разработки специализированного программного обеспечения, включая сбор данных, их обработку и передачу на сервер. Приведены примеры собранных данных, подтверждающие работоспособность метода. *Выводы.* Результаты работы демонстрируют возможность использования разработанного метода для создания адаптивных информационно-измерительных и управляющих систем, направленных на оптимизацию транспортных потоков. Накопленные данные также могут быть использованы для обучения нейросетевых алгоритмов.

Ключевые слова: определение координат, определение скорости, навигационные системы, сотовый телефон

Для цитирования: Минаков Е. И., Хазов Н. И. Метод определения координат и скорости движущегося объекта с помощью мобильного телефона // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 25–31. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-3

A METHOD FOR DETERMINING THE COORDINATES AND SPEED OF A MOVING OBJECT USING A MOBILE PHONE

E.I. Minakov¹, N.I. Khazov²

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

¹ eminakov@bk.ru, ² nikita.hazov511@yandex.ru

Abstract. *Background.* Most people regularly encounter traffic jams caused by the peculiarities of the urban road network, increased traffic during rush hours, as well as accidental factors such as traffic accidents. The purpose of this work is to develop a method for determining the coordinates and speed of vehicles for the subsequent creation of traffic flow control algorithms. *Materials and methods.* A brief overview of the systems used to determine the location of objects is provided. The developed method is based on the GPS sensor polling algorithm and the exchange of information messages with the server over TCP protocol. *Results.* A method has been developed and implemented that allows determining the coordinates and speed of vehicles with minimal economic costs using mobile devices of road users. The developed algorithm for determining and transmitting data is shown. The main stages of specialized software development are described, including data collection, processing, and transmission to the server. Examples of the collected data confirming the operability of the method are given. *Conclusions.* The results of the work demonstrate the possibility of using the developed method to create adaptive information, measurement and control systems aimed at optimizing traffic flows. The accumulated data can also be used to train neural network algorithms.

Keywords: determination of coordinates, determination of speed, navigation systems, cell phone

For citation: Minakov E.I., Khazov N.I. A method for determining the coordinates and speed of a moving object using a mobile phone. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):25–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-3

Введение

Большинство людей используют личный или общественный транспорт и регулярно сталкиваются с дорожными заторами, вызванными различными факторами. К ним относятся особенности уличной дорожной сети, обусловленные исторической застройкой (например, узкие улицы или слияние нескольких крупных дорог в одну), а также значительное увеличение трафика в часы пик. Кроме того, заторы могут возникать из-за случайных событий, таких как дорожно-транспортные происшествия, дорожные работы или поломки транспортных средств.

Для устранения заторов, возникающих по различным причинам, применяются системы управления дорожным движением, известные как интеллектуальные транспортные системы (ИТС). Эти системы представляют собой информационно-измерительные и управляющие системы (ИИиУС) [1].

Любая ИИиУС включает в себя устройство сбора информации. Для разработки алгоритмов устранения дорожных заторов необходимы следующие исходные данные: координаты участников дорожного движения, скорость их перемещения, зафиксированные время и дата получения параметров, а также количество участников дорожного движения.

Материалы и методы

В данной работе рассматривается система сбора информации. Любое устройство такого типа функционирует на основе определенных методов определения координат. Ниже рассмотрены известные методы и подходы для сбора данных о координатах и скорости.

Применение дорожных камер [2]. Основным достоинством систем видеонаблюдения является их положительное влияние на соблюдение правил дорожного движения [3], что способствует снижению аварийности. Однако к недостаткам таких систем относятся высокая стоимость установки и обслуживания комплексов, что делает их экономически затратными.

Использование спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС [4], Galileo [5], GPS [6]). Основным недостатком спутниковых навигационных систем является низкая точность позиционирования в закрытых помещениях или местах с плохим уровнем сигнала, таких как тоннели или густо застроенные территории.

RFID-метки [7] *и радиочастотные системы* [8]. К достоинствам таких систем относятся возможность скрытого контроля и всепогодность. Однако их использование сопряжено с рядом недостатков, таких как сложность подготовки к работе, включающей производство и установку датчиков, считывающих антенн и другого оборудования. Кроме того, такие системы также являются экономически затратными.

К менее распространенным методам относятся:

- использование сотовых телефонов и вышек связи [9];
- определение координат с помощью беспилотных летательных аппаратов [10].

Координаты и скорость движущегося объекта могут быть определены при наличии у каждого участника дорожного движения мобильного телефона с доступом в Интернет. В рамках данной работы предлагается концепция использования телефона как сенсора, аналогично работе [11], которая позволяет отказаться от специализированных устройств сбора информации и использовать мобильные устройства участников дорожного движения [12].

Такой подход исключает необходимость оснащения перекрестков и отдельных транспортных средств дополнительным оборудованием, таким как камеры, датчики или телеметрические блоки. Это значительно упрощает и удешевляет процесс сбора данных. Согласно исследованиям [13, 14], погрешность определения координат в таких системах составляет порядка 2–7 м, что является приемлемым для задач позиционирования транспортного средства на определенном участке дорожной сети.

Таким образом, все рассмотренные системы в основном требуют значительных экономических затрат на сбор информации или проведение подготовительных мероприятий. В связи с этим для сбора и передачи данных об участниках дорожного движения предложено использовать сотовый телефон с установленным специальным программным обеспечением, разработанным

для этих целей. Такой подход позволяет избежать указанных выше недостатков существующих систем.

Для реализации метода необходимо обеспечить передачу информации от пользователя к месту хранения данных. На транспортном уровне модели OSI отправки и прием сообщений обеспечивают протоколы Transmission Control Protocol (TCP) и User Datagram Protocol (UDP), которые являются основой для всего семейства протоколов TCP/IP.

Протокол TCP использует сеансовый способ обмена сообщениями. Это означает, что перед началом передачи данных между устройствами устанавливается соединение. В процессе обмена устройства поддерживают связь, и каждое из них «знает» о состоянии другого. Это обеспечивает надежность передачи данных, так как TCP гарантирует доставку сообщений и их правильную последовательность.

В отличие от TCP, протокол UDP реализует дейтаграммный способ обмена сообщениями. Он не устанавливает соединение между устройствами и не отслеживает их состояние. UDP просто отправляет данные без гарантии их доставки или сохранения порядка. Это делает UDP менее надежным по сравнению с TCP, но более быстрым и эффективным для задач, где важна скорость передачи, а не гарантия доставки.

Учитывая особенности протоколов TCP и UDP, для задач, связанных с определением координат и скорости движущихся объектов, более предпочтительным является использование протокола TCP. Это обусловлено его способностью обеспечивать надежную передачу данных за счет установления соединения, контроля доставки сообщений и сохранения их правильной последовательности. В системах, где точность и целостность данных имеют критическое значение (например, при передаче координат и скорости в реальном времени), TCP предоставляет необходимые гарантии, которые отсутствуют в UDP. Хотя UDP может быть более быстрым, его использование оправдано только в задачах, где допустима потеря части данных, что не подходит для рассматриваемой системы.

Разработанный алгоритм передачи данных включает следующие шаги:

- 1) создание объекта FTP-клиента и подключение к серверу;
- 2) передача данных авторизации и перевод подключения в пассивный режим;
- 3) переключение режима передачи файлов на бинарный;
- 4) открытие потока для загрузки файла на FTP-сервер;
- 5) загрузка файла с данными на FTP-сервер;
- 6) закрытие потока и отключение от сервера;
- 7) вывод сообщения об успешной загрузке файла.

Результаты

Разработанный метод основывается на использовании данных геолокации, предоставляемых мобильным устройством, и их последующей обработке для определения координат и скорости движущегося объекта. Метод использует встроенные возможности современных смартфонов, такие как GPS, ГЛОНАСС или другие спутниковые навигационные системы.

Устройство получает координаты (широта, долгота) и скорость движения с заданной периодичностью (каждые 5 с). Это обеспечивает актуальность данных и позволяет отслеживать изменения местоположения в реальном времени. Каждое измерение сопровождается меткой времени и даты, что позволяет анализировать динамику движения объекта. Полученные данные записываются в файл на устройстве в формате json. Этот формат выбран благодаря своей универсальности, легкости обработки и поддержке большинством платформ. Файл с данными отправляется на FTP-сервер с заданной периодичностью (каждые 60 с). Это позволяет централизованно собирать и анализировать информацию от множества устройств. Алгоритм определения и передачи координат приведен на рис. 1.

Для корректной работы приложения необходимо предоставить доступ к следующим функциям устройства: геолокации (включая фоновый режим), игнорированию оптимизации батареи, запись в память телефона, запрет перехода в спящий режим, доступ в Интернет, чтение памяти устройства.

Приложение не требует визуализации данных, так как весь функционал работает в фоновом режиме. Однако для удобства разработки и тестирования на экран устройства выводится служебная информация, такая как текущие координаты, скорость, статус подключения к серверу и другие параметры. Пример интерфейса приложения приведен на рис. 2.

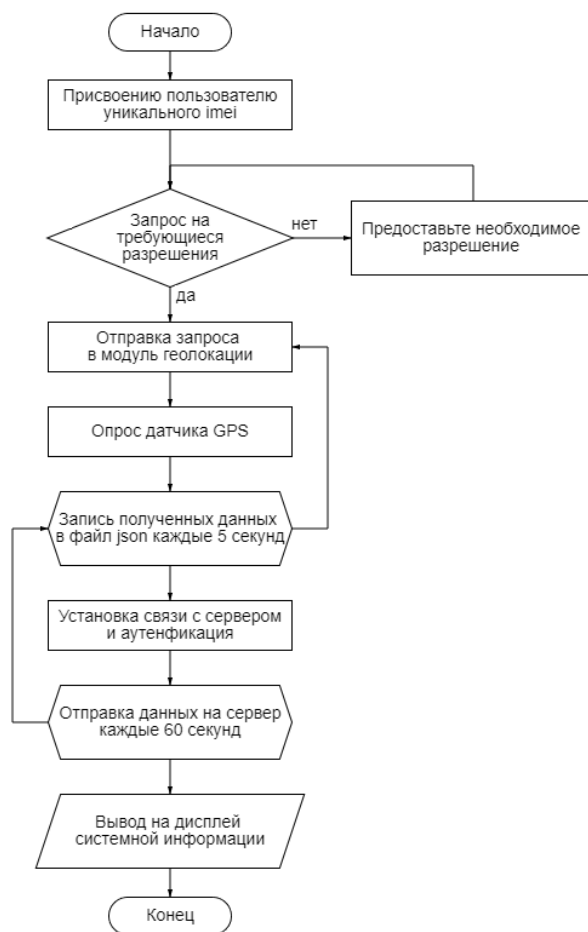


Рис. 1. Алгоритм определения и передачи данных

```

[ 0 ] {"date":"2023-05-04","imei":"5520833780","latitude":
57.72847175969801,"longitude":56.39440814872281,"speed":
0.12714171,"time":"18:58:24"}

[ 1 ] onLocationChanged: file 5520833780.json ]

[ 2 ] onRequestPermissionsResult: Start Location Updates

[ 3 ] Ident Number: 5520833780

[ 4 ] requestPermissions: requestPermissions

[ 5 ] file path /storage/emulated/0/Android/data/ru.gavrus.mayak4ns/
files/Documents/5520833780.json
  
```

Рис. 2. Отображение системной информации:

[0] – данные, которые записались в файл json; [1] – показывает имя файла при изменении данных; [2] – проверка доступа к необходимым разрешениям на устройстве; [3] – идентификация устройства; [4] – дополнительная проверка геолокации; [5] – указывает путь к файлу, сохраненному на устройстве

В рамках разработки приложения были определены следующие константы: минимальное время обновления данных, минимальная дистанция обновления данных, формат передаваемого файла и его расширение.

Также были заданы переменные, включающие данные геолокации, идентификатор устройства, набор переменных для вывода служебной информации на экран, IP-адрес сервера, порт подключения.

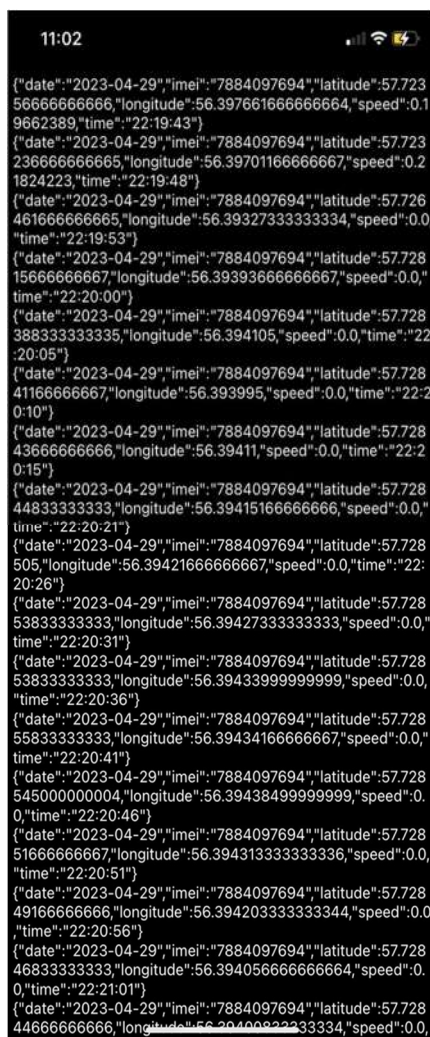
Реализованный метод обладает следующими функциональными возможностями. Игнорирование системной оптимизации батареи позволяет непрерывно осуществлять сбор данных в фоновом режиме. Изменения геолокации фиксируются с заданной периодичностью, даже

если координаты остаются постоянными. Имя файла формируется на основе уникального идентификатора устройства, который генерируется при запуске приложения. В случае возникновения ошибок приложение не прекращает работу, а записывает ошибку в лог и продолжает выполнение.

Создан класс, в котором записываются в соответствующие переменные данные, которые необходимы:

imei – идентификатор устройства (случайное 10-значное число);
 date в формате ("yyyy-MM-dd") – дата измерения геолокации;
 time в формате ("HH:mm:ss") – время измерения геолокации;
 latitude – координата локации (широта);
 longitude – координата локации (долгота);
 speed – скорость устройства.

Полученные данные с помощью реализованного метода хранятся в виде {"date":"2023-04-29", "imei":"478340976944", "latitude":57.7235666666666666, "longitude":56.3976616666666664, "speed":0.19662389, "time":"22:19:43"} и представлены на рис. 3.



```

11:02

{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7235666666666666,"longitude":56.3976616666666664,"speed":0.19662389,"time":"22:19:43"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7232366666666665,"longitude":56.3970116666666667,"speed":0.21824223,"time":"22:19:48"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7264616666666665,"longitude":56.3932733333333334,"speed":0.0,"time":"22:19:53"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7281566666666667,"longitude":56.3939366666666667,"speed":0.0,"time":"22:20:00"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7283883333333335,"longitude":56.394105,"speed":0.0,"time":"22:20:05"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7284116666666667,"longitude":56.393995,"speed":0.0,"time":"22:20:10"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.7284366666666666,"longitude":56.39411,"speed":0.0,"time":"22:20:15"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728448333333333,"longitude":56.3941516666666666,"speed":0.0,"time":"22:20:21"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728505,"longitude":56.3942166666666667,"speed":0.0,"time":"22:20:26"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728538333333333,"longitude":56.394273333333333,"speed":0.0,"time":"22:20:31"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728538333333333,"longitude":56.394339999999999,"speed":0.0,"time":"22:20:36"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728558333333333,"longitude":56.3943416666666667,"speed":0.0,"time":"22:20:41"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728545000000004,"longitude":56.394384999999999,"speed":0.0,"time":"22:20:46"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728516666666667,"longitude":56.3943133333333336,"speed":0.0,"time":"22:20:51"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728491666666666,"longitude":56.394203333333334,"speed":0.0,"time":"22:20:56"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728468333333333,"longitude":56.3940566666666664,"speed":0.0,"time":"22:21:01"}
{"date":"2023-04-29","imei":"7884097694","latitude":57.728446666666666,"longitude":56.3940666666666667,"speed":0.0,
  
```

Рис. 3. Полученные данные

Заключение

Для обеспечения эффективного функционирования ИТС необходимы алгоритмы управления транспортным потоком, которые требуют актуальной информации о текущем состоянии дорожной сети.

Новизна предложенного метода заключается в сочетании нескольких ключевых аспектов, которые отличают его от существующих решений. Вместо специализированного оборудования применяются мобильные устройства, что значительно снижает затраты на внедрение и обслуживание

системы. Метод легко масштабируется на большое количество устройств. Количество подключаемых пользователей ограничивается характеристиками сервера и оборудования, обрабатывающего данные. Автономная работа в фоновом режиме позволяет собирать данные непрерывно, даже если пользователь не взаимодействует с устройством. Данные сохраняются в формате json, который является универсальным и обеспечивает структурированность данных и совместимость с большинством современных систем анализа данных. TCP обеспечивает надежную передачу файлов даже в условиях нестабильного интернет-соединения. Это повышает надежность системы и минимизирует потерю данных.

В рамках программной реализации метода сбора координат и скорости движущихся объектов выделены следующие преимущества. Каждому устройству присваивается уникальный идентификатор при запуске новой сессии. Метод обеспечивает точность, соответствующую возможностям современных навигационных систем. Обновление данных с заданной частотой доступно для случаев, когда координаты объекта не изменяются. Благодаря использованию глобальных навигационных спутниковых систем, метод работает на любых расстояниях. Использование протокола TCP гарантирует доставку данных, а механизм сохранения информации при сбоях сети повышает отказоустойчивость системы. Для работы метода требуется только мобильное устройство с установленным программным обеспечением и доступом в Интернет, что минимизирует затраты на внедрение.

Можно отметить, что накопление полученных данных может использоваться для формирования обучающих выборок нейросетевых алгоритмов управления транспортным потоком, что является дальнейшим направлением исследования.

Список литературы

1. Саяпова Л. Р. Информационно-измерительный и управляющий комплекс для интеллектуальных транспортных систем на базе инфотелекоммуникационных технологий и средств спутниковой навигации: специальность : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 180 с.
2. Епифанов В. А., Темкин И. О., Кальгов И. В. Процедура автоматического безрадарного определения скорости мобильных объектов с использованием стационарной камеры // Программные продукты и системы. 2023. № 1. С. 165–174.
3. Мартынюк С. Н., Косовский В. Б. Использование автоматизированных систем видеонаблюдения в обеспечении безопасности дорожного движения // Программные продукты и системы. 2022. № 2. С. 105–110.
4. Чилига А. Ф., Марков Д. М., Степаненко А. В. Определение точных координат стационарного приемника GPS/ГЛОНАСС // Наука, инновации, технологии. 2016. № 1. С. 47–62.
5. Magalhães A., Gonçalves A., Bastos M. Assessing Galileo Positioning Using a Smartphone in an Airborne Platform // WiP Proceedings. Lloret de Mar, Spain, 2021.
6. Netthonglang Ch., Thongtan T., Satirapod Ch. GNSS Precise Positioning Determinations Using Smartphones // IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). 2019. P. 401–404.
7. Liu Yu., Zhou J., Wang L. [et al.]. Radio Frequency Identification target location based on the Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2290, iss. 1. P. 012085.
8. Прийма М. А., Панфилов А. Н., Абас В. М. Определение локального местоположения предметов на базе радиочастотной идентификации // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1. С. 41–44.
9. Yang Y., Xiong Ch., Zhuo Z., Cai M. Detecting Home and Work Locations from Mobile Phone Cellular Signaling Data // Mobile Information Systems. 2021. P. 1–13.
10. Коровин А. В., Савин Д. И. Способ определения координат наземных объектов беспилотным летательным аппаратом с использованием лазерного дальномера // Труды МАИ. 2023. № 128.
11. Mehta J. Vehicle Telematics in Data Analysis and Importance of Vehicle Tracking For Businesses // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. Vol. 10. P. 1258–1262.
12. Незнанов И. В., Намиот Д. Е. Контроль транспортных маршрутов с помощью мобильных телефонов // International Journal of Open Information Technologies. 2015. № 3. С. 30–39.
13. Косарев Н. С., Щербаков А. С. Статистический анализ точности определения положений спутников систем ГЛОНАСС и GPS // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2014. № 2. С. 9–18.
14. Заломленков А. Г., Дьяченко Д. В., Папаев А. В. Результаты эксперимента по определению точности позиционирования служебного автотранспорта органов внутренних дел по сигналам ГЛОНАСС // Безопасность дорожного движения. 2022. № 2. С. 7–10.

References

1. Sayapova L.R. Information measuring and control complex for intelligent transport systems based on infotelec communication technologies and satellite navigation tools: specialty. PhD dissertation. Ufa, 2019:180. (In Russ.)
2. Epifanov V.A., Temkin I.O., Kal'gov I.V. Procedure for automatic radar-free determination of the speed of mobile objects using a stationary camera. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2023;(1):165–174. (In Russ.)
3. Martynyuk S.N., Kosovskiy V.B. The use of automated video surveillance systems in ensuring road safety. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2022;(2):105–110. (In Russ.)
4. Chiliga A.F., Markov D.M., Stepanenko A.V. Determination of the exact coordinates of a stationary GPS/GLONASS receiver. *Nauka, innovatsii, tekhnologii = Science, innovations, technologies*. 2016;(1): 47–62. (In Russ.)
5. Magalhães A., Gonçalves A., Bastos M. Assessing Galileo Positioning Using a Smartphone in an Airborne Platform. *WiP Proceedings*. Lloret de Mar, Spain, 2021.
6. Netthonglang Ch., Thongtan T., Satirapod Ch. GNSS Precise Positioning Determinations Using Smartphones. *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*. 2019:401–404.
7. Liu Yu., Zhou J., Wang L. et al. Radio Frequency Identification target location based on the Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2290(1):012085.
8. Priyma M.A., Panfilov A.N., Abas V.M. Determination of the local location of objects based on radio frequency identification. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severno-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of universities. The North Caucasus region. Technical sciences*. 2020;(1):41–44. (In Russ.)
9. Yang Y., Xiong Ch., Zhuo Z., Cai M. Detecting Home and Work Locations from Mobile Phone Cellular Signaling Data. *Mobile Information Systems*. 2021:1–13.
10. Korovin A.V., Savin D.I. A method for determining the coordinates of ground objects by unmanned aerial vehicles a device using a laser rangefinder. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2023;(128). (In Russ.)
11. Mehta J. Vehicle Telematics in Data Analysis and Importance of Vehicle Tracking For Businesses. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022;10:1258–1262.
12. Neznanov I.V., Namiot D.E. Control of transport routes using mobile phones. *International Journal of Open Information Technologies = International Journal of Open Information Technologies*. 2015;(3):30–39. (In Russ.)
13. Kosarev N.S., Shcherbakov A.S. Statistical analysis of the accuracy of determining the positions of GLONASS and GPS satellites. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) = Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2014;(2): 9–18. (In Russ.)
14. Zalomlenkov A.G., D'yachenko D.V., Papaev A.V. The results of an experiment to determine the positioning accuracy of official vehicles of internal affairs bodies using GLONASS signals. *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya = Road safety*. 2022;(2):7–10. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Иванович Минаков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектроники,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-т Ленина, 92)
E-mail: eminakov@bk.ru

Evgeniy I. Minakov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of radioelectronics,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Никита Ильич Хазов

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-т Ленина, 92)
E-mail: nikita.hazov511@yandex.ru

Nikita I. Khazov

Postgraduate student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 03.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 31.03.2025

Принята к публикации / Accepted 14.04.2025

КАЛИБРОВКА МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА ВНУТРИТРУБНОГО МАГНИТНОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Р. Е. Вавилов¹, В. А. Гольдберг²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} АО «Газпром диагностика», Санкт-Петербург, Россия

¹ revavilov@gmail.com, ² v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки процедуры калибровки магнитоизмерительных датчиков внутритрубных магнитных дефектоскопов с учетом возможности автоматизации процесса калибровки программно-аппаратными средствами, поскольку отсутствует подходящее комплексное решение ввиду специфики сферы применения данных датчиков. Целью работы является разработка процедуры калибровки магнитоизмерительных датчиков, а также математического обеспечения для возможности численного моделирования отдельных компонентов калибратора. *Материалы и методы.* Описание измерительных процедур проводится с помощью математического аппарата метрологического анализа и синтеза. Для моделирования калибровочного магнитного поля меры магнитной величины калибратора методом конечных элементов рассмотрен способ задания математической модели, описывающей электромагнитные свойства катушки на постоянном токе и на переменном токе низкой частоты. Приведены критерии оценки результатов моделирования калибровочного магнитного поля. *Результаты.* Предложен способ калибровки магнитоизмерительных датчиков, основанный на использовании калибровочного электромагнитного поля гармонической формы, формируемого мерой магнитной величины. Предложен подход к определению необходимых габаритных размеров меры магнитной величины на основе конечно-элементного моделирования магнитного поля меры. *Выводы.* Предложенный способ калибровки отличается удобством в его автоматизации. По каждому магнитоизмерительному преобразователю в результате калибровочных измерений формируется набор значений во всем диапазоне измерений преобразователя. Выбор именно гармонической функции для формирования калибровочного магнитного поля обусловлен также удобством аппаратной реализации процедуры формирования входного сигнала меры магнитной величины. Предлагаемая в данной работе модель катушки меры адекватна для определения необходимых габаритов и нужного диапазона изменения выходной величины меры при постоянном токе. В случае же переменного и импульсного тока модель является неадекватной, так как не учитывается влияние индуктивности и сопротивления катушки. Однако низкая частота калибровочного поля (не более десятков–сотен герц) позволяет пренебречь дополнительным анализом переходных процессов в цепи.

Ключевые слова: калибровка датчиков внутритрубного дефектоскопа, калибратор магнитоизмерительных датчиков, моделирование магнитного поля методом конечных элементов, катушки Гельмгольца, магнитные измерения

Для цитирования: Вавилов Р. Е., Гольдберг В. А. Калибровка магнитоизмерительного датчика внутритрубного магнитного дефектоскопа с применением электромагнитного поля гармонической формы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 32–42. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-4

PIPELINE INSPECTION GAUGE MAGNETIC SENSOR CALIBRATION USING TIME-HARMONIC ELECTROMAGNETIC FIELD

R.E. Vavilov¹, V.A. Goldberg²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

^{1,2} JSC "Gazprom diagnostika", Saint Petersburg, Russia

¹ revavilov@gmail.com, ² v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the necessity to develop a calibration procedure for pipeline inspection gauge magnetic sensor taking into account the possibility of automating the calibration process with software

and hardware, since there is no suitable integrated solution due to the specifics of the sensors application. The aim of the work is to develop the magnetic sensor calibration procedure, as well as to provide the mathematical support for individual calibrator components numerical modeling. *Materials and methods.* The measurement procedures are described using the mathematical apparatus of metrological analysis and synthesis. To simulate a calibration field of a measure of magnetic quantity using the finite element method, we consider a method for creating a mathematical model describing the electromagnetic properties of a coil with direct current and low-frequency alternating current. The criteria for evaluating the results of the calibration magnetic field simulation are given. *Results.* A method for magnetic sensors calibration based on the use of a time-harmonic electromagnetic field generated by a measure of magnetic quantity is proposed. An approach to determine the required overall dimensions of a measure of magnetic quantity based on the finite element simulation of the measure magnetic field is proposed. *Conclusions.* The proposed calibration method is convenient due to its focus on automation. As a result of calibration measurements, a set of values is measured for each magnetic measuring transducer in the entire transducer measuring interval. The choice of a harmonic function for the calibration magnetic field generation is also due to the convenience of the hardware implementation of the procedure for generating the input signal of a measure of magnetic quantity. The measure coil model proposed in this paper is adequate to determine the required dimensions and the desired range of the output value variation of the measure at direct current. In the case of alternating and pulsed current, the model is inadequate, since the influence of inductance and winding resistance is not taken into account. However, the low frequency of the calibration field (no more than tens to hundreds of Hz) makes it possible to neglect additional analysis of transients in the circuit.

Keywords: pipeline inspection gauge sensor calibration, magnetic sensor calibrator, finite element modeling of magnetic field, Helmholtz coils, magnetic field measurements

For citation: Vavilov R.E., Goldberg V.A. Pipeline inspection gauge magnetic sensor calibration using time-harmonic electromagnetic field. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):32–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-4

Введение

Одной из важнейших задач, решаемых в целях обеспечения исправной работы газотранспортной системы, является проведение периодической диагностики технического состояния линейной части эксплуатирующихся трубопроводов. Для обнаружения дефектов стальных трубопроводов широко применяются магнитные методы диагностики, основанные на магнитных измерениях (МИ), при проведении которых регистрируются аномальные магнитные поля, возникающие вследствие наличия дефектов в стенках ферромагнитных труб. Широко применяемой в газовой промышленности разновидностью магнитной диагностики трубопроводов является внутритрубная магнитная диагностика (ВМД).

Получение достоверных результатов ВМД неразрывно связано с необходимостью обеспечения требуемой точности МИ, проводимых в процессе ВМД. Присутствующие в результатах МИ погрешности могут являться причиной увеличения количества ошибок первого и второго рода при анализе и интерпретации диагностических данных. Вследствие этого снижается степень доверия к полученным результатам ВМД. В применяемых в процессе ВМД магнитных дефектоскопах (МД) для проведения МИ зачастую используются аналоговые магнитоизмерительные датчики внутритрубных магнитных дефектоскопов (МДВМД).

Конструктивно МДВМД представляет собой устройство, содержащее следующие компоненты:

- совокупность магнитоизмерительных преобразователей – первичных измерительных преобразователей Холла (МИП);
- мультиплексор, коммутирующий выход конкретного МИП с выходом МДВМД;
- схему питания МДВМД.

Как видно, особенностью МДВМД является то, что его выходной сигнал зависит не только от входной величины (воздействующего магнитного поля), но и от выставленного дефектоскопом адреса МИП.

Необходимо отметить, что МДВМД является сменным элементом МД, нередко выходит из строя в процессе эксплуатации и часто подлежит замене. Использование в МД конкретного МДВМД должно быть обусловлено не только установленной принципиальной работоспособностью МДВМД, но и фактом того, что метрологические характеристики (МХ) МДВМД удовлетворяют установленным требованиям к точности МИ. В противном случае применять рассматриваемый МДВМД в МД недопустимо.

В связи с этим важной задачей при подготовке МД к проведению ВМД является обеспечение метрологической исправности каждого используемого в дефектоскопе МДВМД.

Как известно, одним из способов обеспечения метрологической исправности средств измерений является коррекция характеристики преобразования по результатам калибровочных измерений [1]. Для обеспечения метрологической исправности МДВМД можно предложить различные варианты реализации процедуры калибровки, полагаясь на хорошо известные основные методы поверки и калибровки средств измерений [2, 3].

В наиболее очевидном случае МДВМД может быть оснащен прецизионным МИП, выходной сигнал которого является эталонным по отношению к остальным рабочим МИП. Калибровочные измерения выполняются в высокооднородном калибровочном магнитном поле (КМП), формируемым мерой магнитной величины (ММВ). При этом ММВ является внешним вспомогательным по отношению к МДВМД устройством (оснащение МДВМД встроенной ММВ в данной работе не рассматривается, так как предположительно этому препятствует множество факторов: габаритные размеры ММВ, способной формировать КМП необходимой напряженности, энергопотребление ММВ и др.). Результаты измерений по каждому рабочему МИП сравниваются с результатом измерений с помощью эталонного МИП. По результатам сравнения определяются необходимые величины поправок по каждому МИП и проводится коррекция их характеристики преобразования. Недостатком такого подхода является необходимость изменения конструкции МДВМД, что приводит к дополнительным материальным затратам и трудозатратам на разработку и изготовление МДВМД. Выход из строя эталонного МИП приводит к невозможности проведения процедуры калибровки до проведения соответствующего ремонта МДВМД, а следовательно, МДВМД по результатам предпусковой подготовки МД может быть автоматически признан неисправным, при этом же остальные его рабочие МИП могут быть исправны в принципе. Также при таком подходе требуется программно реализовать особый режим калибровки МД, значительно отличающийся от обычного режима работы МД, поскольку в рамках такой калибровки предполагается синхронизировать процесс калибровочных измерений с процессом последовательного ступенчатого изменения напряженности КМП с заданным шагом во всем диапазоне измерений МИП. Необходимость синхронизации процессов формирования ступенчатого КМП и калибровочных измерений создает дополнительные затруднения в автоматизации процесса калибровки МДВМД.

Целесообразным является иной подход: оснащение ММВ контрольным эталонным МИП и сравнение показаний контрольного МИП с показаниями МИП МДВМД в заданном КМП во всем диапазоне измерений. Однако в данном случае также присутствуют затруднения в автоматизации процесса, так как необходимо обеспечить сравнение показаний с контрольным МИП ММВ в автоматическом режиме средствами самого МД, что, в частности, требует изменения электронных блоков МД.

В связи с описанными трудностями, а также учитывая представленную конструктивную особенность МДВМД, актуальной является задача разработки процедуры калибровки МДВМД, а также устройства, способствующего реализации такой процедуры – калибратора МДВМД. При этом важно отметить, что процедура калибровки должна обеспечивать снижение систематической погрешности, а сам процесс калибровки должен выполняться надлежащим образом, поскольку неудовлетворительная калибровка приводит к противоположному ожидаемому эффекту – увеличению систематической погрешности [4].

В данной работе предлагается использовать калибровку МДВМД с помощью гармонического КМП, формируемого внешней ММВ. При этом предлагается использовать сравнение показаний не с эталонным МИП, а с известной моделью сигнала КМП исходя из допущения, что формируемое с помощью ММВ КМП достаточно близко к своей математической модели. Далее подробно рассматривается именно процедура калибровки, вопросы разработки калибратора, а именно его ММВ, затрагиваются частично.

Процедура калибровки магнитоизмерительных датчиков

Для описания предлагаемой процедуры калибровки МДВМД рассмотрим следующую измерительную ситуацию. Пусть на вход ММВ поступает гармонический сигнал в виде переменного напряжения $u_{\text{ММВ}}(t)$:

$$u_{\text{ММВ}}(t) = u_{\text{max}} \sin(\omega_{\text{КМП}} t + \varphi_0), \quad (1)$$

где t – время; $\omega_{\text{КМП}}$ – угловая частота; φ_0 – начальная фаза.

На практике в лабораторных условиях сигнал $u_{\text{ММВ}}(t)$ формируется с помощью функционального генератора (например, аналоговым способом или на основе прямого цифрового синтеза). Частота сигнала $f_{\text{КМП}} = \omega_{\text{КМП}} / 2\pi$ предполагается не более десятков-сотен герц (так,

например, при формировании сигнала удобно использовать промышленную частоту 50 Гц), что значительно меньше частоты опроса МДВМД (порядка 1 кГц) и позволяет уверенно провести дискретизацию входного сигнала. Далее считается, что сигнал $u_{\text{ММВ}}(t)$ сформирован достаточно точно и практически полностью описывается выражением (1), т.е. погрешность формирования сигнала несущественна и ею допустимо пренебречь.

В свою очередь ММВ преобразует входной электрический сигнал $u_{\text{ММВ}}(t)$ в переменное калибровочное электромагнитное поле (КМП), напряженность $H_{\text{КМП}}(t)$ которого определяется следующим образом:

$$H_{\text{КМП}}(t) = L_{\text{ММВ}}[u_{\text{ММВ}}(t)] = H_{\text{max}} \sin(\omega_{\text{КМП}} t + \varphi_{0\text{КМП}}), \quad (2)$$

где $L_{\text{ММВ}}$ – оператор, представляющий выполняемое ММВ преобразование, $H_{\text{max}} = f(u_{\text{max}})$ и $\varphi_{0\text{КМП}} = \varphi_0 + \varphi_{\Delta\text{КМП}}$ – амплитуда и начальная фаза КМП гармонической формы соответственно; $\varphi_{\Delta\text{КМП}} = f(\omega_{\text{КМП}})$ – частотно-зависимый фазовый сдвиг КМП, обусловленный запаздыванием протекающего в цепи ММВ электрического тока относительно напряжения вследствие индуктивности катушек ММВ. При этом считается, что процедура $L_{\text{ММВ}}[u_{\text{ММВ}}(t)]$ обеспечивает формирование высокооднородного КМП, т.е. направление распространения КМП в рабочей области ММВ перпендикулярно плоскости МДВМД. Таким образом, входным воздействием для МДВМД является сигнал $H_{\text{КМП}}(t)$.

Описание измерительных процедур удобно проводить с помощью математического аппарата метрологического анализа и синтеза [5]. Так, циклический опрос МИП МДВМД в операторной форме описывается следующей системой уравнений:

$$\{u_{\text{МИП}_l}(t) = K_l R_{\text{МИП}_l} H_{\text{КМП}_l}(t)\}_{l=1}^n,$$

где $u_{\text{МИП}_l}(t)$ – выходное напряжение l -го МИП; K_l – оператор подключения l -го МИП к выходу МДВМД; $R_{\text{МИП}_l}$ – оператор l -го магнитоизмерительного преобразования (преобразование магнитной величины в электрическую); n – количество МИП в МДВМД.

Процедура калибровки подразумевает не только формирование КМП калибратором, но и подключение МДВМД к калибратору с целью измерения напряженности КМП. Тогда процесс измерения напряженности КМП имеет вид системы уравнений:

$$\{H_{\text{КМП}_l}^* = L_{\text{КМП}_l}[H_{\text{КМП}}(t)] = R_{\text{м}} R_{\text{а-ц}} R_{\text{нп}} K_l R_{\text{МИП}_l} H_{\text{КМП}_l}(t)\}_{l=1}^n,$$

где $H_{\text{КМП}_l}^*$ – результат измерения напряженности КМП по l -му МИП; $L_{\text{КМП}_l}(\cdot)$ – реализуемая по l -му МИП процедура измерений КМП; $R_{\text{нп}}$ – оператор нормализации (нормирующее преобразование); $R_{\text{а-ц}}$ – оператор аналого-цифрового преобразования; $R_{\text{м}}$ – оператор масштабирования (выражение результата в единицах напряженности магнитного поля).

Пусть $H_{\text{МИП}_l}^* = \{H_{\text{КМП}_l}^*(t_{lj})\}$ – множество результатов измерений величины $H_{\text{КМП}_l}^*$ l -м МИП для дискретных моментов времени $t_{lj} \in T = \{t_{lj}\}_{j=1}^m$. В случае равномерной дискретизации каждый момент времени t_{lj} определяется следующим образом:

$$t_{lj} = t_{l1} + j \cdot \Delta t_d,$$

где t_{l1} – начальный момент времени (момент времени начала измерений для l -го МИП); $\Delta t_d = t_{l2} - t_{l1} = \frac{1}{f_d}$ – период дискретизации сигнала; f_d – частота дискретизации сигнала.

Продолжительность дискретизации сигнала по каждому l -му МИП по дискретным отсчетам времени составляет $\Delta t_{\text{прод}} = t_{lm} - t_{l1}$, при этом объем выборки m определяется выбранной f_d :

$$m = f_d \Delta t_{\text{прод}}.$$

Множество $H_{\text{МИП}_l}^*$ рассматривается как выборка значений, по которым проводится интерполяция данных с целью определения функции $H_{\text{КМП}_l}^*(t)$ – аналитического выражения

для напряженности КМП на интервале времени $\Delta t_{\text{прод}}$. С учетом выражения (2) для каждого l -го МИП результат интерполяции $H_{\text{мп}_l}^*$ в наилучшем случае должен представлять собой гармоническую функцию:

$$H_{\text{мп}_l}^*(t) = L_{\text{инт}}^n[H_{\text{мп}_l}^*] = H_{\text{макс}_l}^* \sin(\omega_{\text{мп}_l}^*(t_{l1} + t) + \varphi_0 + \varphi_{\Delta \text{мп}_l}^*), t \in [t_{l1}, t_{lm}],$$

где $L_{\text{инт}}^n(\cdot)$ – процедура интерполяции дискретного сигнала с наилучшим результатом в виде гармонической функции; $H_{\text{макс}_l}^* = \max(H_{\text{мп}_l}^*(t))$ – результат измерения амплитуды КМП; $\omega_{\text{мп}_l}^* = L_{\text{чм}}[H_{\text{мп}_l}^*(t)]$ – результат измерения частоты КМП; $L_{\text{чм}}(\cdot)$ – процедура измерения частоты КМП; $\varphi_{\Delta \text{мп}_l}^* = L_{\text{фм}}[H_{\text{мп}_l}^*(t)]$ – результат измерения фазового сдвига КМП; $L_{\text{фм}}(\cdot)$ – процедура измерения фазового сдвига КМП. При этом нахождение $\omega_{\text{мп}_l}^*$ и $\varphi_{\Delta \text{мп}_l}^*$ в контексте решаемой задачи не представляет интереса и далее не рассматривается.

Поскольку реализуемая процедура интерполяции $L_{\text{инт}}(\cdot)$, вообще говоря, может существенно отличаться по результатам от желаемой процедуры $L_{\text{инт}}^n(\cdot)$, для практических целей предпочтительно рассматривать такие методы интерполяции, которые позволяют достаточно точно восстанавливать именно гармонические функции, например интерполяция кубическими сплайнами, тригонометрическая интерполяция, *sinc*-интерполяция [6, 7] и др.

Если считать, что формируемое с помощью ММВ КМП в действительности достаточно близко к своей математической модели (2), а именно отклонение значений амплитуды и частоты незначительно по отношению к расчетным значениям, то для каждого l -го МИП возможно определить модель эталонного сигнала следующим образом. Пусть $\varphi_{0\text{мп}}^*$ – результат измерения начальной фазы КМП. Для каждого l -го МИП величина $\varphi_{0\text{мп}_l}^*$ оценивается следующим образом:

$$\varphi_{0\text{мп}_l}^* = \arcsin\left((H_{\text{мп}_l}^* - \overline{H_{\text{мп}_l}^*}) / (\max(H_{\text{мп}_l}^*) - \overline{H_{\text{мп}_l}^*})\right),$$

где $H_{\text{мп}_l}^*$, $\overline{H_{\text{мп}_l}^*} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{\text{мп}_l}^*$ и $\max(H_{\text{мп}_l}^*)$ – первый элемент, выборочное среднее и наибольший элемент выборки $H_{\text{мп}_l}^*$ соответственно. Наличие в аргументе обратной тригонометрической функции $\arcsin(\cdot)$, величин $\overline{H_{\text{мп}_l}^*}$ и $\max(H_{\text{мп}_l}^*)$ необходимо для учета влияния погрешности смещения нуля и нормализации аргумента соответственно.

Величина $\varphi_{0\text{мп}_l}^*$ используется при формировании $H_{\text{мп}_l}(t)$ – модели эталонного сигнала для l -го МИП:

$$H_{\text{мп}_l}(t) = H_{\text{макс}} \sin(\omega_{\text{мп}} t + \varphi_{0\text{мп}_l}^*).$$

Полученное в результате интерполяции аналитическое выражение для $H_{\text{мп}_l}^*(t)$ и сформированная модель эталонного сигнала $H_{\text{мп}_l}(t)$ позволяют сформировать две выборки значений и с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (НМНК) построить зависимость $H_{\text{мп}_l}^*(H_{\text{мп}_l})$, которая рассматривается как результат определения характеристики преобразования l -го МИП. Полученная таким образом зависимость используется для определения необходимых величин поправок и проведения коррекции характеристики преобразования l -го МИП известными стандартными алгоритмическими способами. Представленная процедура калибровки выполняется для каждого МИП МДВМД.

Удобством предложенного способа калибровки является то, что задание входного воздействия в виде гармонического КМП позволяет охватить весь диапазон измерений без необходимости пошагового алгоритмического изменения величины входного воздействия, что, в свою очередь, способствует возможности реализации процесса автоматической калибровки. Предполагается, что режим калибровки МДВМД встроенного программного обеспечения МД алгоритмически незначительно отличается от режима измерений: дефектоскопом осуществляется последовательность измерений напряженности КМП в течение заданного интервала времени, по истечении времени осуществляется вычисление необходимых поправок по каждому МИП.

Данное обстоятельство позволяет исключить необходимость пошагового изменения величины КМП оператором, контролирующим выполнение процедуры калибровки извне.

Модель для вычисления распределения магнитного поля меры

Важной частной задачей является определение необходимых габаритных размеров ММВ, поскольку необходимо обеспечить такой рабочий объем однородного КМП, в котором возможно беспрепятственно разместить МДВМД с определенными линейными размерами. Так как ММВ представляет собой пару катушек Гельмгольца, то фактически необходимо определить форму и размеры катушек, при этом желательно минимизировать количество слоев намотки с целью облегчения их изготовления. В связи с этим предлагается следующий подход к определению необходимых габаритных размеров ММВ.

Для описания подхода рассмотрим два случая намотки катушки проводом: первый случай – намотка в высоту («наращивание слоев»), второй – намотка в длину. Для упрощения задачи рассмотрим плоский прямоугольный обмоточный провод, а точнее, его частный случай – провод с квадратным сечением. На рис. 1 проиллюстрированы два рассматриваемых случая намотки.

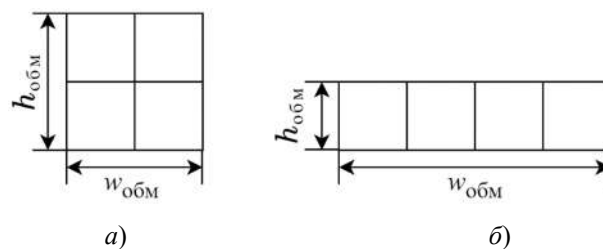


Рис. 1. Два случая намотки катушки индуктивности:
а – намотка в высоту; б – намотка в длину

Пусть $j_{\max}$ – максимально допустимая плотность тока, d – диаметр провода по меди, $N_{\text{вит}}$ – количество витков в катушке. Площадь поперечного сечения провода определяется как $S_{\text{пр}} = d^2$, а площадь поперечного сечения обмотки $S_{\text{обм}} = h_{\text{обм}} \times w_{\text{обм}}$. Максимально допустимый ток через обмоточный провод определяется как $I_{\max} = j_{\max} S_{\text{пр}}$. В случае если ток переменный, для оценки превышения $I_{\max}$ вычисляется среднеквадратическое значение силы тока, протекающего в цепи катушек.

Без учета коэффициента заполнения катушки (в рассматриваемом случае принимается равным 1) величины $S_{\text{обм}}$ и $S_{\text{пр}}$ связаны между собой следующим образом:

$$S_{\text{обм}} = N_{\text{вит}} S_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Как известно, в общем случае напряженность магнитного поля H , формируемого проводником с электрическим током, в некоторой точке представляет собой некоторую функцию от силы тока в проводнике:

$$H = cf(I, \dots) = cI, \quad (4)$$

где c – коэффициент пропорциональности между H и I , зависящий от формы проводника и расстояния до рассматриваемой точки. По принципу суперпозиции в рабочем пространстве суммарное магнитное поле, описываемое вектором $\vec{H}_{\Sigma}$, представляет собой сумму магнитных полей от каждого i -го элементарного витка с током:

$$\vec{H}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} \vec{H}_i,$$

где $\vec{H}_i$ – магнитное поле от i -го витка с током. Тогда в соответствии с формулой (4) модуль вектора $\vec{H}_{\Sigma}$ можно выразить следующим образом:

$$|\vec{H}_{\Sigma}| = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} c_i I_i. \quad (5)$$

Обмотку катушки можно рассматривать как последовательное соединение элементарных витков с током количеством $N_{\text{вит}}$. При этом в каждом витке сила тока одинакова:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_{N_{\text{вит}}} = I_{\text{общ}}.$$

Тогда формулу (5) можно переписать следующим образом:

$$\left| \vec{H}_{\Sigma} \right| = I_{\text{общ}} \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} c_i.$$

Обозначим сумму коэффициентов пропорциональности как c_{Σ} , тогда данное выражение возможно привести в следующем виде:

$$\left| \vec{H}_{\Sigma} \right| = I_{\text{общ}} c_{\Sigma}. \quad (6)$$

В том случае, если рассматривается поле внутри длинной однослойной катушки (соленоида), то магнитное поле внутри катушки однородно вдоль всей ее длины, и в уравнении (6) сумма коэффициентов пропорциональности сводится к величине $n_{\text{вит}}$ – суммарному количеству витков слоя на метр.

В случае, если рассматривается магнитное поле на некотором расстоянии от катушки, задача фактически сводится к нахождению величины c_{Σ} , что достаточно нетривиально, поскольку необходимо учесть вклад каждого элементарного витка.

Методы синтеза катушек для создания мер магнитных величин достаточно подробно рассмотрены в работе [8]. В контексте же текущей работы подробнее рассмотрим принципы создания геометрической модели, необходимой для конечно-элементного моделирования магнитного поля [9] в современных пакетах прикладных программ с целью нахождения оптимальных габаритных размеров и параметров катушек. Важным аспектом является создание модели, адекватно отражающей электромагнитные свойства пары катушек определенной формы и размеров. При этом такая модель должна быть достаточно простой для удобства ее параметризации и возможности проведения итерационных вычислений в ограниченном промежутке времени, поскольку любой процесс численного (в частности, и конечно-элементного) решения дифференциальных уравнений требует существенных временных затрат в случае сложной геометрической модели. Поэтому важным при моделировании является наличие возможности получить решение системы уравнений за приемлемое время с учетом имеющихся вычислительных возможностей [10, 11].

В целях определения необходимой геометрической модели рассмотрим плоскость поперечного сечения многослойной катушки. Данная плоскость может быть представлена в виде дискретного множества элементарных участков в соответствии с количеством витков. Размер каждого участка определяется исходя из диаметра обмоточного провода, и в данном случае в плоскости присутствуют участки одинаковых размеров. Каждому такому участку соответствует сила тока $I_{\text{общ}}$. На рис. 2 приведена иллюстрация данной плоскости.

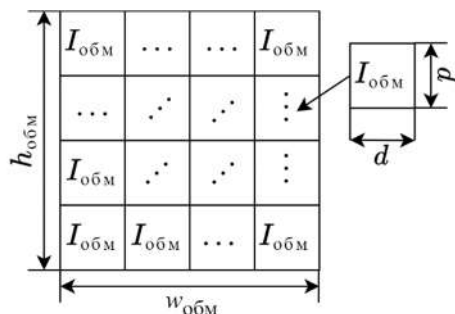


Рис. 2. Плоскость поперечного сечения катушки и распределение постоянного тока в ней

Алгебраическая сумма токов всех витков, охватываемых поверхностью поперечного сечения намотки, представляет собой величину I_{Σ} и фактически является так называемой магнитодвижущей силой. Таким образом, сумма токов I_{Σ} определяется следующим образом:

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} I_i = N_{\text{вит}} I_{\text{общ}}.$$

При этом с учетом (3) I_Σ можно выразить следующим образом:

$$I_\Sigma = N_{\text{вит}} I_{\text{max}} = \frac{S_{\text{обм}}}{S_{\text{пр}}} j_{\text{max}} S_{\text{пр}} = S_{\text{обм}} j_{\text{max}}. \quad (7)$$

Таким образом, приведенные соотношения и взаимосвязь между ними позволяют рассматривать модель многовитковой катушки в виде цельного проводника для задачи численного моделирования распределения магнитного поля в рабочей области меры магнитной величины (т.е. поле вектора $\vec{H}_\Sigma$). При этом площадь поперечного сечения цельного проводника составляет $S_{\text{обм}}$ и определяется по формуле (3). В качестве входного воздействия модели задается величина I_Σ , максимально возможное значение которой определяется исходя из заданной допустимой j_{max} в соответствии с уравнением (7).

Важно отметить, что задаваемая в рамках моделирования сила тока не является той силой тока, которая действительно протекает в реальной катушке. Подразумевается именно эквивалентный ток, т.е. именно величина I_Σ .

В связи с тем, что в уравнении (6) каждый i -й коэффициент пропорциональности зависит от расстояния между i -м витком и точкой наблюдений (точкой измерений напряженности магнитного поля), поведение вектора $\vec{H}_\Sigma$ в рассматриваемой точке зависит от пространственного расположения витков друг относительно друга. В свою очередь взаиморасположение витков катушки определяется выбранным способом намотки. Поэтому интерес представляет задача сопоставления магнитных полей катушки, намотанной «в длину», и катушки, намотанной «в высоту», при прочих равных параметрах с целью определения возможности минимизации количества слоев катушки обусловлена технологической сложностью изготовления многослойной катушки с проводом крупного сечения.

Из общих соображений очевидно, что по мере удаления каждого витка от геометрического центра системы напряженность поля в центре снижается. При этом изменяется и пространственная конфигурация формируемого катушкой поля (поле «вытягивается» вдоль магнитной оси). Другими словами, попытка создания пары «длинных» катушек с малым количеством слоев намотки при заданной максимально допустимой степени неоднородности сопряжена с проблемой изменения линейных размеров области однородного поля. Изменение размеров приводит к невозможности применения такой пары катушек в качестве меры магнитной величины, так как размеры формируемой рабочей области недостаточны для полноценного размещения внутри нее МДВМД.

Критерии оценки результатов моделирования калибровочного магнитного поля

Для системы катушек нормируется величина η – относительная неоднородность формируемого магнитного поля в рабочей области, которая оценивается по следующей формуле:

$$\eta = \max(\Delta B / B_0),$$

где $\Delta B = B(x_1, y_1, z_1) - B_0$ – отклонение величины индукции МП в точке с координатами (x_1, y_1, z_1) от $B_0 = B(x_0, y_0, z_0)$ – величины индукции МП в геометрическом центре системы катушек.

В случае напряженности H степень неоднородности η рассчитывается аналогичным образом, и формула приобретает следующий вид:

$$\eta = \max(\Delta H / H_0).$$

Так как рассматриваемые системы катушек меры устроены таким образом, что формируемое МП направлено вдоль магнитной оси, то практический интерес представляет только тангенциальная составляющая МП. При этом нормальной и поперечной составляющими можно пренебречь (практически равны нулю). Поэтому если использовать прямоугольную декартову систему координат и принять, что тангенциальная составляющая МП сонаправлена с осью OY , то для оценки η интерес представляет H_y – тангенциальная составляющая формируемого МП:

$$\eta = \max(\Delta H_y / H_0).$$

С учетом неоднородности КМП формулируются следующие требования к силе тока в цепи катушек: 1) сила тока в цепи не должна превышать величины $I_{\max}$ (чтобы не допустить перегрев катушек); 2) заданная сила тока в цепи обеспечивает на границах рабочей области напряженность КМП не менее $|H_{\min}|$ – границы диапазона измерений МИП, применяемых в МДВМД.

Для определения оптимальных размеров катушки интерес представляет анализ зависимости $w_{\eta_{\max}, h_0} \left(\frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}} \right)$ – ширины зоны однородного поля w_{η} при заданной максимально допустимой степени неоднородности $\eta_{\max}$ на высоте геометрического центра системы h_0 от отношения толщины обмотки к ее высоте $\frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}$. Обозначим соотношение сторон $\frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}$ в виде параметра p_{wh} :

$$p_{wh} = \frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}.$$

Тогда в целях минимизации количества слоев намотки оптимальными являются такие значения $w_{\text{обм}}$ и $h_{\text{обм}}$, при которых p_{wh} достигает максимума, при этом в случае продольно вытянутой катушки индуктивности интерес представляет область определения $p_{wh} > 1$, т.е. при соблюдении условия $h_{\text{обм}} < w_{\text{обм}}$.

С другой стороны, с точки зрения возможности получения наибольшей ширины однородного поля, оптимальными будут являться такие значения $w_{\text{обм}}$ и $h_{\text{обм}}$, при которых зависимость $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$ принимает наибольшее значение. Тогда оптимальное значение $p_{wh_{\text{opt}}}$ определяется следующим образом:

$$p_{wh_{\text{opt}}} = \arg \max_{p_{wh} > 1} w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh}).$$

Для практических целей необходимо и достаточно такое значение величины $w_{\eta_{\max}, h_0}$, при котором ширина получившейся зоны однородного магнитного поля позволяет разместить в рабочей области МДВМД, имеющий ширину $w_{\text{МДВМД}}$, т.е. интерес представляет область значений $w_{\eta_{\max}, h_0} \geq w_{\text{МДВМД}}$.

Таким образом, по результатам проводимого конечно-элементного моделирования проводится анализ дискретной функции $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$ в области определения $p_{wh} > 1$ и области значений $w_{\eta_{\max}, h_0} \geq w_{\text{МДВМД}}$ на предмет выявления наименьшей допустимой величины $h_{\text{обм}}$. При этом множество значений p_{wh} формируется путем последовательного одновременного увеличения $w_{\text{обм}}$ и уменьшения $h_{\text{обм}}$ на один и тот же заданный шаг дискретизации размера. На рис. 3 качественно графически изображена зависимость ширины зоны однородного КМП от соотношения сторон обмотки, при этом красным цветом выделена интересующая область значений в рамках решаемой задачи.

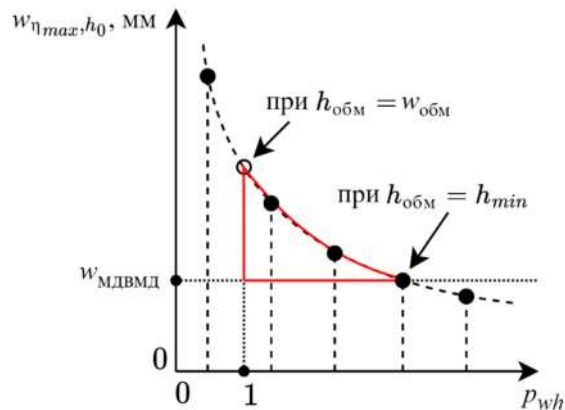


Рис. 3. Область значений $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$, представляющих интерес в контексте решаемой задачи

Заключение

Как уже отмечалось ранее, предложенный способ калибровки отличается удобством в его автоматизации. По каждому МИП в результате калибровочных измерений формируется набор значений во всем диапазоне измерений МИП «естественным образом»: в результате измерений каждому МИП соответствует свой отрезок гармонической функции. При этом выбор именно гармонической функции обусловлен также удобством аппаратной реализации процедуры формирования сигнала: сигнал любой иной формы неизбежно искажается электронными компонентами схемы усилителя сигнала калибратора. Проблема подавления гармоник, относящихся к помехам, препятствует формированию малощумящего КМП, форма которого отлична от гармонической.

Предлагаемая в данной работе модель катушки ММВ адекватна для определения необходимых габаритов и нужного диапазона изменения выходной величины ММВ при постоянном токе. В случае же переменного и импульсного тока модель является неадекватной, так как не учитывается влияние индуктивности и сопротивления катушки. Однако то обстоятельство, что КМП представляет собой гармоническое воздействие частотой не более десятков-сотен герц, позволяет пренебречь дополнительным анализом переходных процессов в цепи.

Список литературы

1. Королев П. Г. Организация работы средств измерений с метрологическим самоконтролем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 4. С. 51–57. doi: 10.21685/2307-5538-2019-4-6
2. Магницкий Д. К., Захарова А. Г. Обзор существующих методов и автоматизированных комплексов поверки средств измерений // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Р. В. Беляевского, И. А. Лобур. Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2021. С. 328–333.
3. Методы поверки (калибровки) и поверочные схемы. URL: <https://sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/reference-book/metrology-reference/method-of-calibration/> (дата обращения: 17.01.2025).
4. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М. : Техносфера, 2007. 384 с.
5. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. СПб. : Политехника, 2005. 510 с.
6. Schanze T. Sinc interpolation of discrete periodic signals // IEEE Transactions on Signal Processing. 1995. № 43 (6). P. 1502–1503. doi: 10.1109/78.388863
7. Porshnev S. V., Kusaykin D. V., Klevakin M. A. On features of reconstruction of finite-length discrete-time signal with nonzero constant component using sinc interpolation // SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. Novosibirsk : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 167–171. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958291
8. Афанасьев Ю. В. [и др.]. Средства измерений параметров магнитного поля. Л. : Энергия. Ленингр. отделение, 1979. 320 с.
9. Kuczmanski M., Iványi A. The Finite Element Method in Magnetism. Budapest : Akadémiai Kiadó, 2008. 319 p.
10. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы : учеб. пособие для вузов. М. : Наука, 1989. 432 с.
11. Калиткин Н. Н., Альшина Е. А. Численные методы : в 2 кн. М. : ИЦ «Академия», 2013. Кн. 1. Численный анализ. 304 с.

References

1. Korolev P.G. Organization of the work of measuring instruments with metrological self-control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(4):51–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2019-4-6
2. Magnitskiy D.K., Zakharova A.G. Review of existing methods and automated systems for verification of measuring instruments. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: sb. materialov V Vseros. nauch.-prakt. konf. = Energy and energy conservation: theory and practice : collection of materials of the V All-Russian scientific and practical conference*. Kemerovo: Izd-vo KuzGTU, 2021:328–333. (In Russ.)
3. *Metody poverki (kalibrovki) i poverochnye skhemy = Methods of verification (calibration) and verification schemes*. (In Russ.). Available at: <https://sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/reference-book/metrology-reference/method-of-calibration/> (accessed 17.01.2025).
4. Dzhekson R.G. *Noveyshie datchiki = The latest sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:384. (In Russ.)
5. Tsvetkov E.I. *Osnovy matematicheskoy metrologii = Fundamentals of mathematical metrology*. Saint Petersburg: Politehnika, 2005:510. (In Russ.)
6. Schanze T. Sinc interpolation of discrete periodic signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1995;(43):1502–1503. doi: 10.1109/78.388863

7. Porshnev S.V., Kusaykin D.V., Klevakin M.A. On features of reconstruction of finite-length discrete-time signal with nonzero constant component using sinc interpolation. *SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019:167–171. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958291
8. Afanas'ev Yu.V. et al. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnogo polya = Measuring instruments for magnetic field parameters*. Leningrad: Energiya. Leningr. otd-nie, 1979:320. (In Russ.)
9. Kuczmann M., Iványi A. *The Finite Element Method in Magnetism*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2008:319.
10. Samarskiy A.A., Gulín A.V. *Chislennyye metody: ucheb. posobie dlya vuzov = Numerical methods : a textbook for universities*. Moscow: Nauka, 1989:432. (In Russ.)
11. Kalitkin N.N., Al'shina E.A. *Chislennyye metody: v 2 kn. Kn. 1. Chislennyy analiz = Numerical methods : in 2 books. Book 1. Numerical analysis*. Moscow: ITs «Akademiya», 2013:304. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Евгеньевич Вавилов

аспирант,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5);
ведущий инженер отдела разработки
схмотехнических решений службы разработки
средств внутритрубной дефектоскопии,
АО «Газпром диагностика»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Пулковское шоссе, 40, корп. 4)
E-mail: revavilov@gmail.com

Roman E. Vavilov

Postgraduate student,
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
(5 prof. Popov street, Saint Petersburg, Russia);
leading engineer of the department of development
of circuit engineering solutions for in-pipe flaw
detection equipment,
JSC "Gazprom diagnostika"
(build. 4, 40 Pulkovskoye Shosse,
Saint Petersburg, Russia)

Валерия Александровна Гольдберг

ведущий инженер отдела разработки механических
конструкций и систем службы разработки средств
внутритрубной дефектоскопии,
АО «Газпром диагностика»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Пулковское шоссе, 40, корп. 4)
E-mail: v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

Valeriia A. Goldberg

Leading engineer of the department of development
of mechanical structures and monitoring systems
for in-pipe flaw detection equipment
JSC "Gazprom diagnostika"
(build. 4, 40 Pulkovskoye Shosse,
Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 22.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2025

Принята к публикации / Accepted 17.03.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.382

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАССИВИРУЮЩИХ СТРУКТУР МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

В. С. Мамонтов¹, С. А. Гурин², М. Д. Новичков³, Д. В. Агафонов⁴, К. Л. Закирова⁵

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

^{2,3,4} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹kipra@pnzgu.ru, ²teslananoel@rambler.ru, ³novichkov1998maks@gmail.com,

⁴dmitryagafonov@list.ru, ⁵Zakirovacamila@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данного исследования связана с развитием радиоэлектронной аппаратуры, которая требует улучшения электрических параметров электронных компонентов, в том числе временной и температурной стабильности. *Материалы и методы.* Исследованы процессы, протекающие в структуре тонких пленок, приводящие к изменению сопротивления тонкопленочного резистора с течением времени. *Результаты.* Представлена технология синтеза тонкопленочных резисторов с защитным покрытием и параметры, определяющие материалы тонких пленок и их последовательность. *Выводы.* Разработанная технология позволяет добиться значений ТКС тонкопленочных резисторов в диапазоне ± 3 1/°C.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, сопротивление, временная стабильность, температурная компенсация, пассивирующая структура

Для цитирования: Мамонтов В. С., Гурин С. А., Новичков М. Д., Агафонов Д. В., Закирова К. Л. Технология изготовления пассивирующих структур многослойных тонкопленочных резисторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 43–48. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

SYNTHESIS OF PASSIVATING STRUCTURES OF MULTILAYER THIN-FILM RESISTORS

V.S. Mamontov¹, S.A. Gurin², M.D. Novichkov³, D.V. Agafonov⁴, K.L. Zakirova⁵

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

^{2,3,4} Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

¹kipra@pnzgu.ru, ²teslananoel@rambler.ru, ³novichkov1998maks@gmail.com,

⁴dmitryagafonov@list.ru, ⁵Zakirovacamila@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this study is related to the development of radioelectronic equipment, which requires improvement of the electrical parameters of electronic components, including time and temperature stability. *Materials and methods.* The processes occurring in the structure of thin films leading to a change in the resistance of a thin-film resistor over time are investigated. *Results.* The technology of synthesis of thin-film resistors with a protective coating

and the parameters determining the materials of thin films and their sequence are presented. *Conclusions.* The developed technology makes it possible to achieve values of TCR of thin-film resistors in the range $\pm 3 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Keywords: thin-film resistor, resistance, temporary stability, temperature compensation, passivating structure

For citation: Mamontov V.S., Gurin S.A., Novichkov M.D., Agafonov D.V., Zakirova K.L. Synthesis of passivating structures of multilayer thin-film resistors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):43–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

Введение

Стремительное развитие радиоэлектроники требует усовершенствования электронно-компонентной базы [1, 2]. Одним из самых распространенных компонентов является резистор, который применяется для перераспределения и регулировки электрической энергии в авиационной и автомобильной промышленности, навигационных системах, медицинском оборудовании, средствах связи, системах управления промышленными объектами, бытовой технике и прочих областях [3, 4]. Неуправляемые изменения сопротивления резисторов с течением времени и при воздействии температуры являются основными факторами, оказывающими негативное влияние на точность прецизионных тонкопленочных резисторов (ТПР) [5].

Как правило конструкция тонкопленочных резисторов включает в себя такие элементы, как диэлектрическая подложка, резистивный и контактный слои тонких пленок. Добавление дополнительных функциональных слоев, таких как термокомпенсационный и пассивирующий, позволяет изготавливать резисторы с более высокой временной и температурной стабильностью, чем производимые в настоящее время аналоги [6, 7].

Временная нестабильность тонких пленок

В нормальных условиях со временем в тонких резистивных пленках происходит ряд процессов, приводящих к «дрейфу» сопротивления. С одной стороны, это «залечивание» и упорядочение дефектов, снятие напряжений, рекристаллизация и рост зерен, приводящие к снижению значения сопротивления с течением времени, с другой – поверхностное и объемное окисление, приводящее к росту сопротивления резистивной пленки [8]. Так, например, в пленках нихрома дрейф сопротивления имеет положительное направление и свидетельствует о доминирующей роли окисления. Добавки алюминия в сплавы на основе нихрома усиливают роль процессов рекристаллизации. Известно, что температура рекристаллизации алюминия (150°C) значительно ниже, чем нихрома. Тем самым при оптимальном процентном составе сплава возможна взаимная компенсация роста сопротивления вследствие окисления снижением сопротивления за счет рекристаллизации, что схоже с возможными теоретическими проработками получения металлосилицидных резистивных пленок. Но на сегодня, учитывая большое множество режимов формирования резистивной структуры, в производстве достичь прогнозируемых значений не удастся [9].

Кинетика процессов деградации тонких пленок керметов так же, как и нихрома, имеет двойственный характер. С течением времени возможны окончательное формирование фаз и рекристаллизация, с одной стороны, и окисление хрома, с другой. Скорость первого процесса зависит от оптимальных режимов термостабилизации и минимальна при отработанной технологии, а второго – от содержания хрома в резистивном слое [10]. При этом временной «дрейф» сопротивления таких пленок имеет отрицательное направление.

Помимо этого, слабым звеном тонких резистивных пленок является их чувствительность к влаге, под воздействием которой дорожки резистивного слоя вытравливаются в ходе электрохимической коррозии, а также низкая устойчивость к механическим воздействиям. Уменьшение ширины рисунка резистивного слоя при подобных воздействиях приводит к увеличению сопротивления и снижению максимальной рассеиваемой мощности, зачастую приводящее к перегоранию ТПР.

Учитывая вышеизложенные закономерности, представляется возможным повышение временной стабильности параметров за счет внедрения в конструкцию резистора дополнительных функциональных и защитных слоев тонких пленок.

Конструкция высокостабильного тонкопленочного резистора

Тонкопленочную резистивную структуру с дополнительным компенсационным резистивным слоем можно условно представить в виде эквивалентной схемы с параллельным

включением резисторов, тогда суммарное относительное изменение значения сопротивления будет определяться следующим уравнением:

$$\delta_{\text{пар.}} = R \left(\frac{\delta_1}{R_1} + \frac{\delta_2}{R_2} \right), \quad (1)$$

где R – общее сопротивление составного резистора; R_1 и R_2 – сопротивления резистивных пленок; δ_1 и δ_2 – относительные изменения величины сопротивления резистивных пленок во времени.

Из этого уравнения следует, что для полной компенсации временного отклонения, значения сопротивлений тонких пленок, при заранее известных δ_1 и δ_2 , должны удовлетворять уравнению

$$R_1 \delta_1 = -R_2 \delta_2. \quad (2)$$

Добавление дополнительных тонких пленок в значительной степени затрудняет проникновение активных газов, в том числе кислорода, ко всем слоям резистивной структуры, таким образом изменяя кинетику деградации. В особенности это проявляется для тонких пленок никрома, кинетика деградации которого в большей степени определяется именно процессом окисления. Поэтому нижний слой рекомендуется формировать из металлосилицидного сплава, представляющего собой металлическую фазу в оксидной матрице SiO, в связи с чем изменение сопротивления с течением времени определяется процессами рекристаллизации.

Для защиты резистивной пленки широко применяются различные методы пассивации [11]. Под пассивацией в данном случае понимается нанесение защитных пленок из химически стойкого соединения на поверхность резистивного слоя, например, карбида кремния, обладающего высокими изолирующими и теплопроводящими свойствами. Полученная конструкция представлена на рис. 1.

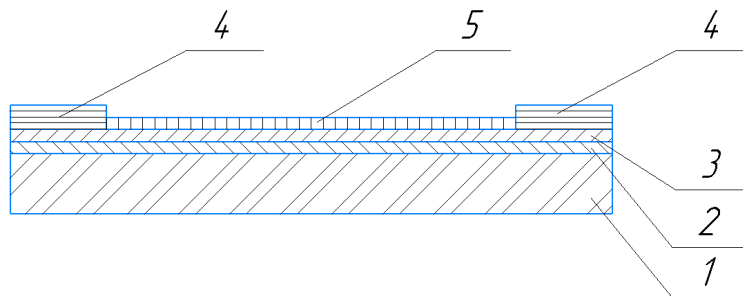


Рис. 1. Структура многослойного тонкопленочного резистора:
1 – диэлектрическая подложка; 2 – пленка из металлосилицидного сплава;
3 – пленка из никрома; 4 – контактные площадки; 5 – пленка из карбида кремния

Стоит отметить, что для металлосилицидных сплавов и никрома противоположными являются не только направления кривых старения, но и значения температурного коэффициента сопротивления, что позволяет добиться не только высокой временной стабильности, но и устойчивости к воздействию температуры, определяемой уравнением

$$R(T) \approx \frac{n(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T)}{(1 + \alpha_1 \Delta T) + n(\alpha_2 \Delta T)}, \quad (3)$$

где α_1 – ТКС первого (нижнего) слоя двухслойной структуры; α_2 – ТКС второго (верхнего) слоя двухслойной структуры; ΔT – диапазон изменения температуры.

Синтез многослойного тонкопленочного резистора

Диэлектрическая подложка из оксида алюминия проходит операции подготовки поверхности – жидкостная и плазмохимическая очистка. С учетом рассчитанных по формуле (1) значений сопротивлений напыляются резистивные пленки и кермета К-20С, имеющего отрицательный ТКС, и никрома Х20Н75Ю, имеющего положительный ТКС, а также контактного слоя алюминия по режимам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Режимы напыления резистивных и контактных тонких пленок

Слой	Ток испарителя $I_{\text{испар}}, \text{ А}$	Начальное остаточное давление в камере $P_{\text{ост нач}}, \text{ мм рт. ст.}$	Конечное остаточное давление в камере $P_{\text{ост кон}}, \text{ мм рт. ст.}$	Температура подложки $T_{\text{подл}}, ^\circ\text{C}$	Время напыления, $t, \text{ с}$
X20H80	280–350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	350	60
K-20C	480–500	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	400	200–280
Al	300–350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	250	180

Далее методом прямой фотолитографии формируется топология тонкопленочного резистора и производится напыление тонкой пленки карбида кремния методом магнетронного распыления в среде аргона при мощности 610 Вт в течение 20 мин, при этом температура подложек поддерживалась на уровне 320–340 °С. После чего производится высокотемпературный отжиг при температуре 350 °С в течение 6 ч.

Согласно проведенным испытаниям, температурный коэффициент сопротивления полученных тонкопленочных резисторов в диапазоне минус 60...+150 °С не превышал $\pm 3 \text{ } 1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$, временная нестабильность сопротивления худшего после выдержки в печи при температуре 150 °С в течение 45 сут составила 0,15 %.

Заключение

Определены основные процессы, протекающие в структуре резистивных тонких пленок, приводящие к дрейфу сопротивления с течением времени. На основе установленных закономерностей разработана тонкопленочная структура, состоящая из тонких пленок нихрома и керамики К-20С, имеющих противоположное направление кривых старения, и пассивирующего слоя карбида кремния, защищающего резистор от электролитической коррозии и механических воздействий. Полученная структура обладает высокой временной стабильностью, а также температурной устойчивостью благодаря компенсации ТКС.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Мальцев П. П. Нанотехнологии в новом технологическом укладе // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 1. С. 3–5.
2. Волков В. С., Баринев И. Н. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 1. С. 30–36.
3. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов : монография. Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2009. 287 с.
4. Астащенко О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 2. С. 24–29.
5. Сергеев В. Е., Воротынец В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.
6. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge₂Sb₂Te₅ materials for phase-change neuron synaptic devices // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 892. P. 162148.
7. Pecherskaya E. A., Gurin S. A., Novichkov M. D. Combined Thin-Film Resistive and Strain-Resistant Structures with Temperature Self-Compensation // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. Vol. 16, № 6. P. 1074–1080. doi: 10.1134/s1027451022060209
8. Сергеев В. Е., Воротынец В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.
9. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление параметрами резистивных структур посредством отжига // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 144–145.
10. Печерская Е. А., Гуринов С. А., Новичков М. Д. Высокотемпературный отжиг многослойных резистивных структур // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 56–61. doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-7
11. Гуринов С. А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 157 с.

References

1. Luchinin V.V., Mal'tsev P.P. Nanotechnology in a new technological order. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2021;23(1):3–5. (In Russ.)
2. Volkov V.S., Barinov I.N. Compensation of temperature error sensitivity of high-temperature semiconductor pressure sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(1):30–36. (In Russ.)
3. Lugin A.N. *Konstruktorско-tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya tonkoplenochnykh pretsizionnykh rezistorov: monografiya = Design and technological principles of designing thin-film precision resistors : monograph*. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2009:287. (In Russ.)
4. Astashenkova O.N., Korlyakov A.V. Control of physico-mechanical parameters of thin films. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2013;(2):24–29. (In Russ.)
5. Sergeev V.E., Vorotyntsev V.M. Development of a modified technology for thermal stabilization of thin-film resistive elements. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):4–9. (In Russ.)
6. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge₂Sb₂Te₅ materials for phase-change neuron synaptic devices. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;892:162148.
7. Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. Combined Thin-Film Resistive and Strain-Resistant Structures with Temperature Self-Compensation. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1074–1080. doi: 10.1134/s1027451022060209
8. Sergeev V.E., Vorotyntsev V.M. Development of a modified technology for thermal stabilization of thin-film resistive elements. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):4–9. (In Russ.)
9. Averin I.A., Pecherskaya R.M. Control of the parameters of resistive structures by annealing. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:144–145. (In Russ.)
10. Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. High-temperature annealing of multilayer resistive structures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):56–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-7
11. Gurin S.A. *Research and development of thin-film heterogeneous structures of sensitive elements of pressure sensors with extreme operating conditions*. PhD dissertation. Saint Petersburg, 2016:157. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Сергеевич Мамонтов

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

Vitaly S. Mamontov

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

Сергей Александрович Гурин

кандидат технических наук,
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: teslananoel@rambler.ru

Sergey A. Gurin

Candidate of technical sciences, head of the laboratory,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Максим Дмитриевич Новичков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

Maksim D. Novichkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
process engineer,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Дмитрий Вячеславович Агафонов

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

Dmitry V. Agafonov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
design engineer,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Камила Ленаровна Закирова

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

Kamila L. Zakirova

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

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

Поступила в редакцию/Received 29.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2024

Принята к публикации/Accepted 16.01.2025

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ОКСИДЫ НА ОСНОВЕ НЕДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т. О. Зинченко¹, У. С. Чихрина²

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

¹scar0243@gmail.com, ²chikhulyana@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой важный класс материалов, широко применяемых в современных технологиях, включая солнечные батареи, дисплеи и сенсорные устройства. Однако традиционно используемый оксид индия, легированный оловом (ITO), сталкивается с рядом проблем, таких как высокая стоимость, ограниченные запасы индия и экологические риски его добычи. В связи с этим актуальной задачей является поиск альтернативных материалов, обладающих схожими характеристиками, но при этом более доступных и экологически безопасных. Цель данного исследования – разработка и исследование альтернативных ППО на основе недефицитных и экономически доступных материалов, таких как оксиды цинка (AZO) и олова (FTO), полученные методом спрей-пиролиза. *Материалы и методы.* Для синтеза ППО использовался метод спрей-пиролиза, который позволяет формировать тонкие пленки с высокой однородностью и хорошими эксплуатационными характеристиками. В качестве прекурсоров применялись растворы солей металлов, таких как ацетаты и нитраты цинка, олова и алюминия. Температура подложки варьировалась от 300 до 500 °С для оптимизации кристаллической структуры пленок. *Результаты.* Полученные покрытия AZO (оксид цинка, легированный алюминием) показали высокую прозрачность (>90 %) в видимом диапазоне, удельное сопротивление $\sim 10^{-3}$ Ом · см, стабильность при температурах до 450 °С; FTO (диоксид олова, легированный фтором) – прозрачность ~ 80 %, удельное сопротивление $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} Ом · см, высокая термостабильность (до 600 °С). Альтернативные материалы продемонстрировали сопоставимые оптические свойства с ITO (оксид индия, легированный оловом), при этом AZO показал более низкую стоимость и экологическую безопасность, а FTO – лучшую термостойкость. *Вывод.* Исследование подтвердило возможность использования AZO и FTO в качестве альтернативных ППО с приемлемыми электрическими и оптическими характеристиками. AZO продемонстрировал высокую прозрачность и низкое удельное сопротивление, что делает его перспективным материалом для гибкой электроники. FTO проявил высокую устойчивость к температурным воздействиям, что делает его предпочтительным для солнечных батарей и других энергоэффективных технологий. Использование данных материалов позволит снизить зависимость от индия, уменьшить экологическую нагрузку и обеспечить устойчивое развитие технологий.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, недефицитные материалы, индий, устойчивое развитие, солнечные батареи, спрей-пиролиз

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Чихрина У. С. Прозрачные проводящие оксиды на основе недефицитных материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 49–56. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-6

TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BASED ON NON-DEFICIT MATERIALS

T.O. Zinchenko¹, U.S. Chikhrina²

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

¹scar0243@gmail.com, ²chikhulyana@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) are an important class of materials widely used in modern technologies, including solar cells, displays, and touch devices. However, the traditionally used tin-doped indium oxide (ITO) faces a number of problems, such as high cost, limited indium reserves, and environmental risks of its mining. In this regard, an urgent task is to search for alternative materials with similar characteristics, but at the same time more accessible and environmentally friendly. The purpose of this study is to develop and study alternative TCOs based on

abundant and affordable materials, such as zinc oxide (AZO) and tin oxide (FTO), obtained by spray pyrolysis. *Materials and methods.* Spray pyrolysis was used to synthesize TCOs, which allows the formation of thin films with high homogeneity and good performance characteristics. Solutions of metal salts, such as zinc, tin, and aluminum acetates and nitrates, were used as precursors. The substrate temperature was varied from 300 to 500 °C to optimize the crystalline structure of the films. *Results.* The obtained AZO (aluminum-doped zinc oxide) coatings showed high transparency (> 90 %) in the visible range, specific resistance of $\sim 10^{-3} \Omega \text{ cm}$, stability at temperatures up to 450 °C.; FTO (fluorine-doped tin dioxide) – transparency of $\sim 80 \%$, specific resistance of $\sim 10^{-3} - 10^{-2} \Omega \text{ cm}$, high thermal stability (up to 600 °C). Alternative materials demonstrated comparable optical properties with ITO (indium oxide doped with tin), while AZO showed lower cost and environmental safety, and FTO – better thermal stability. *Conclusion.* The study confirmed the possibility of using AZO and FTO as alternative TPOs with acceptable electrical and optical characteristics. AZO has demonstrated high transparency and low resistivity, making it a promising material for flexible electronics. FTO has demonstrated high thermal stability, making it a preferred choice for solar cells and other energy-efficient technologies. The use of these materials will reduce dependence on indium, reduce environmental impact, and ensure sustainable development of technologies.

Keywords: transparent conductive oxides, non-critical materials, indium, sustainable development, solar cells, spray pyrolysis

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Synthesis and Research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices" (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Chikhrina U.S. Transparent conductive oxides based on non-deficit materials. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):49–56. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-6

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой уникальный класс материалов, сочетающих высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне спектра и низкое электрическое сопротивление. Благодаря этим свойствам ППО находят широкое применение в ключевых технологиях XXI в., включая солнечные батареи (фотоэлектрические элементы) [1, 2], в которых ППО используются в качестве прозрачных электродов, позволяя солнечному свету проникать в активный слой устройства и обеспечивая эффективное проведение электрического тока.

Популярность ППО обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, миниатюризации устройств и развития устойчивых технологий. Среди всех известных ППО наиболее широко используется оксид индия, легированный оловом (ИТО), который сочетает высокую прозрачность, низкое сопротивление и технологичность в производстве.

Несмотря на свои выдающиеся свойства, ИТО сталкивается с рядом серьезных ограничений:

- 1) индий является редким элементом земной коры, его содержание оценивается в 0,1 часть на миллион. Основным источником индия – побочные продукты переработки цинка и других металлов, что значительно ограничивает доступность сырья;
- 2) из-за ограниченных запасов и растущего спроса цена индия остается высокой и продолжает увеличиваться;
- 3) добыча индия связана с интенсивной разработкой руд, что приводит к высоким затратам и загрязнению окружающей среды [3];
- 4) географическая концентрация запасов индия делает мировые технологии зависимыми от нестабильных поставок, что в будущем может поставить под угрозу развитие высокотехнологичных отраслей.

Эти проблемы стимулируют поиск альтернативных материалов, которые могут заменить индий в производстве прозрачных проводящих оксидов, сохраняя ключевые характеристики, необходимые для их использования.

Преимущества перехода на устойчивые технологии

Переход от использования дефицитных материалов к альтернативам предоставляет ряд значительных преимуществ: экономическая эффективность; снижение экологической нагрузки; устойчивость цепочек поставок; продвижение принципов устойчивого развития.

Данное исследование направлено на разработку решений, которые позволят снизить зависимость от редких природных ресурсов, обеспечивая устойчивое развитие ключевых технологий [4, 5].

Основные материалы для ППО

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой материалы, обладающие уникальным сочетанием высокой прозрачности в видимом спектре (длина волн 380–750 нм) и низкого электрического сопротивления (порядка 10^{-4} – 10^{-3} Ом · см). Эти свойства достигаются благодаря широкозонным полупроводникам, в которых проводимость обеспечивается за счет примесей или дефектов структуры.

Ключевые критерии, определяющие выбор материалов для ППО, включают: высокую прозрачность для видимого света (пропускание >80 %), низкое удельное сопротивление для эффективного переноса заряда, термостабильность и устойчивость к окружающей среде, возможность масштабного производства при низкой себестоимости.

В настоящее время для производства ППО используются несколько традиционных материалов, которые доминируют в промышленности и научных исследованиях: ITO (оксид индия, легированный оловом), ZnO (оксид цинка) и SnO₂ (оксид олова).

ITO (оксид индия, легированный оловом)

ITO – это самый широко используемый материал среди ППО благодаря уникальному сочетанию свойств: высокая прозрачность в видимом спектре (>85 %), низкое удельное сопротивление ($\sim 10^{-4}$ Ом · см), широкая запрещенная зона (3,5–4,0 эВ), что обеспечивает прозрачность для видимого света, отличная технологичность для нанесения тонких пленок с использованием различных методов, включая вакуумное распыление, спрей-пиролиз и магнетронное напыление. Преимущества ITO: наилучшие электрические и оптические свойства среди всех известных ППО; используется в большинстве современных устройств, включая сенсорные экраны, солнечные панели, жидкокристаллические дисплеи и OLED.

Недостатком ITO является то, что индий – редкий элемент и, соответственно, дорогой материал. ITO пленки имеют ограниченную гибкость, что затрудняет их использование в гибкой электронике. А также добыча индия связана с высоким воздействием на окружающую среду. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика по экологической и экономической эффективности ITO с другими материалами.

Таблица 1

Экологическая и экономическая эффективность альтернативных TCO

Материал	Доступность сырья (1 – высокая, 3 – низкая)	Влияние на окружающую среду (1 – низкое, 3 – высокое)	Стоимость (руб./кг)
ITO	2	3	40 000
AZO	1	1	5000
FTO	1	2	7000

ZnO (оксид цинка)

Оксид цинка (ZnO) является перспективной альтернативой ITO благодаря своей доступности, невысокой стоимости и экологической безопасности. ZnO – это полупроводник с широкой запрещенной зоной ($\sim 3,3$ эВ), который обеспечивает хорошую прозрачность. Легирование алюминием (AZO) или галлием (GZO) значительно улучшает его проводящие свойства.

Свойства: высокая прозрачность (>80 %) и широкая запрещенная зона, низкое удельное сопротивление при легировании ($\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} Ом · см), химическая устойчивость и экологическая безопасность, возможность нанесения с помощью низкотемпературных методов, таких как спрей-пиролиз, что делает его подходящим для гибкой электроники и пластиковых подложек.

Преимущества ZnO: цинк – один из наиболее распространенных металлов на Земле; легкость синтеза и высокая совместимость с разными методами нанесения; устойчивость к высокой температуре, что делает его подходящим для использования в жестких условиях. Недостатки ZnO: без легирования его электропроводность остается низкой, что ограничивает

использование в ряде приложений; меньшая стабильность в условиях повышенной влажности или кислой среды по сравнению с ИТО.

SnO₂ (оксид олова)

Оксид олова (SnO₂), особенно в форме фтор-легированного оксида олова (FTO), является еще одним распространенным материалом для ППО. SnO₂ – это широкий полупроводник с широкой запрещенной зоной (~3,6 эВ). Легирование фтором (FTO) повышает его проводящие свойства.

Свойства: высокая прозрачность (>80 %) в видимом диапазоне, отличная химическая и термическая устойчивость (лучше, чем у ИТО и ZnO), удельное сопротивление выше, чем у ИТО (~10⁻³–10⁻² Ом · см), но достаточное для большинства приложений.

Преимущества FTO [6, 7]: высокая устойчивость к экстремальным температурам, что делает его предпочтительным для использования в солнечных панелях; доступность сырья и низкая стоимость производства; экологическая безопасность: олово является менее токсичным и более доступным элементом, чем индий. Недостатки SnO₂: более высокое сопротивление по сравнению с ИТО, что ограничивает его использование в высокотехнологичных устройствах, требующих максимальной проводимости; возможные дефекты в пленках, влияющие на равномерность покрытия.

Таким образом, ИТО остается лидером среди материалов для ППО, однако его дефицит и высокая стоимость стимулируют активные исследования в области разработки альтернатив, таких как ZnO и SnO₂. Выбор материала зависит от области применения, требуемых свойств и экономических факторов.

Проблемы, связанные с использованием индия: экономические и экологические ограничения. В табл. 2 представлено сравнение свойств ППО из различных материалов.

Таблица 2

Сравнение физических и электрических свойств TCO

Материал	Прозрачность (80–100 %)	Электропроводность (С/см)	Температурная стабильность (°С)
ИТО	85	10 ³	300
AZO	90	10 ²	450
FTO	80	10 ³	600

Индий с точки зрения дефицитного материала

Индий является редким и дорогим элементом, использование которого в технологии прозрачных проводящих оксидов (ППО) сталкивается с рядом экономических сложностей. Индий является редким металлом с содержанием в земной коре около 0,1 ppm (частей на миллион). Его доступность значительно ограничена по сравнению с такими элементами, как цинк или олово. Основным источником индия – это побочные продукты переработки руды цинка, меди и олова. Только 5–10 % цинковых руд содержат достаточно индия для экономически целесообразной добычи.

Поскольку индий добывается как побочный продукт, его объемы производства ограничены основным спросом на цинк, медь и олово. Любое снижение добычи этих металлов автоматически приводит к дефициту индия.

Высокая стоимость индия влияет на конечную стоимость продуктов, таких как солнечные панели, дисплеи и сенсорные экраны. Это ограничивает их доступность для массового потребления, особенно в странах с развивающейся экономикой.

Добыча индия требует переработки огромных объемов руды, поскольку содержание индия в цинковых или медных рудах крайне низкое (менее 0,01 %). Извлечение индия требует сложных технологических процессов, которые связаны с высокими затратами энергии, что увеличивает углеродный след производства. Переработка руд сопровождается выделением большого количества токсичных веществ, таких как сернистый газ (SO₂) и тяжелые металлы, которые загрязняют воздух, почву и водоемы [8].

Дефицит и высокая стоимость индия ограничивают развитие технологий, таких как солнечная энергетика, которые необходимы для перехода к устойчивой экономике. Истощение

запасов индия может привести к кризису в высокотехнологичных отраслях, если не будут найдены доступные альтернативы.

Перспективные альтернативы

Для преодоления проблем, связанных с дефицитом индия, активно ведутся исследования по разработке прозрачных проводящих оксидов (ППО) на основе недефицитных, экономически доступных и экологически безопасных материалов.

Оксид цинка (ZnO), легированный алюминием (AZO) в концентрации 1–5 %, представляет собой один из наиболее перспективных материалов благодаря своей доступности и конкурентоспособным свойствам.

Пропускание света в видимом диапазоне достигает 80–90 %, что сравнимо с ИТО. При оптимальных условиях производства сопротивление AZO достигает 10^{-3} – 10^{-4} Ом · см. Широкая запрещенная зона ~3,3 эВ, что обеспечивает прозрачность в видимом спектре. AZO обладает хорошей устойчивостью к термическому воздействию и может использоваться в условиях высоких температур.

Цинк и алюминий широко распространены и легко добываются, что делает AZO экономически выгодным. Эти элементы нетоксичны и имеют низкое воздействие на окружающую среду. AZO можно наносить с использованием низкотемпературных методов (например, спрей-пиролиза), что упрощает интеграцию в гибкую электронику. AZO менее устойчив к влаге и кислым средам, чем традиционные ППО. Электропроводность AZO все еще ниже, чем у ИТО, что требует дальнейших улучшений.

FTO (фтор-легированный SnO₂) является еще одной многообещающей альтернативой благодаря своей высокой устойчивости и доступности сырья.

Пропускание света в видимом диапазоне составляет ~80 %. Удельное сопротивление FTO находится в диапазоне 10^{-3} – 10^{-2} Ом · см, что делает его пригодным для большинства применений. FTO превосходит ИТО и AZO в устойчивости к высоким температурам и воздействию коррозионных сред.

Олово является одним из наиболее распространенных элементов, а фтор также легко доступен. FTO активно используется в солнечных элементах, где требуется высокая термостойкость и имеет минимальное воздействие на окружающую среду [9].

FTO обладает более высоким сопротивлением, чем ИТО, что ограничивает его применение в устройствах, где требуется сверхвысокая проводимость. Более сложный процесс нанесения по сравнению с AZO.

Оксиды меди, такие как Cu₂O (куприт) и CuO (тенорит), являются перспективными материалами для ППО, благодаря их доступности, невысокой стоимости и уникальным физико-химическим свойствам. Cu₂O и CuO являются полупроводниками с широкой запрещенной зоной. Легирование или создание дефектов в структуре может значительно повысить их проводимость.

Оксиды меди обладают высокой прозрачностью в видимом диапазоне, особенно при нанесении в виде тонких пленок. Проводимость оксидов меди ниже, чем у AZO и FTO. Cu₂O и CuO обладают хорошей устойчивостью к ультрафиолетовому излучению.

Помимо AZO, FTO и оксидов меди, исследуются другие оксиды и их комбинации, которые также могут стать перспективными альтернативами.

Оксид титана (TiO₂) – прозрачный материал с широкой запрещенной зоной (~3,2 эВ). Легирование или создание дефектов позволяет улучшить проводимость. Применяется в солнечных элементах и фотокатализаторах. Оксид ванадия (VO₂) интересен из-за свойств термохромизма – способности изменять прозрачность при изменении температуры. Подходит для интеллектуальных окон и термочувствительных устройств.

Синтез прозрачных проводящих оксидов

Для получения недефицитных прозрачных проводящих оксидов применялся метод спрей-пиролиза, который зарекомендовал себя как простой и эффективный подход к формированию тонких пленок. Метод основан на распылении прекурсорного раствора на нагретую подложку, где в результате термического разложения прекурсоров образуется оксидный слой. В качестве прекурсоров использовались растворы солей, таких как ацетаты или нитраты металлов, в сочетании с растворителями (например, водой или спиртом) и стабилизирующими

добавками. Температура подложки варьировалась от 300 до 500 °С в зависимости от материала, чтобы обеспечить полное разложение прекурсоров и формирование однородных слоев с заданной структурой и толщиной [10].

Методы анализа и характеристики

Изучение свойств синтезированных ППО проводилось с использованием различных аналитических методов. Оптическая пропускная способность измерялась методом УФ-Вид спектроскопии, что позволило оценить прозрачность материалов в видимом диапазоне и ширину запрещенной зоны. Электропроводность определялась методом четырех зондов, что обеспечивало высокую точность измерения удельного сопротивления пленок. Для анализа микроструктуры использовалась электронная микроскопия (ЭМ), которая позволила визуализировать морфологию поверхности, и рентгеновская дифракция (РД), применяемая для определения фазового состава и кристаллической структуры [6, 7].

Для оценки эффективности предложенных альтернативных ППО их свойства сравнивались с традиционным ИТО. В ходе экспериментов изучались оптические и электрические параметры всех материалов, включая прозрачность, проводимость и структуру пленок. Такой подход позволил выявить преимущества и недостатки каждого материала, что дает возможность обоснованно выбирать наиболее подходящий для конкретных применений [8, 9].

Экологические и экономические преимущества

Переход от использования дефицитных материалов, таких как индий, к более доступным и распространенным элементам, например, цинку или олову, способствует значительному снижению экологической нагрузки. Добыча и переработка индия сопряжены с серьезными экологическими рисками, включая разрушение ландшафтов, загрязнение водных ресурсов и выбросы токсичных веществ. В отличие от этого, добыча цинка и олова является более экологически безопасной и менее ресурсозатратной. Кроме того, использование недефицитных материалов способствует уменьшению зависимости от редких элементов, что снижает давление на экосистемы и способствует сохранению биологического разнообразия.

Потенциальное применение

Альтернативные прозрачные проводящие оксиды (ППО) обладают широкими возможностями интеграции в различные современные технологии. В солнечных панелях они могут использоваться в качестве прозрачных электродов, обеспечивая эффективное преобразование солнечной энергии в электрическую. В дисплеях, включая жидкокристаллические (LCD) и органические светодиоды (OLED), такие материалы применяются для создания прозрачных электродов, обеспечивающих высокое качество изображения и долговечность устройств [6, 7, 9]. Кроме того, ППО находят применение в энергосберегающих покрытиях для окон, где они помогают снижать теплопотери и повышать энергоэффективность зданий. Таким образом, использование недефицитных ППО открывает широкие перспективы для их применения в различных областях, способствуя развитию устойчивых и экологически безопасных технологий.

Полученные свойства недефицитных материалов

Недефицитные прозрачные проводящие оксиды (ППО), такие как алюминий-легированный оксид цинка (AZO), фтор-легированный оксид олова (FTO) и оксиды меди, демонстрируют высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне. Например, AZO-пленки могут обеспечивать пропускание света более 80 %, что делает их подходящими для использования в солнечных панелях и дисплеях. Электропроводность этих материалов зависит от концентрации легирующих элементов и условий синтеза. AZO, например, обладает удельным сопротивлением, сопоставимым с ИТО, что позволяет использовать его в качестве эффективного прозрачного электрода. Термическая стабильность недефицитных ППО также является важным параметром. FTO-пленки, например, могут выдерживать температуры до 600 °С, что расширяет их область применения в устройствах, работающих при повышенных температурах.

Недефицитные ППО обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционным ИТО. Во-первых, они используют более доступные и дешевые материалы, что снижает стоимость

производства. Во-вторых, некоторые из них, такие как FTO, обладают высокой термической стабильностью, что расширяет их область применения.

Однако альтернативные ППО также имеют некоторые ограничения. Например, AZO может иметь несколько более высокое удельное сопротивление по сравнению с ITO, что может ограничивать его применение в некоторых высокоскоростных электронных устройствах. Использование недефицитных материалов, таких как AZO и FTO, способствует снижению экологической нагрузки. Добыча и переработка индия, используемого в ITO, связаны с экологическими рисками, включая загрязнение водных ресурсов и выбросы токсичных веществ. В отличие от этого, добыча цинка и олова, используемых в AZO и FTO, является более экологически безопасной и менее ресурсозатратной.

Недефицитные материалы, такие как цинк и олово, более доступны и дешевле по сравнению с индием. Это позволяет снизить стоимость производства ППО, что особенно важно для массового производства солнечных панелей и дисплеев. Кроме того, использование более доступных материалов снижает зависимость от редких и дорогих элементов, что делает производство более устойчивым и экономически выгодным.

Заключение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) играют ключевую роль в современном технологическом прогрессе, особенно в таких областях, как солнечные панели, дисплеи и энергосберегающие покрытия. Алюминий-легированный цинк-оксид (AZO), фтор-легированный олово-оксид (FTO) и другие подобные материалы проявляют достойные свойства в качестве ППО, такие как высокая прозрачность, хорошая электропроводность и термическая стабильность.

Сравнение альтернативных материалов с традиционными ППО, такими как ITO, показывает, что хотя они обладают рядом преимуществ, таких как доступность и экологичность, в некоторых случаях они могут уступать по электропроводности. Однако дальнейшее совершенствование технологий синтеза и обработки этих материалов позволяет значительно улучшить их характеристики и повысить их эффективность.

Таким образом, переход на использование недефицитных материалов для ППО представляет собой не только экономически выгодное, но и экологически оправданное решение, которое способствует развитию более устойчивых и инновационных технологий.

Список литературы

1. Snyder R. L., Karpinski M. Transparent Conducting Oxides: Properties and Applications // Materials Science and Engineering R: Reports. 2014. Vol. 83. P. 1–45. doi: 10.1016/j.mser.2014.03.001
2. Klaassen M. T., Smith W. E. Aluminum-doped Zinc Oxide Thin Films for Transparent Conducting Electrodes // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 111, № 3. P. 033706. doi: 10.1063/1.3675572
3. Chen C., Wang X. Emerging Transparent Conducting Oxide Materials: New Perspectives and Challenges // Journal of Materials Chemistry. 2019. Vol. 7, № 16. P. 4861–4873. doi: 10.1039/C9TC01421A
4. Jin Y., Zhang Z., Zhou Y. Environmental Impact of the Use of Indium in Transparent Conducting Oxides // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49, № 12. P. 7455–7463. doi: 10.1021/acs.est.5b01801
5. Murray C. J., Knapp J. A. Indium Resources and Recycling for Future Needs: A Global Overview of Indium Usage and Sustainability // Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 116. P. 24–34. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.012
6. Bae S. H., Kim H. J. A Review on Recent Advances in Transparent Conducting Oxides (TCOs) for Thin Film Solar Cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. Vol. 150. P. 198–210. doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.016
7. Brus L. E., Saraf R. Transparent Conducting Oxides: A Comprehensive Review of Materials and Their Properties // Materials Science and Engineering. 2013. Vol. 182, № 2. P. 170–179. doi: 10.1016/j.mseb.2013.01.005
8. Ma Z., Wang X. Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) Thin Films for Transparent Conducting Electrodes: A Review // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. Vol. 29, № 4. P. 2725–2736. doi: 10.1007/s10854-018-0235-4
9. Liu Z., Yang M. Synthesis of High-quality Transparent Conducting Oxides Using Spray Pyrolysis // Journal of Vacuum Science & Technology. 2014. Vol. 32, № 4. P. 041505. doi: 10.1116/1.4882570
10. Zhao X., Wang Y. Environmental and Economic Aspects of Transparent Conducting Oxides (TCOs): A Comparison of ITO, AZO, and FTO Materials // Journal of Materials Chemistry A. 2017. Vol. 5, № 20. P. 9798–9806. doi: 10.1039/C7TA01923H

References

1. Snyder R.L., Karpinski M. Transparent Conducting Oxides: Properties and Applications. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2014;83:1–45. doi: 10.1016/j.mser.2014.03.001
2. Klaassen M.T., Smith W.E. Aluminum-doped Zinc Oxide Thin Films for Transparent Conducting Electrodes. *Journal of Applied Physics*. 2012;111(3):033706. doi: 10.1063/1.3675572
3. Chen C., Wang X. Emerging Transparent Conducting Oxide Materials: New Perspectives and Challenges. *Journal of Materials Chemistry*. 2019;7(16):4861–4873. doi: 10.1039/C9TC01421A
4. Jin Y., Zhang Z., Zhou Y. Environmental Impact of the Use of Indium in Transparent Conducting Oxides. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(12):7455–7463. doi: 10.1021/acs.est.5b01801
5. Murray C.J., Knapp J.A. Indium Resources and Recycling for Future Needs: A Global Overview of Indium Usage and Sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017;116:24–34. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.012
6. Bae S.H., Kim H.J. A Review on Recent Advances in Transparent Conducting Oxides (TCOs) for Thin Film Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016;150:198–210. doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.016
7. Brus L.E., Saraf R. Transparent Conducting Oxides: A Comprehensive Review of Materials and Their Properties. *Materials Science and Engineering*. 2013;182(2):170–179. doi: 10.1016/j.mseb.2013.01.005
8. Ma Z., Wang X. Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) Thin Films for Transparent Conducting Electrodes: A Review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018;29(4):2725–2736. doi: 10.1007/s10854-018-0235-4
9. Liu Z., Yang M. Synthesis of High-quality Transparent Conducting Oxides Using Spray Pyrolysis. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 2014;32(4):041505. doi: 10.1116/1.4882570
10. Zhao X., Wang Y. Environmental and Economic Aspects of Transparent Conducting Oxides (TCOs): A Comparison of ITO, AZO, and FTO Materials. *Journal of Materials Chemistry A*. 2017;5(20):9798–9806. doi: 10.1039/C7TA01923H

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ульяна Сергеевна Чихрина

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

Ulyana S. Chikhrina

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

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

Поступила в редакцию / Received 25.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.04.2025

УДК 004.023
doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

КВАЗИНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

В. Р. Александров¹, Н. В. Азарнов², А. А. Щеткин³, А. П. Кушнир⁴, Р. М. Огорельцев⁵

^{1,2,3} Научно-производственное предприятие «Исток» имени Шокина, Фрязино, Московская обл., Россия
^{1,3} МИРЭА – Российский технологический университет (филиал в г. Фрязино), Фрязино, Московская обл., Россия
^{4,5} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ aaschetkin@istokmw.ru
⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ roman-ogoreltcev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном производстве все большее значение приобретает оптимизация производственных процессов. Рассмотрены принципы построения пути автономным мобильным роботом, в том числе в среде со статическими и динамическими препятствиями. Целью работы является снижение затрат на логистические системы, построенные на основе автономных мобильных роботов. *Материалы и методы.* Исследования основываются на взаимодействии MES/APS систем (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) в сочетании с IIoT (Industrial Internet of Things) и мобильными роботами. *Результаты.* Предложен алгоритм релейного управления с искусственной зоной нечувствительности и алгоритм обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики. *Выводы.* Предложенные алгоритмы интеллектуального управления позволяют упростить реализацию и снизить стоимость логистического проекта на основе применения автономных роботов и отказаться от ряда дорогостоящего программного обеспечения.

Ключевые слова: цифровое производство, интернет вещей, автономный робот, логистика, навигация, обход динамических препятствий, нечеткая логика, SimInTech, IIoT.Istok, MES, APS

Для цитирования: Александров В. Р., Азарнов Н. В., Щеткин А. А., Кушнир А. П., Огорельцев Р. М. Квазинечеткое управление автономным мобильным роботом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 57–67. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

UASI-PRECISE CONTROL OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

V.R. Aleksandrov¹, N.V. Azarnov², A.A. Schetkin³, A.P. Kushnir⁴, R.M. Ogoreltcev⁵

^{1,2,3} Research and Production Enterprise "Istok" named after A.I. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia
^{1,3} MIREA – Russian Technological University (Fryazino branch), Fryazino, Moscow region, Russia
^{4,5} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ aaschetkin@istokmw.ru
⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ roman-ogoreltcev@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern production, optimization of production processes is becoming increasingly important. This article discusses the principles of path construction by an autonomous mobile robot, including in an environment with static and dynamic obstacles. *Materials and methods.* The research is based on the interaction of MES/APS systems (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) in combination with IIoT (Industrial Internet of Things) and mobile robots. *Results.* An algorithm of relay control with an artificial dead zone and an algorithm of obstacle avoidance in a local environment based on quasi-fuzzy logic are proposed. *Conclusions.* The proposed intelligent control algorithms allow reducing the cost of a logistics project based on autonomous robots and abandoning a number of expensive software.

Keywords: digital manufacturing, Internet of Things, autonomous robot, logistics, navigation, dynamic obstacle avoidance, fuzzy logic, SimInTech, IIoT.Istok, MES, APS

For citation: Aleksandrov V.R., Azarnov N.V., Schetkin A.A., Kushnir A.P., Ogoreltcev R.M. Uasi-precise control of an autonomous mobile robot. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):57–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

Введение

Среди приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития РФ намечен переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным комплексам, системам искусственного интеллекта. Важность развития информационно-телекоммуникационных систем и робототехнических комплексов отмечается также в приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники РФ. Все это говорит о важности разработок в сфере автономных транспортных систем в сфере цифровизации производства, а также разработки и внедрения новых методов и средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации приборостроительного производства, обеспечивающих повышение производительности, снижение трудоемкости и повышение экономичности производства с учетом решения вопросов обеспечения надежности, экологической безопасности окружающей среды.

Материалы и методы

В рамках развития «Передовой инженерной школы СВЧ-электроники» на базе АО «НПП "Исток" им. Шокина» проводится комплекс работ по созданию «Цифрового производства» и «Промышленного интернета вещей» – *IIoT.Istok* [1]. В систему «Цифрового производства» входят в настоящее время такие подсистемы, как «Технология» (далее – CAPP), «Нормативно-справочная документация» (далее – MDM), «Платформа промышленного интернета вещей» (далее – *IIoT.Istok*), «Планирование производства» (далее – APS/MES), которые решают целый комплекс задач (рис. 1, 2).

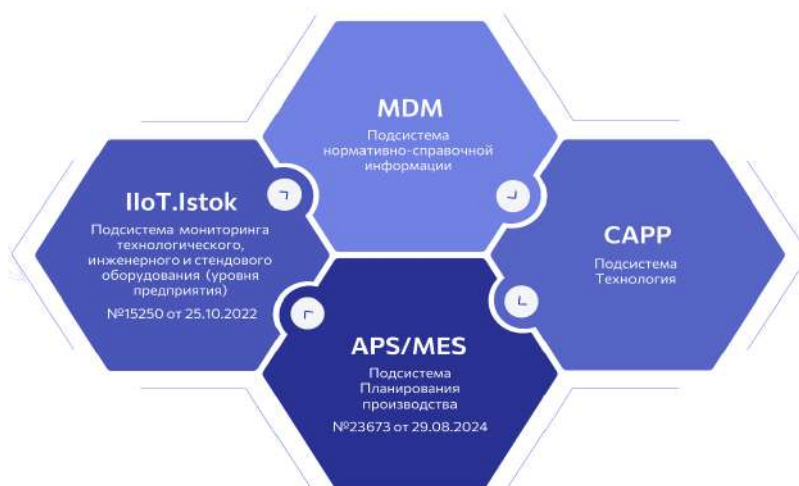


Рис. 1. Подсистемы программного продукта «Цифровое производство» АО «НПП "Исток" им. Шокина»



Рис. 2. Задачи, решаемые подсистемами ACU предприятия

Подсистема планирования производства APS/MES предназначена, в частности, для автоматизированного/автоматического построения оптимального производственного плана вплоть до сменно-суточных заданий и реализована на основе технологий больших данных и искусственного интеллекта. В число решаемых задач входят такие, как формирование производственной программы, составление производственного расписания для каждого рабочего места, определение потребности в материалах, комплектующих и инструменте, учет и контроль поставок, хранения и использования в производстве материалов и комплектующих, учет отгрузки и хранения готовой продукции, выдача и контроль сменных заданий на выполнение производственного плана, выдача требований на материалы и комплектующие на рабочие места со склада и т.д. Для полной автоматизации технологического процесса необходимо связать данные задачи информационными и материальными потоками. Одновременно с этим от технологического и инженерного оборудования через систему IIoT.Istok поступают данные о работоспособности и в каких циклах оборудование работает и в том числе потребность посредством ручных статусов в инструменте или заготовках.

В соответствии со сменным заданием определяются потребности в материалах, комплектующих и инструменте, данные о которых в цифровом виде трансформируются в наряд на бумажном носителе на выдачу материалов и комплектующих на рабочие места со склада. Параллельно формируется цифровой запрос для мобильного комплекса (рис. 3).

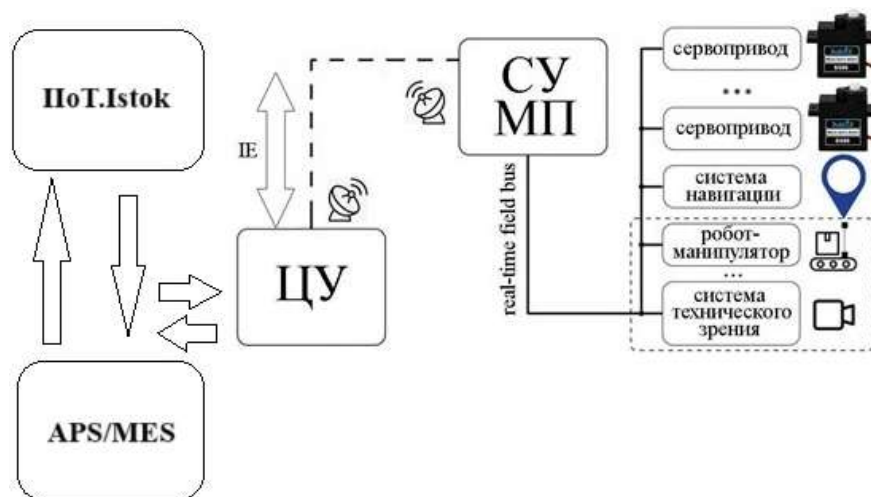


Рис. 3. Схема структуры программного обеспечения мобильного комплекса

Мобильный комплекс состоит из автономной мобильной платформы с установленным на ней роботом-манипулятором (далее – РМ) коллаборативного типа (далее – коботом) и включает в себя систему управления мобильной платформой (далее – СУМП), технического зрения, навигации. Центр управления (далее – ЦУ) связан с системой управления верхнего уровня предприятия по сети Ethernet, а с мобильным комплексом – посредством LoRaWAN. Данный вид связи хорошо зарекомендовал себя при работе в сложных условиях и на большие расстояния [2].

Автономные мобильные платформы представляют собой эффективное логистическое решение, которое находит широкое применение в современных производственных системах. Эти технологии повышают производительность труда, позволяя сократить затраты, увеличить скорость обработки грузов и повысить общую эффективность операций [3].

Для обеспечения бесперебойного движения в условиях, полных непредвиденных обстоятельств, и повышения общей эффективности логистических операций важную роль играет планирование пути с обходом препятствий, как статических, так и динамических.

Среди автономных мобильных роботов можно выделить два основных направления: автоматизированные направляемые транспортные средства (англ. *Automated Guided Vehicles*, далее – AGV) и мобильные роботизированные системы (англ. *Automated Mobile Robots*, далее – AMR). AGV представляют собой устройства, которые следуют заранее запрограммированным маршрутам, опираясь на магнитные, оптические или лазерные метки. Эти платформы хорошо подходят для выполнения задач при постоянных условиях, таких как доставка материалов между складами или внутри производственных зон по строго фиксированным маршрутам, например, по проложенной магнитной ленте. Однако эта жесткая «трамвайная» зависимость

от маршрута ограничивает гибкость и адаптивность таких систем и делает невозможным их использование в динамично изменяемой среде.

Платформы класса AMR представляют собой более продвинутые системы, способные самостоятельно анализировать свою окружающую среду и строить маршрут в реальном масштабе времени. Они используют достаточно сложные алгоритмы навигации и систему сенсоров для получения информации о препятствиях и автоматического их объезда. Это позволяет AMR эффективно работать в менее предсказуемых условиях, где они могут адаптироваться к изменениям окружающей обстановки, что значительно увеличивает их производительность и безопасность по отношению к персоналу, снижает риски простоя и ошибок, которые могут произойти при использовании жестко запрограммированных маршрутов. Благодаря возможности быстрого реагирования на изменения, например перемещение других объектов или возникновение новых препятствий, роботы AMR считаются более эффективными по сравнению с AGV в условиях динамично изменяемых и сложных логистических сред [4]. Вместе с тем стоимость таких роботов существенно отличается благодаря продвинутому набору интеллектуальных сенсоров (измерительных преобразователей) и более мощному программному обеспечению. Это обусловлено необходимостью использования сложного и дорогого оборудования (плоскостные и объемные лидары, более мощные вычислительные средства), требующегося для таких популярных при создании AMR алгоритмов, как SLAM (*simultaneous localization and mapping* – одновременная локализация и построение карты) [5]. Так, например, автономный мобильный робот Foxtech Custom Knapsak AGV BF100 стоит почти в два раза дешевле по сравнению с моделью AIVISON AMR AMB150 со SLAM. Еще больший разброс в ценах имеют датчики расстояния и системы видеонаблюдения. Поэтому целью работы является снижение затрат на логистические системы, построенные на основе автономных мобильных роботов.

Теоретические основы построения пути

Двухслойная архитектура системы планирования пути стала популярной концепцией в разработке автономных мобильных роботов и других систем, работающих в изменяющихся и сложных окружениях [6, 7]. Основные причины выбора именно этого подхода связаны с повышением эффективности, надежности и гибкости процессов планирования, а также с возможностью более эффективного управления ресурсами.

К первому слою относится уровень глобального планирования маршрута. Данный уровень планирования требует достаточно низкой частоты обновления и строит грубый маршрут по карте согласно выданному первичному полетному заданию от системы выдачи заказов робота. Результатом работы данной системы является построение глобального маршрута. Для решения этой задачи разработаны различные теоретические модели, на основе которых строятся алгоритмы, определяющие наиболее эффективные пути. Основой большинства алгоритмов построения пути служит графовая теория, где окружение моделируется в виде графа, состоящего из узлов и ребер. Узлы представляют собой ключевые точки, такие как местоположения или цели, а ребра – возможные маршруты между этими точками, с определением веса, который может отражать расстояние, время, затраты и другие параметры. Классические алгоритмы вроде алгоритма Дейкстры и алгоритма A* позволяют находить кратчайшие пути от одной вершины графа к другим, учитывая различные ограничения и условия.

Ко второму слою относится уровень локального планирования и предотвращения столкновений. Данный уровень планирования требует высокой частоты обновления и строит уточненный маршрут по данным от датчиков обнаружения препятствий и системы локализации автономной транспортной платформы с наименьшими отклонениями от ранее намеченного глобального пути. Результатом работы данной системы является траектория движения в локальной области.

Метод потенциальных полей

Метод потенциальных полей является одной из наиболее популярных стратегий локального планирования для автономных мобильных роботов. Он основан на концепции создания виртуального поля, где цели и препятствия рассматриваются как источники потенциальной энергии, которые воздействуют на движение робота. Метод объединяет идеи из физики и теории управления для обеспечения безопасного и оптимального перемещения к конечной точке маршрута.

Поле цели создается целевой точкой робота и направляет его к цели. Чем ближе робот к цели, тем сильнее притяжение. Поле препятствий (рис. 4) создается от препятствий к роботу и предназначено для предотвращения столкновений. Чем ближе робот к препятствию, тем сильнее будет отталкивание.

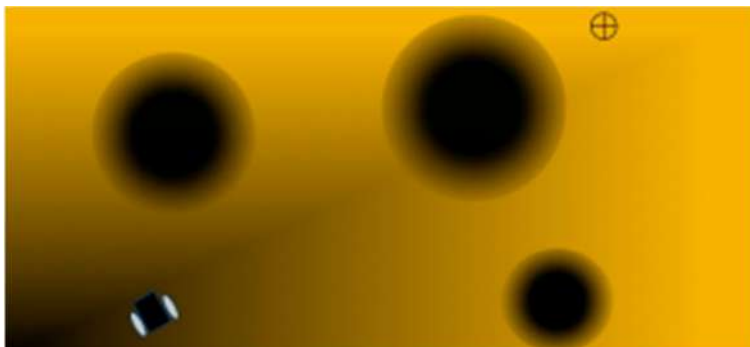


Рис. 4. Пример визуализации карты потенциальных полей

Робот перемещается в направлении градиента общего потенциального поля, что обеспечивает его движение к цели с избеганием препятствий.

Метод потенциальных полей относительно прост в понимании и реализации. Он не требует сложных математических моделей или больших вычислительных ресурсов. Такие потенциальные поля позволяют роботам быстро реагировать на изменения в окружающей среде. Если препятствие появляется внезапно, робот может мгновенно изменить направление движения для его обхода. Потенциальные поля позволяют роботам работать в динамических средах, где объекты могут перемещаться, поскольку поля находятся в постоянном обновлении.

Однако одним из основных недостатков метода является возможность застревания робота в локальных минимумах [8]. Если робот оказывается в такой точке, он может не иметь возможности двигаться к цели, поскольку силы отталкивания и притяжения могут компенсировать друг друга. Также в случаях сложной конфигурации пространства с множеством препятствий потенциальные поля могут создавать неравномерные или труднопредсказуемые траектории, что негативно сказывается на плавности движения. При этом следует учесть, что эффективность метода во многом зависит от правильно подобранных коэффициентов притяжения и отталкивания. Неправильные настройки могут привести к неверному поведению робота.

Метод клеточной декомпозиции

Метод клеточной декомпозиции заключается в разбиении пространства перемещения на сетку ячеек, каждая из которых может быть либо проходимой, либо непроходимой. Это существенно упрощает задачу планирования пути и дает возможность применять разнообразные алгоритмы поиска для нахождения оптимального маршрута. Основу метода составляет представление пространства в виде двумерной или трехмерной решетки, где каждая ячейка соответствует определенной области, а ее состояние определяется на основании информации о препятствиях и окружающей среде.

При реализации клеточной декомпозиции пространство перемещения делится на небольшие ячейки. Каждая из них имеет статус: проходимая она или нет. Проходимые ячейки позволяют роботу двигаться, а непроходимые представляют собой зоны, которые необходимо обойти.

Клеточная декомпозиция может быть статической и динамической. В статической декомпозиции информация о препятствиях фиксирована и не изменяется. Это позволяет заранее планировать пути, основываясь на известных данных. Динамическая декомпозиция, напротив, отслеживает изменения в окружающей среде, такие как, например, перемещение препятствий или изменение конфигурации областей, что критически важно для мобильных роботов, работающих в реальных условиях, где обстановка может меняться.

При использовании клеточной декомпозиции основная задача заключается в определении состояния ячеек, в формировании сетки занятости. Для этого используются различные сенсоры, такие как лазерные сканеры, камеры и ультразвуковые датчики. Эти устройства помогают собирать данные о пространстве вокруг робота. После сбора информации данные обрабатываются, что приводит к созданию карты, на которой отображается проходимость ячеек (рис. 5).

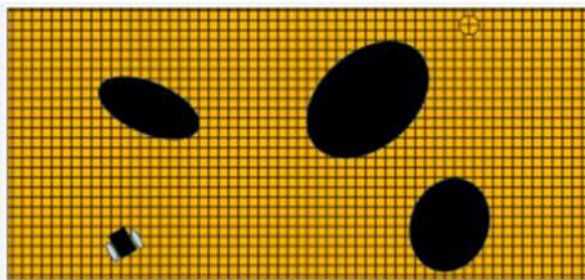


Рис. 5. Пример визуализации сетки занятости

Алгоритмы поиска пути, такие как A^* и алгоритм Дейкстры, используют для нахождения маршрута среди проходимых ячеек. Эти алгоритмы обеспечивают эффективный поиск оптимальных путей, минимизируя затраты на перемещение, например, по критериям расстояния или времени. Поскольку ячейки представляют собой дискретные объекты, поиск маршрута осуществляется быстрее и проще по сравнению с непрерывным пространством.

Метод клеточной декомпозиции имеет несколько ключевых преимуществ. Во-первых, он обеспечивает простое визуальное представление карты, что помогает операторам лучше понимать, как робот будет перемещаться в пространстве. Во-вторых, клеточная декомпозиция хорошо интегрируется с другими методами навигации и планирования, такими как обновление карты, адаптация к изменениям в окружении и оптимизация перемещения. Это позволяет роботу более эффективно реагировать на различные пространственные изменения, возникающие в процессе работы.

Однако метод не лишен недостатков. Одним из основных является необходимость тщательного выбора размера ячеек. Если ячейки слишком большие, это может привести к потере важных детализаций на карте, что затруднит поиск оптимального маршрута. С другой стороны, если ячейки слишком маленькие, это увеличивает размер графа, что ведет к большему времени вычисления маршрута [9].

Еще одним значительным ограничением является необходимость регулярного обновления информации о состоянии ячеек. Быстрые изменения в окружающей среде могут приводить к тому, что робот не сможет адекватно реагировать на новую информацию. Это в конечном итоге может повысить риск столкновений или привести к неоптимальным путям.

Метод клеточной декомпозиции является мощным инструментом для планирования пути роботов, однако его эффективное применение требует тщательного выбора параметров и постоянной адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды.

На рис. 6 приведено окно графического интерфейса в среде Matlab для процесса моделирования движения робота в соответствии с предложенным алгоритмом определения безопасного пути на основе матричных вычислений и сопоставления координат препятствий и координат робота [10].



Рис. 6. Графический интерфейс Matlab для процесса моделирования движения робота

Результат моделирования безопасного маршрута движения по участкам местности показан на рис. 7.

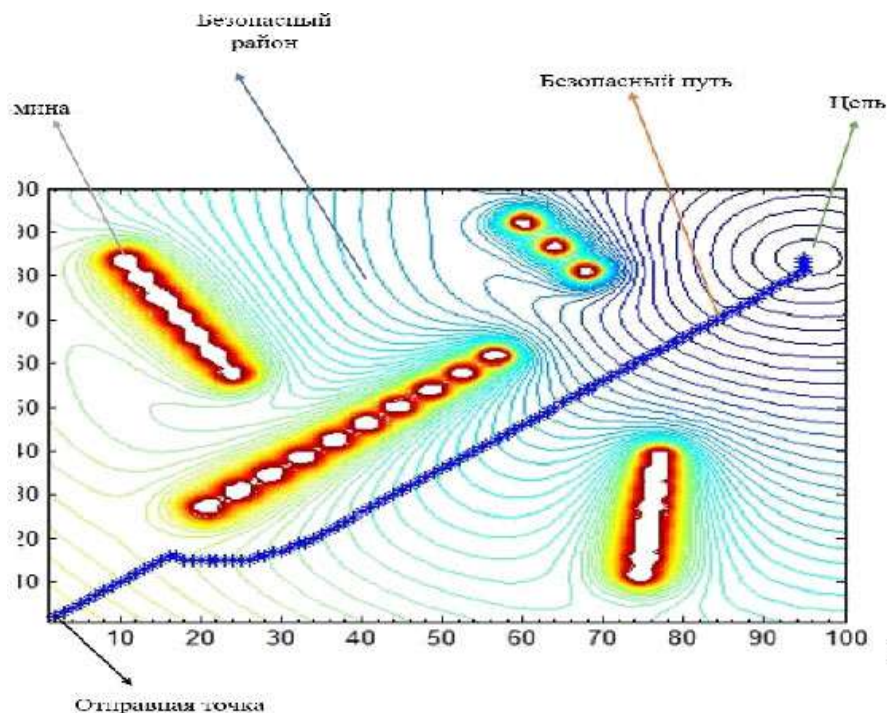


Рис. 7. Результат расчета траектории безопасного маршрута

Недостатком данного алгоритма с точки зрения применимости в условиях производственных помещений является необходимость предварительного ввода (в автоматическом или ручном режимах) координат препятствий.

Очень важным с точки зрения эффективности (в первую очередь, быстродействия и надежности) является распределение полномочий между ЦУ и СУМП (см. рис. 3). С точки зрения экономии ресурсов необходимо решение с централизованной системой управления типа клиент-сервер, однако данное решение имеет много минусов. Достаточно сложные задачи навигации требуют большой загрузки информационно-управляющего канала и передачи объемного потока видеоизображения. Если же речь идет о нескольких одновременно работающих мобильных платформах (далее – рой роботов), то на беспроводную сеть будет создаваться чрезмерная нагрузка, что может привести к перегрузке как сети, так и сервера. В этой связи представляется оптимальным «переложить» максимальное количество функций на сами мобильные платформы и разгрузить тем самым беспроводную сеть. В такой постановке задачи роль сервера сводится к выдаче задания, контролю его исполнения и решению возможных внештатных ситуаций, в которые могут попасть мобильные платформы.

При такой архитектуре неизбежно возрастет стоимость автономных мобильных платформ. Чтобы этого не произошло, на стадии проекта возможно заложить в конструкцию компоненты с минимальной стоимостью, однако более дешевые комплектующие (сенсоры, программируемые логические контроллеры (далее – ПЛК) и т.д.) не всегда могут обеспечить заданные алгоритмы управления, например, нечеткую логику.

Одним из возможных путей решения является использование более эффективных алгоритмов управления, которые на базе стандартных языков МЭК позволяют расширить технологические возможности недорогих ПЛК.

В качестве такого решения можно предложить, например, алгоритм релейного управления с искусственной зоной нечувствительности, который, по сути, является цифровым, но имеет три состояния – регулирование «вверх», регулирование «вниз» и промежуточную зону «без изменения». Данный алгоритм близок к нечеткой логике, но может быть реализован на любом стандартном логическом контроллере без использования операторов фазификации и дефазификации. В качестве примера приведены результаты работы схем, построенных на основе нечеткой логики с фазификацией по Гауссу (рис. 8) и обычной (рис. 9) логики.

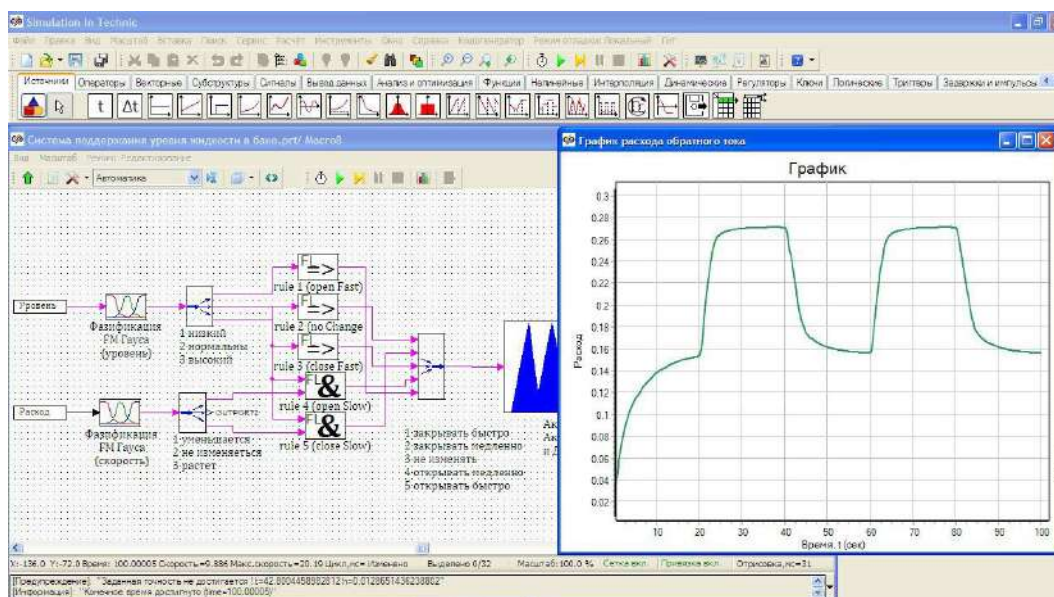


Рис. 8. Модель системы управления на основе нечеткой логики

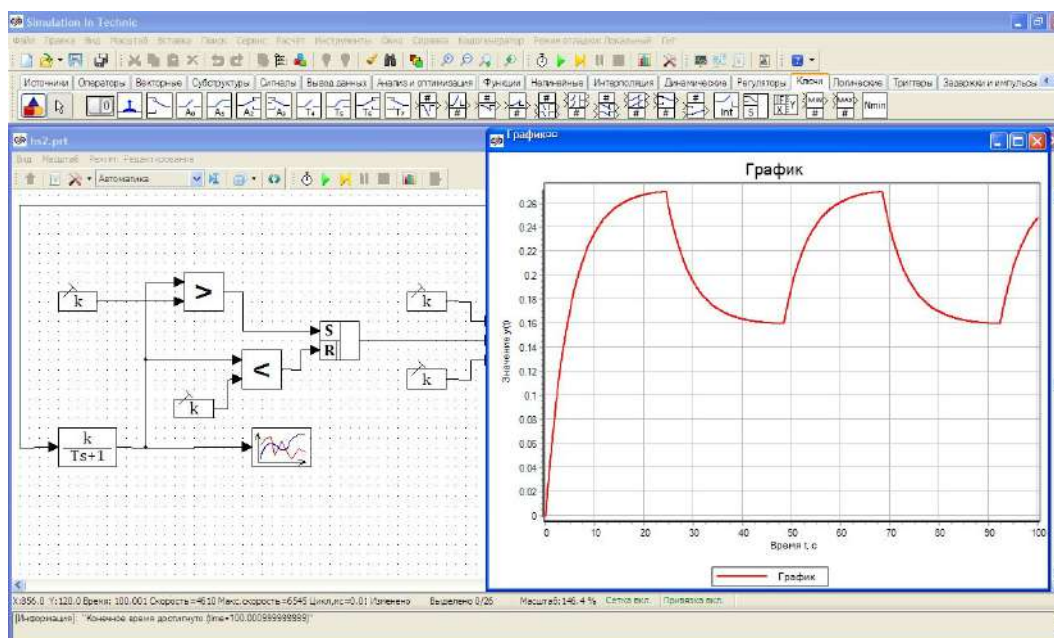


Рис. 9. Модель системы управления на основе обычной логики

С точки зрения объезда препятствий желательно, чтобы система отличала статическое препятствие от динамического. К последним следует отнести, в первую очередь, людей, которые могут оказаться на пути следования робота, т.е. транспортное средство должно обладать свойством коллаборативности.

Наиболее просто данная задача решается на основе интеллектуальной системы распознавания образов, однако имеет высокую стоимость.

Снижение стоимости может быть достигнуто на основе предлагаемого алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики (рис. 10).

Предлагается идентифицировать препятствие путем сравнения характеристик в трех зонах – дальней, средней и ближней. Исходными данными для анализа является двоичная информация – есть препятствие/нет препятствия.

На эту информацию накладываются дополнительные сведения о стабильности препятствия во времени [11]. Если характеристика препятствия постоянна во всех трех зонах, то эту помеху с высокой степенью вероятности можно считать статической, в противном случае – динамической помехой, что требует более строгих правил обхода.

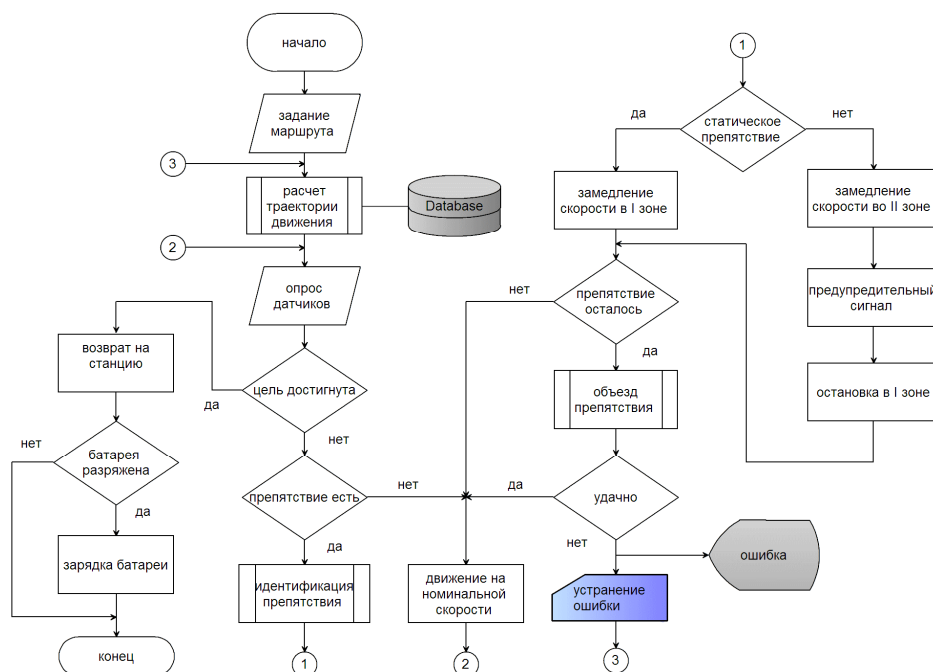


Рис. 10. Блок-схема алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики

Заключение

В целях повышения эффективности управления возможно применение алгоритма релейного управления с искусственной зоной нечувствительности, реализация которого возможна на стандартном логическом контроллере.

Решение задачи объезда препятствий может быть достигнуто применением алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики.

Применение предложенных алгоритмов управления позволяет расширить технологические возможности стандартных программируемых контроллеров, снизить стоимость проекта на основе применения автономных мобильных роботов и отказаться от ряда дорогостоящего программного обеспечения.

Список литературы

1. Программный продукт «Цифровое производство». URL: <https://istokmw.ru/digital-production/>
2. Зикирбай К. Е., Алимбаева Ж. Н., Алимбаев Ч. А. [и др.] Система интеллектуального учета и управления коммунальными ресурсами на основе технологии LoRaWAN // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 6–19. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-1 EDN: FALUYD
3. Хаблов Д. В. Модель управления складским транспортным роботом с адаптивным планированием пути // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : тр. XVI Междунар. конф. (г. Москва, 26–28 сентября 2023 г.). М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2023. С. 1041–1046. doi: 10.25728/mlsd.2023.1041 EDN: BFCPSZ
4. Яковлева Е. А., Моторкин А. С., Капустин Д. Р. Выбор системы роботизированной автоматизации процессов на производстве // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. (г. Санкт-Петербург, 13–14 октября 2022 г.). СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. Ч. 3. С. 357–362. doi: 10.18720/SPBPU/2/id23-499 EDN: KTMNDJ
5. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5 EDN: TBKHZY
6. Бросалин Д. О., Гуренко Б. В., Медведев М. Ю. Интеграция локального и глобального планировщиков в систему управления мобильным роботом // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 6 (236). С. 8–24. doi: 10.18522/2311-3103-2023-6-8-24 EDN: WQWOYW
7. Мамедова Т. А. К., Алиева Н. Р. К. Планирование пути мобильного робота в динамических средах: обзор // Endless Light in Science. 2022. № 6-6. С. 156–165. EDN: NVMVDI
8. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Барашков А. А. Вопросы построения потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 65–70. doi: 10.15372/AUT20190407 EDN: WHYVDB
9. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15–58. doi: 10.24108/mathm.0118.0000098 EDN: YWFAYD

10. Кушнир А. П., Зейн Алдин А. Автономный роботизированный комплекс «Jad» // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сб. докл. Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М. : РТУ МИРЭА, 2021. Т. 2. С. 76–81.
11. Холопов В., Кушнир А., Курнасов Е. [и др.]. Разработка цифровой системы мониторинга технологического процесса производства на основе индекса состояния оборудования // Конференция молодых ученых России по электротехнике и электронике IEEE 2017 (1–3 февраля 2017 г., Санкт-Петербург). СПб. : ЛЭТИ, 2017. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910692

References

1. *Programmnyy produkt «Tsifrovoye proizvodstvo» = The software product "Digital production".* (In Russ.). Available at: <https://istokmw.ru/digital-production/>
2. Zikirbay K.E., Alimbaeva Zh.N., Alimbaev Ch.A. et al. A system of intelligent accounting and management of municipal resources based on LoRaWAN technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):6–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-1 EDN: FALUYD
3. Khablov D.V. A management model for a warehouse transport robot with adaptive path planning. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2023): tr. XVI Mezhdunar. konf. (g. Moskva, 26–28 sentyabrya 2023 g.) = Management of the development of large-scale systems (MLSD'2023) : proceedings of the XVI International Conference (Moscow, September 26-28, 2023).* Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2023:1041–1046. (In Russ.). doi: 10.25728/mlsd.2023.1041 EDN: BFCPSZ
4. Yakovleva E.A., Motorkin A.S., Kapustin D.R. Choosing a system for robotic process automation in production. *Sistemnyy analiz v proektirovani i upravlenii: sb. nauch. tr. XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 3 ch. (g. Sankt-Peterburg, 13–14 oktyabrya 2022 g.) = System analysis in design and management : collection of scientific papers XXVI International Scientific and Practical Conference : at 3 a.m. (St. Petersburg, October 13-14, 2022).* Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2023;Pt.3:357–362. (In Russ.). doi: 10.18720/SPBPU/2/id23-499 EDN: KTMNDJ
5. Urvaev I.N. Navigation of a mobile robot based on laser rangefinder methods. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):44–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5 EDN: TBKHZY
6. Brosalin D.O., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu. Integration of local and global planners into the mobile robot control system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences.* 2023;(6): 8–24. (In Russ.). doi: 10.18522/2311-3103-2023-6-8-24 EDN: WQWOYW
7. Mamedova T.A.K., Alieva N.R.K. Planning the path of a mobile robot in dynamic environments: an overview. *Endless Light in Science.* 2022;(6-6):156–165. (In Russ.). EDN: NVMVDI
8. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Barashkov A.A. Questions of constructing potential fields in the tasks of local navigation of mobile robots. *Avtometriya = Autometry.* 2019;55(4):65–70. (In Russ.). doi: 10.15372/AUT20190407 EDN: WHYVDB
9. Lyu V. Methods of path planning in an environment with obstacles (review). *Matematika i matematicheskoe modelirovanie = Mathematics and mathematical modeling.* 2018;(1):15–58. (In Russ.). doi: 10.24108/mathm.0118.0000098 EDN: YWFAYD
10. Kushnir A.P., Zeyn Aldin A. Autonomous robotic complex "Jad". *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. Ros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Innovative technologies in electronics and instrument engineering : collection of dokl. Russian Scientific and Technical conference with the international.* Moscow: RTU MIREA, 2021;2:76–81. (In Russ.)
11. Kholopov V., Kushnir A., Kurnasov E. et al. Development of a digital system for monitoring the technological process of production based on the equipment condition index. *Konferentsiya molodykh uchenykh Rossii po elektrotekhnike i elektronike IEEE 2017 (1–3 fevralya 2017 g., Sankt-Peterburg) = Conference of Young Scientists of Russia on Electrical Engineering and Electronics IEEE 2017 (February 1-3, 2017, St. Petersburg).* Saint Petersburg: LETI, 2017. (In Russ.). doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910692

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Романович Александров

директор по цифровой трансформации,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический
университет (филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: vr Aleksandrov@istokmw.ru

Vitaly R. Aleksandrov

Director of digital transformation,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Никита Владимирович Азарнов

инженер,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: nvazarnov@istokmw.ru

Nikita V. Azarnov

Engineer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Алексей Алексеевич Щеткин

начальник отдела автоматизированных
систем управления,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический
университет (филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: aaschetkin@istokmw.ru

Aleksey A. Shchetkin

Head of the department of automated control systems,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Александр Петрович Кушнир

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной информатики,
Институт информационных технологий,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: 89169521579@ya.ru

Aleksandr P. Kushnir

Candidate of technical sciences, associate professor of
the sub-department of industrial informatics,
Institute of Information Technologies,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Роман Маркович Огорельцев

аспирант,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: roman-ogoreltcev@yandex.ru

Roman M. Ogoreltcev

Postgraduate student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.04.2025

Принята к публикации/Accepted 28.04.2025

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.382

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

В. М. Чайковский

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
radiolokaci@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информативность процесса измерения параметров МДП-структуры в максимальной степени определяется конфигурацией системы измерения, осуществляющей преобразование параметров МДП-структуры, как пассивного объекта в активные величины. *Материалы и методы.* Предлагается построение измерительной схемы из двух последовательно соединенных операционных усилителей, охваченных общей обратной связью по переменному току. Конфигурация измерительной схемы обосновывается методом инвариантного преобразования и с помощью основ теории усилителя постоянного тока, с использованием преобразования Лапласа. *Результаты.* Проведенный сравнительный анализ передаточной функции измерительной схемы с различным характером сопротивления, соединяющего операционные усилители измерительной схемы, позволил выбрать характер данного сопротивления. В результате чего характер всех сопротивлений в составе измерительной схемы приобрел окончательный вид. *Выводы.* Использование измерительной схемы с рассматриваемой структурой построения в составе измерительного устройства, предназначенного для оценки значения параметров МДП-структур, особенно в отработке технологии процесса их изготовления, позволит увеличить процент выхода годных различных компонентов, выпускаемых на их основе.

Ключевые слова: измерительная схема, МДП-структура, операционный усилитель, обратная связь по постоянному току, выходное напряжение, передаточная функция, режим заданного тока, режим заданного напряжения, вариант построения ИС, скачок напряжения, характер пропорциональности

Для цитирования: Чайковский В. М. Измерительная схема для преобразования параметров МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 68–73. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

MEASURING CIRCUIT FOR CONVERSION PARAMETERS OF THE MIS-STRUCTURE

V.M. Chaykovskiy

Penza State University, Penza, Russia
radiolokaci@yandex.ru

Abstract. *Background.* The information value of the process of measuring the parameters of the MIS-structure is determined to the maximum extent by the configuration of the measuring circuit, which converts the parameters of the MIS-structure as a passive object into active values. *Materials and methods.* It is proposed to build a measuring circuit of two series-connected operational amplifiers covered by common AC feedback. The justification for the configuration of the measuring circuit is based both on the use of the invariant transformation method and the foundations of the theory of a DC amplifier, using the Laplace transform. *Results.* Carried out comparative analysis of the transfer function of the measuring circuit with a different character of the resistance connecting the operational amplifiers of the measuring circuit

made it possible to choose the character of this resistance. As a result, the nature of all resistances in the measuring circuit acquired its final form. *Conclusions.* Use measuring circuit with the structure under consideration as part of a measuring device designed to assess the value of MIS-structures parameters, especially in debugging the technology of their manufacturing process, will increase the percentage of yield of various components produced on their basis.

Keywords: measuring circuit, MIS-structure, operational amplifier, DC feedback, output voltage, transfer function, preset current mode, preset voltage mode, IE construction option, voltage jump, proportionality character

For citation: Chaykovskiy V.M. Measuring circuit for conversion parameters of the MIS-structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):68–73. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

Введение и постановка задачи

Интенсивное развитие электроники стало возможно за счет использования микроэлектронных компонентов широкой номенклатуры, хорошо представленной в работе [1], разработанных с использованием МДП-структуры (рис. 1), особенно для разработки аппаратуры двойного назначения, включая как военное, так и космическое [2]. Свойства как самих компонентов, так и различных устройств, основанных на их использовании, будут в огромной степени определяться электрофизическими свойствами МДП-структур, служащими основой для изготовления данных компонентов. Поэтому контроль параметров МДП-структур, в ходе процесса изготовления последних, бесспорно, весьма актуален.



Рис. 1. Состав МДП-структуры

МДП-структура представляет собой пассивный объект, который при дальнейшем рассмотрении будем характеризовать просто полным сопротивлением вида $Z_{\text{МДП}}(p)$. Методика оценки значения параметров пассивного объекта, который в силу своей пассивности никаким образом себя не проявляет, была предложена и хорошо развита рядом научных школ, возглавляемых профессорами А. И. Мартяшиным, Э. К. Шаховым, В. М. Шлядиным [3]. Упомянутая методика заключается в инвариантном преобразовании, представляющем воздействие на объект, входящий в состав измерительной схемы (ИС) на основе операционного усилителя (ОУ), активной величиной в виде напряжения U_0 , которое может быть как гармоническим, так и импульсным в виде скачка напряжения. С последующим выделением из выходного напряжения ИС, являющегося реакцией исследуемой пассивной величины на внешнее воздействие, при этом амплитуды составляющих выходного напряжения ОУ, являющегося основным элементом ИС, будут пропорциональны значению того или иного параметра пассивного объекта. Опыт построения аналоговых преобразователей параметров неэлектрических величин показывает [3], что преобразование параметров МДП-структуры может быть осуществлено ИС на базе ОУ и реализовано по схеме одного из вариантов, приведенных на рис. 2, где показан вариант преобразования в режиме заданного напряжения и режиме заданного тока соответственно.

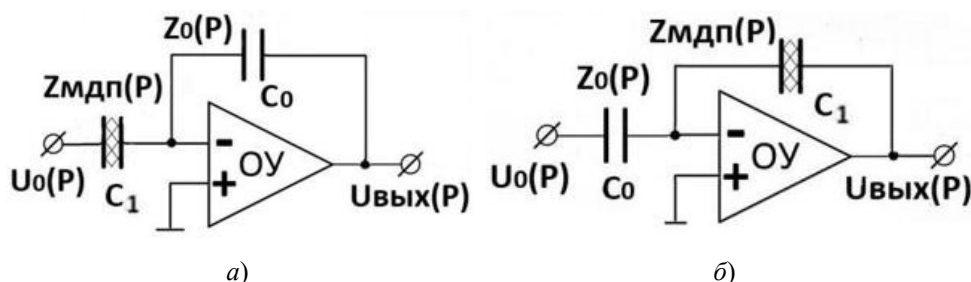


Рис. 2. Возможные варианты построения ИС

Будем считать в дальнейшем, что сопротивление МДП-структуры $Z_{\text{МДП}}(p)$ носит чисто емкостной характер и характеризуется только полной емкостью, тогда $Z_{\text{МДП}}(p) = 1/pC_1$.

Метод решения

При выборе какого-либо из возможных вариантов схемы построения ИС необходимо учитывать два весьма важных момента, первое – это то, что кроме напряжения U_0 , являющегося входным для ИС, и которое, согласно работам [4, 5], должно иметь «малую» амплитуду порядка 20 мВ, и одновременно с данным напряжением на МДП-структуру должно действовать напряжение постоянного тока с медленно изменяющимся, иногда в достаточно широком диапазоне, значением амплитуды. Подача данного напряжения требует создания цепей развязки в виде специальных схемотехнических решений, для варианта ИС вида рис. 2,а данная задача решается достаточно легко, а вот для ИС вида рис. 2,б подключение дополнительных элементов в цепь обратной связи ОУ приводит к потере его устойчивости особенно при вхождении МДП-структуры в состояние обогащения, в котором сопротивление структуры характеризуется только одним слоем диэлектрика. Второй не менее важный момент заключается в том, что характер зависимости значений амплитуд составляющих выходных напряжений ИС от параметров МДП-структуры будут иметь различную пропорциональность. Так, для ИС рис. 2,а он будет прямо пропорциональный, а для ИС рис. 2,б – обратно, соответственно выходные напряжения данных ИС будут иметь во временной области следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(t)_{2,a} = -U_0 \frac{C_1}{C_0}; \quad (1)$$

$$U_{\text{вых}}(t)_{2,b} = -U_0 \frac{C_0}{C_1}. \quad (2)$$

Следует помнить, что данный характер пропорциональности в значительной степени будет оказывать влияние на удобство восприятия и интерпретации получаемых результатов преобразования. Из сказанного очевидно, что наличие у ИС рис. 2,а указанных достоинств делает ее наиболее предпочтительной с точки зрения практического использования по сравнению с ИС рис. 2,б, поэтому будем считать выражение (1) идеальным.

Из описания работы усилителя постоянного тока, каким является ОУ в ИС известно [6–9], что для нахождения последнего в линейном режиме и с целью исключения вхождения его в режим насыщения, ОУ должен иметь стабильную обратную связь по постоянному току. Соблюдение данного требования для выбранной ИС рис. 2,а становится особенно актуально, так как в обратной связи ОУ данной ИС находится конденсатор емкостью C_0 , что приводит к накоплению заряда на последней, а это будет вводить ОУ в состояние насыщения. Для исключения данного явления необходимо предусмотреть в данной ИС цепь разряда емкости C_0 , роль которой и должна выполнять цепь обратной связи по постоянному току. Данную цепь можно реализовать путем включения параллельно емкости C_0 резистора либо T -образного RC -фильтра, значения параметров элементов которого будут привязаны к значению емкости C_0 , а это вызывает усложнение схемы практической реализации такого подхода, так как при смене диапазона преобразования, происходящего путем смены значения емкости C_0 , придется менять с помощью средств коммутации значения параметров RC -фильтра. Такие значительные изменения структуры построения ИС приводят в обоих случаях к возникновению значительной методической погрешности преобразования параметров МДП-структуры.

Поэтому построение ИС предлагается организовать в виде двух последовательно соединенных ОУ рис. 3, где образцовый элемент с сопротивлением $Z_0(p)$ помещается в цепь обратной связи, общую для этих двух ОУ, каждый из которых имеет устойчивую, стабильную обратную связь по постоянному току рис. 3, причем обратная связь каждого из ОУ не оказывает влияния на характер протекающего процесса преобразования.

Включение ОУ1 представляет собой повторитель напряжения со 100 %-обратной связью по постоянному току, а включение ОУ2 представляет масштабирующий каскад, имеющий тоже стабильную обратную связь по постоянному току, причем характер сопротивления в его входной цепи $z_1(p)$ может носить как емкостной, так и активный характер.

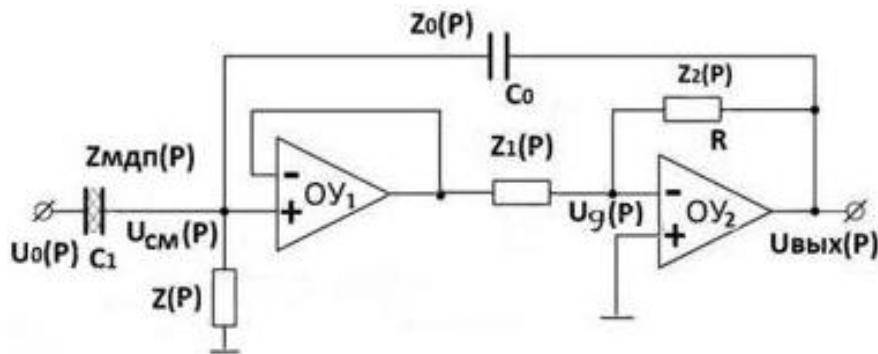


Рис. 3. ИС на базе двух ОУ

Для окончательного выбора варианта ИС, состоящей из последовательно включенных двух каскадов на ОУ, соединенных между собой либо через резистор, либо через емкость, необходимо выяснить, насколько будет отличаться выходное напряжение ИС рис. 3 для каждого из этих двух перечисленных характеров сопротивления $z_1(p)$. Причем сравнение следует провести с выражением (1) выходного напряжения ИС рис. 2,а, считающимся идеальным.

Сравнительный анализ

Необходимо определить, в каком случае ИС рис. 3 будет обладать наименьшей методической погрешностью при преобразовании параметров МДП-структуры. Для чего требуется получить в общем виде выражение выходного напряжения ИС рис. 3, а для этого необходимо решить ниже следующую систему уравнений, составленных согласно протекаемых в ИС процессов и определяемых выполнением следующих условий [6–9]:

- ток в цепи обратной связи ОУ равен току в его входной цепи;
- выходное напряжение ОУ равно произведению его входного дифференциального напряжения $U_g(p)$ на коэффициент усиления ОУ.

Данная система уравнений составлена в соответствии с законом Кирхгофа и с соблюдением условий, приведенных строкой выше:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_0(p) - U_{см}(p)}{Z_{мдп}(p)} = \frac{U_{см}(p) - U_{вых}(p)}{Z_0(p)} + \frac{U_{см}(p)}{Z(p)}, \\ \frac{U_{см}(p) - U_g(p)}{Z_1(p)} = \frac{U_g(p) - U_{вых}(p)}{Z_{2(p)}}, \\ U_{вых}(p) = -U_g(p) \cdot K_2, \end{array} \right. \quad (3)$$

где K_2 – коэффициент усиления ОУ₂, $K_2 \gg 1$.

Решение системы уравнений (3) позволяет получить выражение для выходного напряжения ИС в операторной форме рис. 3 в следующем виде:

$$U_{вых\text{ ИС}}(p) = -U_0(p) \frac{Z_0(p)}{Z_{мдп}(p)} \cdot \left(1 + \frac{Z_1(p)}{Z_2(p)} \cdot \left[1 + \frac{Z_0(p)}{Z_{мдп}(p)} \right] \right)^{-1}. \quad (4)$$

Далее необходимо провести анализ последнего выражения и убедиться в степени его отличия от идеального выражения (1) для двух случаев, когда характер сопротивления $z_1(p)$, как указывалось выше, может быть либо активным, либо емкостным.

Анализ (4) показывает, что основным условием для приближения его к выражению (1) является устремление к нулевому значению слагаемого у единицы в знаменателе дроби выражения (4). Если характер у $z_1(p)$ будет активным, то для достижения выше упомянутого условия очевидно, что необходимо значительно уменьшать значение сопротивления $z_1(p)$ и одновременно с этим увеличивать значение сопротивления $z_2(p)$ в цепи обратной связи ОУ₂, но в результате всего этого последний потеряет устойчивость. На основании чего можно сделать вывод, что данный вариант реализации ИС практической ценности не имеет.

В случае, если $z_1(p)$ носит емкостной характер, то для приближения преобразования ИС к идеальному необходимо значительно увеличивать как значение емкости у сопротивления $z_1(p)$, так и значение сопротивления $z_2(p)$ в цепи обратной связи ОУ2. Данное действие приведет к двоякому положительному эффекту, во-первых, ОУ2 при этом будет выполнять функцию дифференциатора с большой постоянной времени, имея при этом устойчивую работу. Во-вторых, наличие большой постоянной времени расширит полосу пропускания частот ОУ2 в область нижних частот, что в случае проведения ИС преобразования на импульсном сигнале, когда выходное напряжение последней тоже будет иметь импульсный характер, исключается эффект «скола» вершины импульса выходного напряжения.

В результате проведенного сравнительного анализа следует признать, что ИС, структура которой приведена на рис. 3, обладает достаточной привлекательностью с точки зрения практического использования, в связи с чем она была использована и испытана при построении макетного образца измерительного комплекса для исследования МДП-структуры, а именно при отработке методики оценки гистерезисных свойств МДП-структуры [10].

Заключение

Построение измерительной схемы в виде описанного (см. рис. 3) последовательного соединения двух ОУ, первый из которых включен в режиме повторителя напряжения, а второй – в режиме дифференциатора с большой постоянной времени, имеет не только неоспоримое преимущество в плане осуществления преобразования близкого к идеальному, но и обладает еще хорошей перспективой его практического использования при организации процесса преобразования параметров различных, широкого круга пассивных объектов типа различных датчиков, имеющих емкостной характер. Данное хорошо согласуется с ранее приведенным утверждением о том, что для удобства интерпретации получаемого в ходе преобразования результата, характер сопротивления образцового сопротивления в составе измерительной схемы должен быть аналогичен характеру преобразуемого. В ходе макетирования и проведения настроечных работ путем подбора было выяснено, что описанный вариант построения ИС показывает весьма хороший результат при использовании в качестве его сопротивлений $z_1(p)$ и $z_2(p)$ соответственно конденсатора типа К73-17 емкостью 2,2 мкФ и резистора типа СЗ-14 номиналом 6,3 МОм.

Список литературы

1. Свистунова Т. В. Основы микроэлектроники : учеб. пособие. Воронеж : ВГТУ, 2017. 149 с.
2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника : в 2 кн. М. : Техносфера, 2015. Кн. 2. 488 с.
3. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. под ред. Р. А. Суриса : в 2 кн. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
5. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
6. Лукьянов Г. Н., Белякова И. И., Балобей Ф. П. Операционные усилители : учеб. пособие. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. 78 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. 12-е изд. М. : ДМК Пресс, 2008. Т. 1. 832 с.
8. Картер Б. Операционные усилители для всех / пер. с англ. А. Н. Рабодзея. 2-е изд. М. : ДМК Пресс, 2023. 529 с.
9. Осадченко В. Х., Волкова Я. Ю. Операционные усилители : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 156 с.
10. Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Измерение зарядовой нестабильности МДП-структуры // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 17–24.

References

1. Svistunova T.V. *Osnovy mikroelektroniki: ucheb. posobie* = *Fundamentals of microelectronics : a textbook*. Voronezh: VGTU, 2017:149. (In Russ.)
2. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika: v 2 kn.* = *Space electronics : in 2 books*. Moscow: Tekhnosfera, 2015;Bk.2:488. (In Russ.)
3. Martiyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya* = *Converters of electrical parameters for monitoring and measurement systems*. Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)

4. Zi S.M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov: v 2 kn. = Physics of semiconductor devices : in 2 books.* Moscow: Mir, 1984;Bk.1:456. (In Russ.)
5. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : a textbook.* Moscow, 2005:492. (In Russ.)
6. Luk'yanov G.N., Belyakova I.I., Balobey F.P. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie = Operational amplifiers : a textbook.* Saint Petersburg: NIU ITMO, 2012:78. (In Russ.)
7. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: per. s nem. 12-e izd. = Semiconductor circuit engineering : translated from German. 12th ed.* Moscow: DMK Press, 2008;1:832. (In Russ.)
8. Karter B. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh / per. s angl. A.N. Rabodzey. 2-e izd. = Operational amplifiers for everyone / translated from English by A. N. Rabodzey. 2nd ed.* Moscow: DMK Press, 2023:529. (In Russ.)
9. Osadchenko V.Kh., Volkova Ya.Yu. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie = Operational amplifiers : a textbook.* Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020:156. (In Russ.)
10. Tashlintsev D.A., Chaykovskiy V.M. Measurement of the charge instability of the MDP structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3): 17–24. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Михайлович Чайковский

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.03.2025

Принята к публикации / Accepted 02.04.2025

БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов¹, У. С. Чихрина², Д. В. Попченков³, Д. А. Гулиева⁴

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

¹ alex.t1978@mail.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ popchenkov79@mail.ru, ⁴ dashuliy2308@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время постоянно растут потребности в совершенных средствах измерения и контроля, в том числе и в датчиках перемещений, обладающих высокой точностью и быстродействием, возможностью работать в сложных условиях окружающей среды (большие перепады температур, агрессивные окружающие среды, механические нагрузки, повышенная влажность, большие давления и т.д.). Целью исследования является разработка бесконтактной системы измерения виброперемещений на основе вихретокового датчика. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы натурных испытаний. *Результаты.* Проведена проверка работоспособности и снятие градуировочных характеристик разработанной системы при повышенном и пониженном напряжениях питания, при различных материалах якоря. А также подтверждена работоспособность системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды.

Ключевые слова: датчик перемещений, блок электроники, вихревые токи, градуировочная характеристика

Для цитирования: Трофимов А. А., Чихрина У. С., Попченков Д. В., Гулиева Д. А. Бесконтактная система измерения виброперемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 74–79. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-9

NON-CONTACT SYSTEM FOR MEASURING VIBRATION DISPLACEMENTS

A.A. Trofimov¹, U.S. Chikhrina², D.V. Popchenkov³, D.A. Gulieva⁴

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

¹ alex.t1978@mail.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ popchenkov79@mail.ru, ⁴ dashuliy2308@yandex.ru

Abstract. *Background.* Currently, there is a constantly growing need for advanced measuring and control tools, including displacement sensors with high accuracy and speed, the ability to operate in difficult environmental conditions (large temperature differences, aggressive environments, mechanical loads, high humidity, high pressures, etc.). The aim of the study is to develop a contactless vibration displacement measurement system based on an eddy current sensor. *Materials and methods.* In solving the tasks, full-scale testing methods were used. *Results.* The operability of the developed system was tested and calibration characteristics were taken at high and low supply voltages, with different anchor materials. The operability of the system under conditions of exposure to high and low ambient temperatures was also confirmed.

Keywords: displacement sensor, electronic unit, eddy currents, calibration characteristic

For citation: Trofimov A.A., Chikhrina U.S., Popchenkov D.V., Gulieva D.A. Non-contact system for measuring vibration displacements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):74–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-9

Бесконтактная измерительная система предназначена для измерений относительного смещения деталей машин. Такие системы особенно подходят для измерений относительной вибрации и положения оси валов машин, например, в паровых и газовых турбинах, генераторах переменного тока, турбокомпрессорах и центробежных насосах [1, 2].

Способ измерения, используемый в бесконтактной системе, основан на эффекте вихревых токов [3, 4]. Используя его, можно измерять расстояние между подвижным (вибрирующим) объектом и преобразователем. Последний устанавливается на другом объекте, стационарном и обычно не вибрирующем. Бесконтактная система обеспечивает сигнал, прямо пропорциональный относительному смещению между объектом и преобразователем.

Этот способ отличается от способа, используемого «сейсмическими» приборами, например, акселерометрами и преобразователями скорости. У них выходной сигнал пропорционален абсолютному перемещению объекта, на котором они установлены.

Бесконтактный способ широко применяется для контроля различных типов вращающихся механизмов. Основные области применения:

1) контроль осевого перемещения вала или ротора станка – можно использовать для измерения относительного расширения вала или состояния (степени износа) упорных подшипников. Это соответствует статическому измерению;

2) контроль относительной вибрации вала машины в радиальном направлении. Радиальные вибрации вызываются эксцентриситетом вала, присутствием дисбаланса ротора или резонансом. Это соответствует динамическому измерению.

Разработанная бесконтактная система виброперемещений состоит из бесконтактного датчика виброперемещений и блока электроники (БЭ).

Бесконтактный датчик перемещений состоит из корпуса 1 (рис. 1), на внешнем диаметре которого нарезана резьба М10×1, двух шестигранных гаек 2, кабельной перемычки 3, оканчивающейся мини-разъемом 4. Внутри корпуса 1 расположен чувствительный элемент, состоящий из ферритовой чашки и катушки.

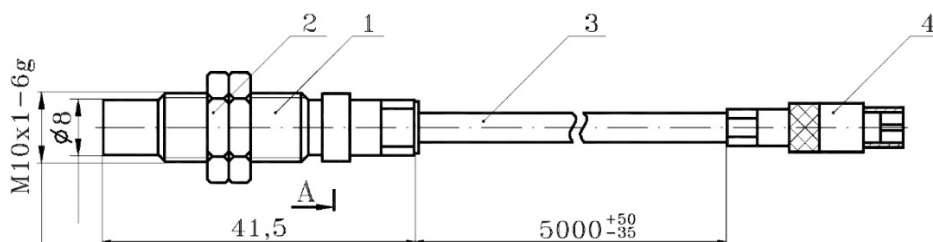


Рис. 1. Общий вид бесконтактного датчика виброперемещений

Обмотка датчика является частью колебательного контура генератора, который вырабатывает переменное напряжение частотой 566 кГц с изменяющейся амплитудой от 0,5 до 2 В.

Блок электроники состоит из алюминиевого корпуса с крышкой и расположенной внутри корпуса печатной платой. На корпусе БЭ расположены: коаксиальный малогабаритный разъем для подключения датчика и колодка для подключения цепей питания и цепи выхода.

Система работает следующим образом. При перемещении токопроводящего элемента (якоря) из материала типа Ст20 на расстояние от 0 до 4,3 мм от торца датчика происходит изменение значения индуктивности катушки чувствительного элемента [5, 6]. При изменении индуктивности изменяется добротность колебательного контура и, как следствие, амплитуда синусоидального сигнала на выходе генератора БЭ. Изменяющийся синусоидальный сигнал является информационным сигналом о расстоянии до измеряемого объекта. Далее синусоидальный сигнал детектируется и подвергается обработке в усилительно-преобразующем тракте БЭ, на выходе которого появляется постоянное напряжение, изменяющееся в функции измеряемого расстояния.

Проверка работоспособности и снятие градуировочной характеристики проводились в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

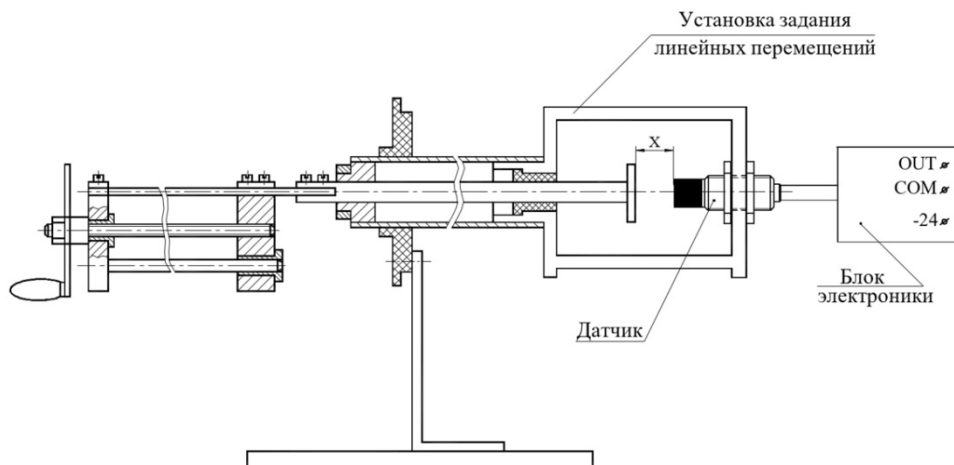


Рис. 2. Схема установки датчика

Конструктивно ЭРИ в БЭ расположены на многослойной плате с плотной разводкой печатных проводников и плотным размещением ЭРИ.

Проверка тока потребления проводилась в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

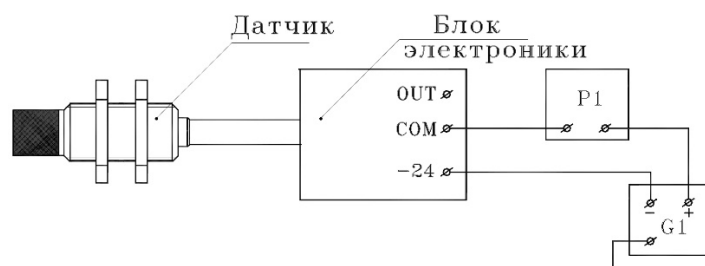


Рис. 3. Схема проверки тока потребления:

G – источник питания постоянного тока Б5–45; $P1$ – прибор комбинированный Ц4353

Исследование технических, технологических и конструктивных характеристик системы

Результаты исследований показали, что система может работать с любыми электропроводящими материалами (медь, алюминий, сталь, бронза и т.д.), из которых изготовлены якоря. В зависимости от материала якоря изменяется градуировочная характеристика системы.

В ходе проведенных исследований выявлены следующие особенности.

Конструктивно система выполнена в исполнении, позволяющем проводить механическое соединение и разъединение датчика и блока электроники.

В датчике применена технология обжатия втулки кабельной перемычки в виде шестигранника в месте выхода ее из корпуса для повышения механической надежности датчика и упрощения конструкции.

Диапазон измерения 4,3 мм, сопоставимый с диаметром чувствительного элемента (катушки) датчика ($\varnothing 5$ мм), достигается за счет использования в составе системы схемы линеаризации выходной характеристики.

Следует отметить простоту конструкции датчика, поэтому для изготовления деталей и его сборки не требуется сложной оснастки, а также малые габаритные размеры.

БЭ имеет малые габаритно-весовые характеристики ($V \approx 140$ см³). К особенностям выполненных конструктивно-технологических решений в БЭ следует отнести плотную компоновку ЭРИ на многослойной плате и плотную разводку печатных проводников, также схемно-техническое решение по линеаризации выходной характеристики системы.

Датчик системы имеет герметичное исполнение в части защиты от проникновения воды и пыли. Система позволяет проводить бесконтактное измерение перемещений, что не приводит к отбору мощности у перемещающегося объекта.

Результаты проверки работоспособности и снятие градуировочных характеристик при повышенном 28,8 В, при 24 В и при пониженном 20,8 В напряжениях питания приведены на рис. 4.

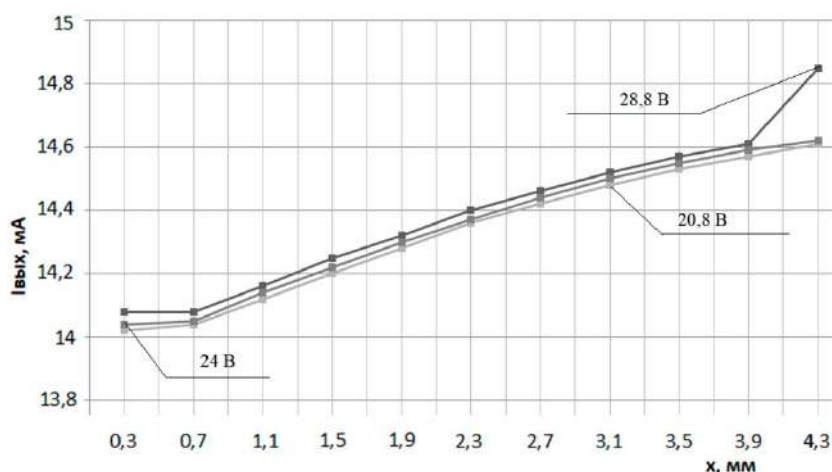


Рис. 4. Значение выходного сигнала при напряжении питания 28,8; 24; 20,8 В

Результаты снятия градуировочных характеристик системы при различных материалах якоря (медь, алюминий) приведены на рис. 5.

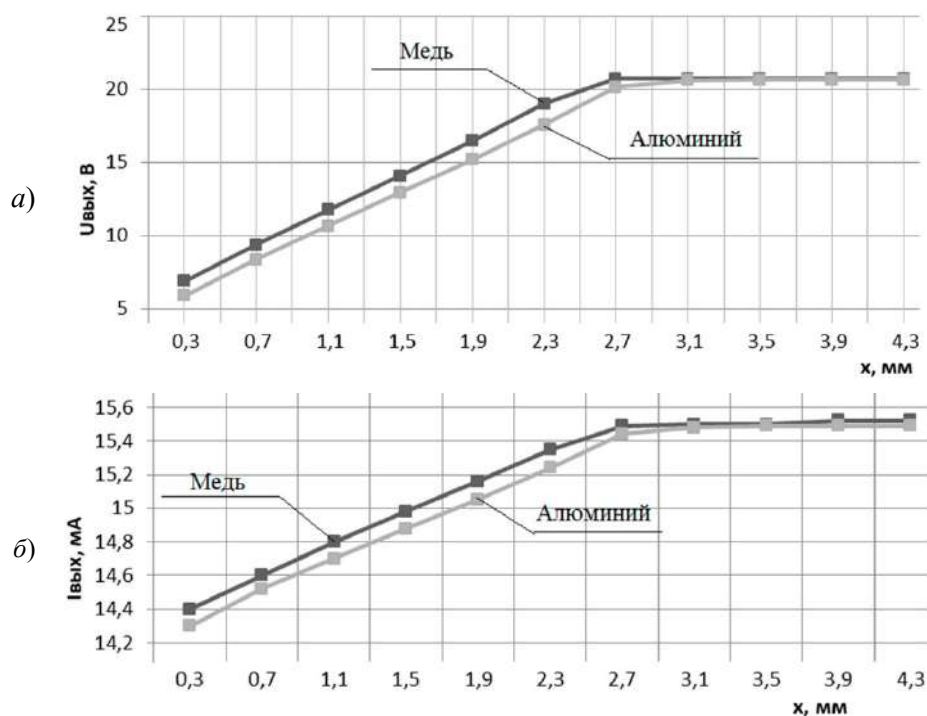


Рис. 5. Градуировочные характеристики системы при различных материалах якоря:
 а – градуировочная характеристика «перемещение – напряжение»;
 б – градуировочная характеристика «перемещение – ток»

Результаты проверки работоспособности системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды приведены на рис. 6.

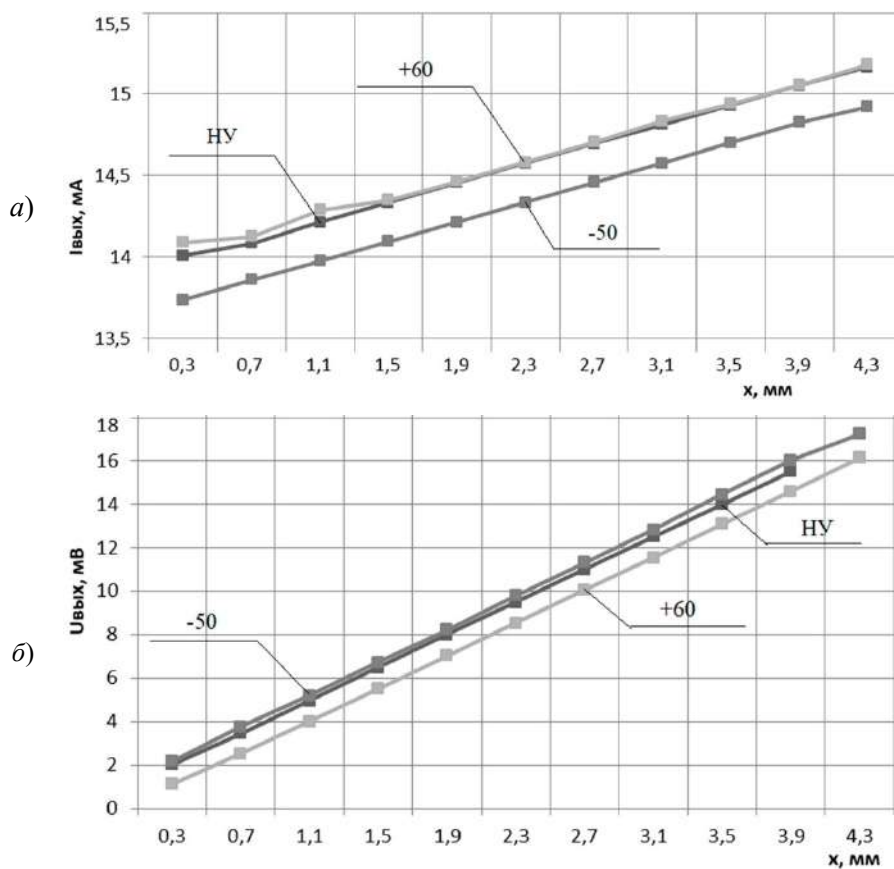


Рис. 6. Градуировочные характеристики системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды:
 а – градуировочная характеристика «перемещение – ток»;
 б – градуировочная характеристика «перемещение – напряжение»

Основные технические характеристики системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики разработанной системы

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений, мм	4 (от 0,3 до 4,3 мм)
Диаметр катушки, мм	6
Чувствительность, мВ/мкм	4
Длина кабельной перемычки датчика, м	5
Выходной сигнал системы:	
– ток, мА	15–20
– напряжение, В	1,2–17,2
Масса, кг	0,290
Ток потребления, А	$15 \cdot 10^{-3}$
Основная погрешность, % (без учета погрешности аппроксимации)	1,14
Погрешность аппроксимации, %	7,5
Частотный диапазон измерений, Гц	более 1000
Напряжение питания В,	от 20,4 до 28,8
при этом максимальный ток, потребляемый системой, не превышает, мА	15
Система работоспособна при изменении температуры окружающей среды, °С	от минус 50 до +60
Дополнительная погрешность от воздействия температуры окружающей среды, %	5,67
Габаритные размеры датчика, мм	M10×41,5
Габаритные размеры блока электроники, мм	78×53×35

Заключение

Бесконтактная система измерения виброперемещений работоспособна при изменении напряжения питания от 20,4 до 28,8 В, при этом максимальный ток, потребляемый датчиком, не превышает 15 мА. Система может работать с любыми электропроводящими материалами (медь, алюминий, сталь, бронза и т.д.). В зависимости от материала ответчика изменяется ее градуировочная характеристика. Максимальное значение дополнительной погрешности от воздействия температуры окружающей среды составило 5,67 % в диапазоне от минус 50 до +60 °С.

Список литературы

1. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
2. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18.
3. Дмитриенко А. Г., Нефедьев Д. И., Трофимов А. А. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 1. С. 4–9.
4. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.
5. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза, 2009.
6. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.

References

1. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. A system for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of developing unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Nefed'ev D.I., Trofimov A.A. Eddy current sensing elements for contactless motion sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(1):4–9. (In Russ.)

4. Urakseev M.A., Kagarmanov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;(1):33–36. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive motion sensors : monograph*. Penza, 2009. (In Russ.)
6. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with extended measuring range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Ульяна Сергеевна Чихрина

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

Ulyana S. Chikhrina

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

Дмитрий Валентинович Попченков

доцент кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: popchenkov79@mail.ru

Dmitry V. Popchenkov

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

Дарья Александровна Гулиева

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Darya A. Gulieva

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

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

Поступила в редакцию / Received 11.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 07.03.2025

Принята к публикации / Accepted 24.03.2025

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЕМКОСТНЫМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

М. А. Ватутин¹, И. А. Шевкунов²

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

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (МЕМС), имеют весьма невысокую стоимость, отличаются своей миниатюрностью и малым энергопотреблением. Высокую погрешность измерения можно определить как один из недостатков таких датчиков. Одной из причин этого является значительная чувствительность радиокомпонентов к изменению температуры окружающей среды. Целью работы является повышение метрологических характеристик акселерометра за счет повышения стабильности работы преобразовательной части, выполненной на D-триггере. *Материалы и методы.* Исследование показало, что акселерометр с емкостным датчиком перемещения, построенный на цифровой микросхеме D-триггера, не обладает высокими точностными параметрами, а также возникает сложность их определения. Предложенный буферный компаратор позволяет устранить эти недостатки. Произведена оценка точностных параметров элементов буферного компаратора. Разработана математическая модель акселерометра, позволяющая оценить стабильность параметров формирователя временного интервала. Произведена оценка стабильности преобразования во временной интервал для различных типовых элементов буферного компаратора. Осуществлена оценка влияния вспомогательных параметров радиоэлементов на стабильность работы буферного компаратора. Предложены схемотехнические решения для повышения стабильности работы акселерометра с емкостным датчиком перемещения. *Результаты.* Представленные схемотехнические предложения позволяют повысить стабильность преобразования акселерометром с емкостным датчиком перемещения. Также представленные результаты могут быть использованы для широкого круга измерительных приборов, в которых для измерения физической величины используются датчики перемещения емкостного типа. *Выводы.* Применение исследованных схемотехнических предложений позволяет повысить стабильность пороговых уровней преобразовательного D-триггера и тем самым осуществить более точное преобразование входного сигнала. Результаты могут использоваться при построении широкого круга измерительных приборов физических величин для применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: акселерометр, датчик первичной информации емкостного типа, генератор на цифровой микросхеме, стабильность преобразования, дрейф параметров радиоэлементов, источник опорного напряжения

Для цитирования: Ватутин М. А., Шевкунов И. А. Схемотехнические предложения по повышению метрологических характеристик микромеханического акселерометра с емкостным датчиком перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 80–90. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-10

CIRCUIT DESIGN PROPOSALS FOR IMPROVING THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A MICROMECHANICAL ACCELEROMETER WITH A CAPACITIVE DISPLACEMENT SENSOR

M.A. Vatutin¹, I.A. Shevkunov²

^{1,2} Mozhaitsky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Modern accelerometers based on microelectromechanical systems (MEMS) have a very low cost, are distinguished by their miniaturization and low energy consumption. A high measurement error can be identified as one of the disadvantages of such sensors. One of the reasons for this is the significant sensitivity of radio components to changes in ambient temperature. The aim of the work is to improve the metrological characteristics of the accelerometer

by increasing the stability of the converter part, made on a *D*-trigger. *Materials and methods.* The study showed that the accelerometer with a capacitive displacement sensor, built on a digital *D*-trigger microcircuit, do not have high accuracy parameters, and it is also difficult to determine them. The proposed buffer comparator makes it possible to eliminate these disadvantages. The accuracy parameters of the buffer comparator elements are estimated. A mathematical model of the accelerometer has been developed to assess the stability of the parameters of the time interval shaper. The stability of the conversion in the time interval for various typical elements of the buffer comparator is estimated. The influence of auxiliary parameters of radio elements on the stability of the buffer comparator has been evaluated. Circuit design solutions are proposed to improve the stability of an accelerometer with a capacitive displacement sensor. *Results.* The presented circuit design proposals make it possible to increase the stability of the conversion by an accelerometer with a capacitive displacement sensor. The presented results can also be used for a wide range of measuring instruments in which capacitive type motion sensors are used to measure a physical quantity. *Conclusions.* The application of the studied circuit design proposals makes it possible to increase the stability of the threshold levels of the converter *D*-trigger and, thereby, to achieve a more accurate conversion of the input signal. The results can be used in the construction of a wide range of measuring instruments of physical quantities for use in industrial devices and in other fields of science and technology.

Keywords: accelerometer, capacitive primary information sensor, digital circuit generator, conversion stability, radio element parameter drift, reference voltage source

For citation: Vatutin M.A., Shevkunov I.A. Circuit design proposals for improving the metrological characteristics of a micromechanical accelerometer with a capacitive displacement sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):80–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-10

Введение

Развитие авиационного и космического приборостроения неразрывно связано с созданием летательных аппаратов (ЛА) новых типов, обладающих большой скоростью и дальностью полета и требующих все более высокого уровня автоматизации процессов управления полетом [1]. Среди множества информационных систем, обеспечивающих формирование данных о текущих параметрах движения ЛА, особое место занимают инерциальные навигационные системы (ИНС) [2–4]. Являясь автономными, т.е. полностью помехозащищенными, они обеспечивают необходимой информацией все системы управления движением как ЛА [5, 6], так и наземных подвижных объектов [7].

Одной из основных характеристик информационных систем является нестабильность масштабного коэффициента преобразования измеряемой величины и дрейф смещения нуля. Значительную долю в формировании этих параметров вносит электронная часть усилительно-преобразовательного измерительного устройства.

Современные акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС), позволяют обнаружить и измерить кажущееся ускорение, имеют весьма невысокую стоимость, отличаются своей миниатюрностью и малым энергопотреблением [8]. К одному из недостатков таких датчиков можно отнести высокую погрешность, что связано с повышенной чувствительностью к изменению температуры окружающей среды [9, 10]. В настоящее время указанную проблему решают посредством схемотехнических, конструкторских и технологических решений и новшеств [11–15]. В данной статье представлены схемотехнические предложения по повышению метрологических характеристик МЭМС-акселерометра за счет повышения стабильности работы преобразовательной части акселерометра.

Цель и задачи работы

Широкий круг измерительных приборов различных физических величин используют датчики перемещения (ДП) чувствительного элемента (ЧЭ), выполненные по емкостной схеме [16]. Такой датчик используется, в частности, в акселерометре АТ-1104 [17]. Схема подключения ДП к непосредственно преобразовательной части усилительно-преобразовательного тракта акселерометра и диаграммы его работы показаны на рис. 1.

Емкостный датчик положения на схеме обозначен как конденсаторы $C1$ и $C2$. При движении подвижной массы $m_{чэ}$ чувствительного элемента емкости этих конденсаторов изменяются противофазно. Выходное напряжение $U_{вых}$, согласно статье [16], пропорционально относительному приращению величины измерительной емкости и, следовательно, значению измеряемого ускорения $a_{вх}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ОП}} \frac{C1 - C2}{C1 + C2}, \quad (1)$$

где K_U – коэффициент пропорциональности.

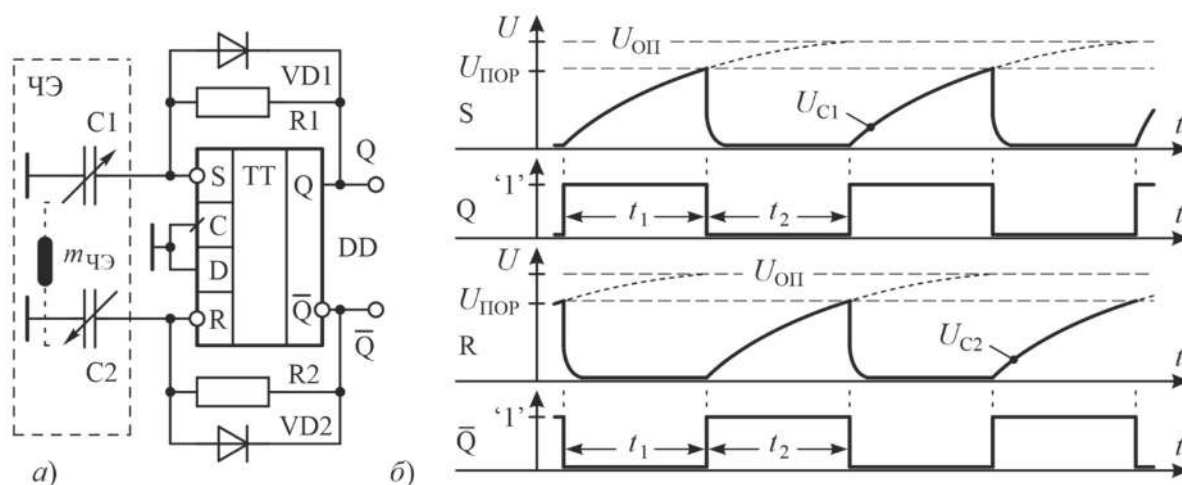


Рис. 1. Схема преобразовательной части акселерометра (а) и диаграмма ее работы (б)

Преобразовательная часть акселерометра выполнена как управляемый симметричный мультивибратор на D -триггере $DD1$ и является формирователем временных интервалов (ФВИ) t_1 и t_2 . Диаграмма напряжений в генераторной части схемы измерительно-преобразовательного канала показана на рис. 1, б. Конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются по экспоненциальному закону

$$U_{C1} = U_{\text{ОП}} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{R1C1}} \right); \quad U_{C2} = U_{\text{ОП}} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{R2C2}} \right). \quad (2)$$

Потенциал на конденсаторах $C1$ или $C2$, достигая порогового напряжения ($U_{\text{ПОП}S}$ на $C1$ или $U_{\text{ПОП}R}$ на $C2$), приводит к поочередному переключению D -триггера $DD1$ и обеспечивает формирование временных интервалов t_1 и t_2 , которые в своей длительности содержат информацию об измеряемом ускорении. В соответствии с формулой (1), временные интервалы t_1 и t_2 определяются как

$$t_1 = -R1C1 \cdot \ln \frac{U_{\text{ОП}} - U_{\text{ПОП}S}}{U_{\text{ОП}}}; \quad t_2 = -R2C2 \cdot \ln \frac{U_{\text{ОП}} - U_{\text{ПОП}R}}{U_{\text{ОП}}}. \quad (3)$$

Преобразователь значения емкости пластин датчика перемещения во временной интервал принципиально работоспособен. Но цифровая микросхема D -триггера изначально, по сути своего функционирования, предназначена для работы с цифровыми сигналами, у которых существует два устойчивых состояния – логический «0» и логическая «1», и не предназначена для работы в прецизионных преобразователях уровня напряжения во временной интервал (в преобразователях «напряжение–частота»). Это связано с тем, что пороговые напряжения $U_{\text{ПОП}}$ срабатывания D -триггера по входам R и S никакими техническими условиями (ТУ) не регламентированы и значение $U_{\text{ПОП}}$ и значения его дрейфа заранее неизвестны. Соответственно, и точность, и стабильность производимого преобразования измеряемого ускорения во временной интервал заранее определить невозможно.

По этой причине с целью повышения метрологических характеристик акселерометра необходимо решить задачу: разработать схемотехнику преобразовательной части акселерометра на D -триггере, при использовании которой возможно определить стабильность производимого преобразования.

Схемотехника буферного компаратора

Для повышения стабильности работы схемы преобразования предлагается между конденсаторами $C1$, $C2$ и входами R , S D -триггера включить буферные компараторы (БфК) $DA1$ и $DA2$, как показано на рис. 2.

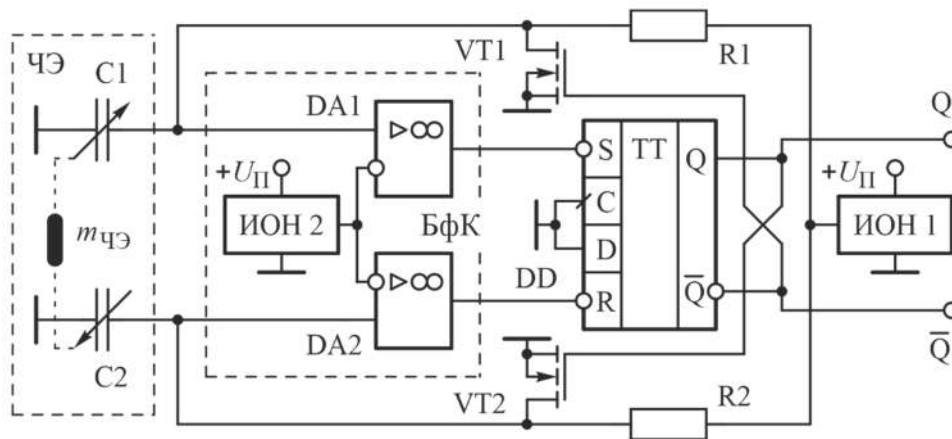


Рис. 2. Преобразовательная часть акселерометра с буферными компаратами

В качестве устройства сравнения применены быстродействующие операционные усилители (ОУ), работающие в режиме компаратора [18]. Инвертирующие входы ОУ подключены к времязадающим конденсаторам $C1$ и $C2$, а неинвертирующие – к источнику опорного напряжения (ИОН) [19], который определяет порог срабатывания $U_{\text{Пор}}$.

Модель преобразовательной части буферного компаратора

Функциональная схема одного канала БФК показана на рис. 3.

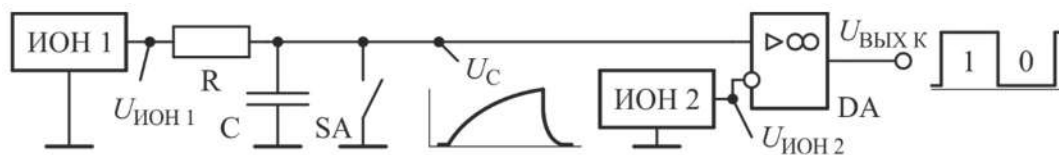


Рис. 3. Функциональная схема канала буферного компаратора

Конденсатор C стремится зарядиться до напряжения $U_{\text{ИОН 1}}$. Пока значение напряжения U_C на конденсаторе C меньше значения напряжения $U_{\text{ИОН 2}}$, на выходе ОУ формируется низкий уровень выходного напряжения компаратора $U_{\text{ВЫХ К}}$ – напряжение логического “0”. При достижении значением входного напряжения U_C значения напряжения $U_{\text{ИОН 2}}$ и превысит его, на выходе ОУ формируется высокий уровень напряжения $U_{\text{ВЫХ К}}$ – напряжение логической “1”, после чего замыкается ключ SA и происходит разряд конденсатора C . Напряжение порога срабатывания $U_{\text{ПС}}$, при котором происходит переключение компаратора DA , определяется как сумма опорного напряжения $U_{\text{ОП}}$ и напряжения смещения ОУ – $U_{\text{см ОУ}}$:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ОП}} + U_{\text{см ОУ}}. \quad (4)$$

Источнику опорного напряжения и напряжению смещения ОУ присущи дрейфы этих значений напряжений. Истинное значение напряжения порога срабатывания определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ПС}}^{\text{И}} = (U_{\text{ОП}} + \Delta U_{\text{ОП}}) + (U_{\text{см ОУ}} + \Delta U_{\text{см ОУ}}), \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{ОП}}$ – дрейф напряжения ИОН; $\Delta U_{\text{см ОУ}}$ – дрейф напряжения смещения ОУ.

Оценка точностных параметров радиоэлементов буферного компаратора

Выбор радиоэлементов буферного компаратора в своей основе произведен из современной продукции отечественных производителей. Ключевыми элементами буферного компаратора являются два элемента – источник опорного напряжения и операционный усилитель, работающий в режиме компаратора.

Оценка точностных параметров источника опорного напряжения. Источник опорного напряжения можно выполнить:

- на прецизионном стабилизаторе;
- на специализированной интегральной микросхеме (ИМС) ИОН.

Основными интересующими параметрами в данном случае являются значения напряжения стабилизации $U_{СТ}$ и его нестабильности $\alpha_{U_{СТ}}$.

Типовая величина нестабильности $\alpha_{U_{СТ}}$ для обоих типов ИОН составляет значение $5,0 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Но типовое напряжение стабилизации для стабилизаторов составляет значение 7,5 В (2С108В, 2С166В) или 9,0 В (2С190Т), что является неудовлетворительно высоким значением, а у ИМС ИОН напряжение стабилизации – 1,225 В (2С120Б).

Оценка точностных параметров операционного усилителя. Устройство сравнения (компаратор) является сложным элементом для выбора его в составе БФК, так как по своим параметрам он должен совместить в себе противоречивые условия – одновременно быть быстродействующим, с малым дрейфом напряжения смещения и обладать малыми входными токами. Интегральные микросхемы компараторов, как правило, эти параметры в одном изделии не совмещают. Поэтому в качестве БФК и предлагается использовать ОУ.

Параметры некоторых прецизионных ОУ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры прецизионных операционных усилителей

ОУ	U_{CM} , мкВ	$\Delta U_{CM} / \Delta T$, мкВ/ $^\circ\text{C}$	$K_U, \times 10^3$	I_{BX} , нА	f , МГц	$V_{U\text{ВЫХ}}$, В/мкс	$I_{ПOTP}$, мА
140УД17	75	3,0	200	2,5	4,0	0,1	4,5
140УД26	30	0,6	1000	40,0	20,0	11,0	5,0
544УД12	10	0,6	2000	1,0	0,4	0,1	1,0
544УА055	$1 \cdot 10^3$	10,0	2,0	0,01	41	130	6,5
140УД24	5	0,05	$1 \cdot 10^3$	0,01	0,8	2,0	4,0
5544УД4У3	175	6,76	$1 \cdot 10^3$	600	2,0	0,8	3,0
1467УД3У	5000	15,0	15	0,064	0,6	0,7	1,9
1446УД14А	3000	10,0	63	5,0	3,6	2,7	3,1
1476УД3АТ	3000	–	100	0,1	15,0	20,0	10,0
1473УД1Т1	25	0,6	1000	20	5,0	1,7	5,0

Оценка точностных параметров резисторов. Для формирования временных интервалов t_1 и t_2 используются резисторы. Наиболее точными в широком диапазоне температур являются металлофольговые (МФ) резисторы (табл. 2).

Таблица 2

Параметры металлофольговых резисторов

Резистор	Материал	ТКС, $\delta_R \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	L / D , мм	Прозв.
ММР	МФ	$\pm 5,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	$3,5 \times 3,2 \times 2,0$ (0,1 Вт)	Отеч.
ММУ*	МФ	$\pm 1,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	$3,2 \times 2,5 \times 1,5$ (0,05 Вт)	Отеч.
P2-109	МФ	$\pm 2,0 (-60...+125^\circ\text{C})$	$6,0 \times 5,0 \times 2,5$ (0,1 Вт)	Отеч.

* – резисторные сборки делителя напряжения.

Металлофольговые резисторы по сравнению с непроволочными резисторами обладают более широким температурным диапазоном работы.

Математическая модель оценки стабильности параметров формирователя временных интервалов

Напряжение на конденсаторе C изменяется по экспоненциальному закону

$$U_C = U_{\text{ИОН}} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

В соответствии с формулой (3)

$$-\frac{t}{RC} = \ln \frac{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}}{U_{\text{ИОН}1}}.$$

Отсюда после преобразования:

$$t = RC \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]. \quad (6)$$

В общем виде изменение выходной величины Δy определяется отклонением параметров от номинального значения каждого элемента устройства следующим выражением [20]:

$$\Delta_y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta_{x_1} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta_{x_2} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta_{x_n}. \quad (7)$$

Для рассматриваемого времязадающего устройства

$$\Delta_t = \left| \frac{\partial t}{\partial R} \right| \Delta_R + \left| \frac{\partial t}{\partial C} \right| \Delta_C + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}1}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}1}} + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}2}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}2}} + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{СМОУ}}} \right| \Delta_{U_{\text{СМОУ}}}, \quad (8)$$

и это влияние тем меньше, чем меньше слагаемых в выражении и чем меньшее влияние вносит каждое из них. Частные производные выражения (8) будут иметь вид

$$\frac{\partial t}{\partial R} = C \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]; \quad \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}2}} = -\frac{RC}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}};$$

$$\frac{\partial t}{\partial C} = R \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]; \quad \frac{\partial t}{\partial U_{\text{СМОУ}}} = -\frac{RC}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}};$$

$$\frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}1}} = \frac{RC}{U_{\text{ИОН}1}}.$$

Подставим значение частных производных в выражение (8):

$$\begin{aligned} \Delta_t = & \left| C \left[\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right] \right| \Delta_R + \left| R \left[\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right] \right| \Delta_C + \\ & + \left| \frac{RC}{U_{\text{ИОН}1}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}1}} + \left| \frac{RC}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}2}} + \left| \frac{RC}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}} \right| \Delta_{U_{\text{СМОУ}}} \end{aligned} \quad (9)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta_t = RC \left[\left| \ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \cdot \frac{\Delta_R}{R} + \left| \ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \cdot \frac{\Delta_C}{C} + \right. \\ \left. + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}1}}}{U_{\text{ИОН}1}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}2}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{СМОУ}}}}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}} \right| \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Определим относительное изменение временного интервала δ_t с учетом (6):

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{t} = \frac{\Delta_R}{R} + \frac{\Delta_C}{C} + \frac{\left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}1}}}{U_{\text{ИОН}1}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}2}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{СМОУ}}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right|}{\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}}}. \quad (11)$$

Времязадающий конденсатор C , показанный на рис. 3, является непосредственно датчиком положения чувствительного элемента акселерометра и является источником информации

о перемещении подвижной массы. Входное ускорение постоянного значения ($a_{вх} = \text{const}$) вызовет отклонение чувствительной массы на постоянную величину ($\Delta h_0 = \text{const}$). В этом случае дестабилизирующим фактором, изменяющим значение емкости $C1$ или $C2$, является диэлектрическая постоянная материала, находящегося между обкладками конденсатора $C1$ ($C2$) и изменение геометрических размеров датчика.

В МЭМС-акселерометрах, которые, по сути, являются интегральными микросхемами, межобкладочным материалом емкостного датчика является вакуум, в котором диэлектрическая постоянная равна единице ($\epsilon = 1$) и, если и есть его изменения, то будем считать их незначительными. Геометрические изменения маятника могут вносить более весомый вклад в изменение емкости датчика перемещения $C1$ и $C2$, но конструкция датчика такова, что изменение этих емкостей будут происходить синхронно и в значительной мере взаимно компенсироваться. В данной статье нестабильность работы емкостного преобразователя перемещения не рассматривается. По этим причинам частную производную, показывающую влияние параметров емкости C на время t , примем равной нулю ($\partial t / \partial C = 0$).

В выражении (9) для типовых значений напряжений, например, $U_{ион1} = 5,0$ В и $U_{ион2} = 3,3$ В, знаменатель имеет постоянное значение:

$$\ln \frac{U_{ион1}}{(U_{ион2} + U_{см оу})} \approx \ln \frac{5}{3,3} = 0,416,$$

а обратная величина — $1/0,416 = 2,4$. Также заметим, что напряжение $U_{ион2} \gg U_{см оу}$ и по этой причине напряжением $U_{см оу}$ можно пренебречь. Соответственно, выражение (11) примет вид

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{t} = \frac{\Delta_R}{R} + 2,4 \cdot \left(\left| \frac{\Delta U_{ион1}}{U_{ион1}} \right| + \left| \frac{\Delta U_{ион2}}{U_{ион2}} \right| + \left| \frac{\Delta U_{см оу}}{U_{ион2}} \right| \right). \quad (12)$$

Оценка стабильности работы формирователя временных интервалов

Оценим численное значение относительного изменения временного интервала δ_t для различных радиоэлементов, параметры которых показаны в табл. 1–4 и значений опорных напряжений $U_{ион1} = 5,0$ В; $U_{ион2} = 3,3$ В.

1. Примем значения: $\Delta U_{ион1} = \Delta U_{ион2} = 5,0 \cdot 10^{-6}$ В (ИОН, построенный на базе ИМС 2С120Б); $\delta_R = 5,0 \cdot 10^{-6}$ (резистор ММР); $\Delta U_{см оу} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ В (ОУ 140УД26). Выражение (12) примет численное значение

$$\delta_t = \Delta_t / t = 5 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (1,0 + 1,5 + 0,6) \cdot 10^{-6} = \boxed{12,44 \cdot 10^{-6}}. \quad (13)$$

2. Примем значения для улучшенного варианта: $\Delta U_{ион1} = \Delta U_{ион2} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ В [19]; $\delta_R = 0,05 \cdot 10^{-6}$ [24]; $\Delta U_{см оу} = 0,05 \cdot 10^{-6}$ В (ОУ 140УД24). Выражение (12) примет численное значение

$$\delta_t = \Delta_t / t = 0,05 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,05) \cdot 10^{-6} = \boxed{0,725 \cdot 10^{-6}}. \quad (14)$$

3. Для исходной схемы акселерометра (см. рис.1) источником опорного напряжения $U_{ион2}$ является пороговое напряжение МДП-транзистора, которое не обладает высокой стабильностью и его значение находится на уровне $\Delta U_{п мдп} = (-3,5 \dots -2) \cdot 10^{-3}$ В/°С [11]. Выражение (12) для этого случая упростится и фактическое значение будет

$$\delta_t = \Delta_t / t = 2,4 \cdot \left| \frac{\Delta U_{п мдп}}{U_{ион2}} \right| = \boxed{(2,55 \dots 1,45) \cdot 10^{-3}}, \quad (15)$$

что в среднем на два-три порядка хуже вариантов 1 и 2, рассмотренных выше.

Симметричное построение времязадающих цепей генератора на ИМС DD1 (см. рис.1) позволяет предположить, что дестабилизирующие факторы будут в одинаковой степени влиять на пороговое напряжение МДП-транзисторов D -триггера, как по входу S , так и по входу R .

Поэтому в первом приближении значение $\Delta U_{П\text{ мдп}}$ можно взять, как у ОУ с полевыми транзисторами на входе (140УД8В, 1409УД1Б), – 150 мкВ/°С. В этом случае

$$\delta_i = \Delta_i / t = 5 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (1,0 + 1,5 + 45,5) \cdot 10^{-6} = \boxed{120,2 \cdot 10^{-6}}. \quad (16)$$

В цифровых ИМС меры по согласованию параметров транзисторов, как это делается для входного дифференциального каскада ОУ при производстве аналоговых ИМС, не осуществляются. Поэтому реальное значение дрейфа будет выше, чем определено в выражении (16).

Оценка влияния входного тока операционного усилителя на стабильность временных интервалов

В момент сравнения на ОУ опорного напряжения $U_{ИОН2}$ и напряжения U_C на конденсаторе C , к резистору $R1$ ($R2$) приложено напряжение $U_R^* = U_{ИОН1} - U_{ИОН2}$. Для выбранных в качестве примера значений $U_{ИОН1} = 5,0$ В; $U_{ИОН2} = 3,3$ В, напряжение $U_R^* = 1,7$ В. Значение протекающего в этот момент тока по резистору R (см. рис. 3) определяется значением его сопротивления $I_R^* = U_R^* / R$. При выборе реального значения сопротивления резистора R от 1,2 кОм до 1,2 МОм, значение тока I_R^* варьируется от 1,42 мА до 1,42 мкА.

Для обеспечения стабильной работы устройства (генерирования импульсов) входной ток ОУ должен быть значительно меньше значения тока I_R^* : $I_{ВХ\text{ ОУ}} \ll I_R^*$. А для обеспечения высокой стабильности преобразования дрейф входного тока $\delta_{I_{ВХ\text{ ОУ}}}$ должен быть меньше тока I_R^* в соответствии с выражениями (10)...(13) не менее чем в 10^6 раз. К сожалению, справочные данные по дрейфу входного тока ОУ приводятся редко и они зачастую противоречивы.

Оценка влияния параметров радиоэлементов на частоту генерируемых временных интервалов

Частота колебаний f_K формирователя временных интервалов в соответствии с выражением (6) определяется следующим выражением:

$$f_K = \frac{1}{T_K} = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2RC \ln 1,7} = \frac{1,2}{RC}. \quad (17)$$

Для предварительно выбранных значений сопротивления резистора R от 1,2 кОм до 1,2 МОм и значений емкости $C = 10$ пФ, частота f_K будет изменяться от 100 МГц до 100 кГц. Диапазон частот может быть ограничен значениями следующих параметров радиоэлементов:

- максимальной частоты работы цифровой микросхемы D -триггера;
- входного тока ОУ;
- быстродействия ОУ.

Цифровые КМОП-микросхемы малой степени интеграции серии 1554 работоспособны до 140 МГц (так называемая внутренняя частота переключения триггеров). На печатной плате при применении цифровых ИМС малой степени интеграции значение тактовой частоты редко удастся установить более 40–70 МГц. При компактном расположении компонентов акселерометра в виде гибридной микросхемы значение генерируемой частоты возможно получить более высоким.

Основная трудность при определении частоты генерации возникает при выборе ОУ. Быстродействие ОУ, определяемое скоростью нарастания выходного сигнала $I_{U_{ВЫХ}}$, и значение его входного тока $I_{ВХ}$ находятся, как правило, в противоречии – быстродействующие ОУ могут обеспечить высокие частоты генерации, но имеют относительно высокие входные токи, а ОУ с малыми входными токами, как правило, не имеют высокого быстродействия. В зависимости от выбранного ОУ, под его входной ток и быстродействие подбираются значения сопротивления времязадающего резистора R и тем самым определяется частота генерации. При этом ОУ надо выбирать с минимальным дрейфом напряжения смещения $\Delta U_{см} / \Delta T$.

Схемотехника цепей разряда времязадающих конденсаторов

Схемотехника цепей разряда времязадающих конденсаторов $C1$ и $C2$, показанных на рис. 1 и 2, содержит диоды $VD1$ и $VD2$. Это не позволяет осуществить полный разряд этих конденсаторов до напряжения $U_C = 0$, так как есть некоторое остаточное напряжение на диоде

$VD1$ ($VD2$), вычитающееся из опорного напряжения $U_{\text{ион}2}$ и снижающего его стабильность. Для устранения этой нежелательной особенности схему разряда конденсаторов необходимо выполнить на электронных МДП-ключах $VT1$ и $VT2$, как это показано на рис. 2. Необходимо отметить, что для исключения влияния закрытого электронного ключа на параметры времязадающей цепи остаточный ток (ток утечки) стока МДП-транзистора $I_{\text{ут МДП}}$ должен быть соизмерим или меньше входного тока операционного усилителя $I_{\text{вх оу}}$.

Заключение

Рассмотренные схмотехнические предложения по повышению метрологических характеристик микромеханического акселерометра с емкостным датчиком перемещения позволяют повысить стабильность работы преобразовательной части акселерометра. Так, относительная нестабильность формирования временного интервала δ_t исходного, предположительного и с принятием многих допущений, схмотехнического решения составляет $\delta_t = 120,2 \cdot 10^{-6}$. Применение рассмотренных схмотехнических предложений позволяет снизить это значение до $\delta_t = 12,44 \cdot 10^{-6}$. А для улучшенного варианта – $\delta_t = 0,725 \cdot 10^{-6}$, что более чем на два порядка улучшает этот параметр.

Рассмотренные схмотехнические предложения также могут быть использованы для широкого круга измерительных приборов, в которых для измерения физической величины используются датчики перемещения емкостного типа.

Список литературы

1. Ковалев И. В., Нургалева Ю. А., Гриценко С. Н., Усачев А. В. К проблеме выбора структуры автоматизированной системы управления летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 3. С. 105–110.
2. Борисова А. Ю., Смаль А. В. Анализ разработок современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Инженерный вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2017. № 5. С. 50–57.
3. Трефилов П. М. Сравнительный анализ улучшения точностных характеристик инерциальных навигационных систем // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2019. М., 2019.
4. Андреев С. В., Ильиных В. В., Ильиных О. А. [и др.]. Оценка влияния погрешностей инерциальных датчиков на точность бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 2. С. 29–34.
5. Дубовской В. Б., Кисленко К. В., Пшеняник В. Г. Методика повышения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, оснащенных высокочувствительными акселерометрами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 590–595.
6. Волков В. Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Решетникова. 2011. № 2 (87).
7. Лукьянов В. В., Медведев В. О., Медведева Ю. Д. Определение навигационных параметров наземного подвижного объекта с помощью микромеханических инерциальных датчиков // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 11. С. 40–46. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36842> (дата обращения: 14.09.2023).
8. Прохорцов А. В., Минина О. В. Обзор высокоточных акселерометров российских производителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 10. С. 301–305.
9. Ключников А. И. Оценка температурной погрешности микромеханического акселерометра // Ракетно-космическая техника. НПО автоматики имени академика Н. А. Семихатова : VII науч.-техн. конф. молодых специалистов (г. Екатеринбург, 8–10 апреля 2015). Екатеринбург, 2015. Ч. 1. С. 219–229.
10. Ватутин М. А., Ключников А. И. Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 276–284. doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284
11. Скоробогатов В. В. Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 10. С. 17–29.
12. Буянкин М. П., Ватутин М. А., Ключников А. И. Адаптация маятникового акселерометра компенсационного типа к возмущающим факторам космического пространства // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 1. С. 55–59.
13. 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.
14. 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

15. Ватулин М. А., Ключников А. И., Петров Д. Г., Сударь Ю. М. Методика схемотехнического построения интегрирующего маятникового акселерометра // Труды МАИ. 2023. № 128. doi: 10.34759/trd-2023-128-18
16. Арбузов В. П. Измерительные цепи прямого преобразования для емкостных акселерометров и гироскопов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 997–1004.
17. Распопов В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2007. 400 с.
18. Дворников А. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н. [и др.]. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле // Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 1. С. 96–111. doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111
19. Бормонтов Е. Н., Сухотерин Е. В., Колесников Д. В., Невежин Е. В. Способы стабилизации основных характеристик источника опорного напряжения // Фундаментальные исследования. 2014. № 5, ч. 5. С. 934–938.
20. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.

References

1. Kovalev I.V., Nurgaleeva Yu.A., Gritsenko S.N., Usachev A.V. On the problem of choosing the structure of an automated aircraft control system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2009;(3):105–110. (In Russ.)
2. Borisova A.Yu., Smal' A.V. Analysis of the development of modern free-form inertial navigation systems. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*. 2017;(5):50–57. (In Russ.)
3. Trefilov P.M. Comparative analysis of improving the accuracy characteristics of inertial navigation systems. *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya. VSPU-2019 = XIII All-Russian Meeting on management problems. VSPU-2019*. Moscow, 2019. (In Russ.)
4. Andreev S.V., Il'inykh V.V., Il'inykh O.A. et al. Assessment of the influence of errors of inertial sensors on the accuracy of a strapback inertial navigation system. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Almaz-Antey East Kazakhstan Region Concern*. 2018;(2):29–34. (In Russ.)
5. Dubovskoy V.B., Kislenco K.V., Pshenyaniy V.G. Methodology for improving the accuracy of navigation support for spacecraft equipped with highly sensitive accelerometers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2018;61(7):590–595. (In Russ.)
6. Volkov V.L. Substantiation of requirements for the parameters of a micromechanical accelerometer. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Reshetnikova = Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Reshetnikov*. 2011;(2). (In Russ.)
7. Luk'yanov V.V., Medvedev V.O., Medvedeva Yu.D. Determination of navigation parameters of a terrestrial mobile object using micromechanical inertial sensors. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern science-intensive technologies*. 2017;(11):40–46. (In Russ.). Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36842> (accessed 14.09.2023).
8. Prokhortsov A.V., Minina O.V. Review of high-precision accelerometers from Russian manufacturers. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2019;(10):301–305. (In Russ.)
9. Klyuchnikov A.I. Evaluation of the temperature error of a micromechanical accelerometer. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. NPO avtomatiki im. akademika N.A. Semikhatova: VII nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (g. Ekaterinburg, 8–10 aprelya 2015) = Rocket and space technology. NPO of Automation named after Academician N.A. Semikhatov : VII Scientific and Technical Conference of young specialists (Yekaterinburg, 8–10 April 2015)*. Ekaterinburg, 2015;Pt.1:219–229. (In Russ.)
10. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. Mathematical model of the error of the compensation accelerometer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2023;66(4):276–284. (In Russ.). doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284
11. Skorobogatov V.V. Problems of developing a wide-band quartz pendulum accelerometer with digital feedback and ways to solve them. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2016;(10):17–29. (In Russ.)
12. Buyankin M.P., Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. Adaptation of a compensation-type pendulum accelerometer to the disturbing factors of outer space. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2020;(1):55–59. (In Russ.)
13. 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.)

14. 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
15. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Petrov D.G., Sudar' Yu.M. Method of circuit design of an integrating pendulum accelerometer. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2023;(128). (In Russ.). doi: 10.34759/trd-2023-128-18
16. Arbuzov V.P. Measuring direct conversion circuits for capacitive accelerometers and gyroscopes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2019;62(11):997–1004. (In Russ.)
17. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory: ucheb. posobie = Micromechanical devices : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 2007:400. (In Russ.)
18. Dvornikov A.V., Chekhovskiy V.A., Prokopenko N.N. et al. High-speed broadband operational amplifiers on a basic matrix crystal. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics*. 2023;28(1):96–111. (In Russ.). doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111
19. Bormontov E.N., Sukhoterlin E.V., Kolesnikov D.V., Nevezhin E.V. Methods of stabilizing the main characteristics of the reference voltage source. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2014;(5),pt.5:934–938. (In Russ.)
20. Dushin E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)

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,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Игорь Александрович Шевкунов

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

Igor A. Shevkunov

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department
of autonomous control systems,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 01.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 24.03.2025

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², Д. В. Якушов³, Г. В. Козлов⁴, В. С. Александров⁵

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

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³vsalexrus@gmail.com, ⁴gvk17@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды, такие как оксид индия-олова (ITO) и оксид алюминия-цинка (AZO), находят применение в различных областях электроники, включая солнечные элементы, дисплеи и сенсоры. Точное измерение их поверхностного сопротивления критически важно для оценки качества и производительности таких материалов. Однако существующие методы измерения имеют ограничения по точности. Цель работы заключается в разработке и исследовании средства измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов с помощью четырехзондового метода. Прибор должен обеспечивать высокую точность измерений, гибкость в настройке конфигурации зондов и быть интегрированным с компьютером для автоматизации процесса измерений и сбора данных. *Материалы и методы.* При разработке прибора и способа его коммутации с объектом исследований использованы платиновые зонды, регулируемые микроприводы для настройки положения зондов, стабилизированный источник постоянного тока и высокочувствительные усилители. Используемая конфигурация зондов имеет треугольное расположение, которое может быть адаптировано для различных типов образцов. Для калибровки прибора предусмотрено использование эталонных образцов. Программная часть включает микроконтроллер STM32 и интерфейс, реализованный на Python. *Результаты.* Устройство показало высокую точность измерений ($\pm 1\%$) в диапазоне от 10 Ом/□ до 10 кОм/□ и успешно протестировано на образцах ITO и AZO. Применение треугольной конфигурации зондов позволило точно измерять сопротивление на неоднородных материалах. Программное обеспечение предоставляет удобный интерфейс для визуализации и анализа данных. *Выводы.* Разработанное устройство отвечает заявленным требованиям и может быть использовано для контроля качества прозрачных проводящих оксидов в различных областях, требующих точных измерений поверхностного сопротивления. Программная часть устройства позволяет легко интегрировать его в рабочие процессы, автоматизируя сбор и обработку данных. В перспективе возможна доработка устройства для повышения удобства использования и расширения функциональности.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, поверхностное сопротивление, четырехзондовый метод, микроконтроллер, программное обеспечение, калибровка, измерение сопротивления, USB-интерфейс

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Козлов Г. В., Александров В. С. Прибор для измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов четырехзондовым методом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 91–96. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-11

A DEVICE FOR MEASURING THE SURFACE RESISTANCE OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BY THE FOUR-PROBE METHOD

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², D.V. Yakushov³, G.V. Kozlov⁴, V.S. Aleksandrov⁵

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

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³vsalexrus@gmail.com, ⁴gvk17@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides, such as indium tin oxide (ITO) and aluminum-doped zinc oxide (AZO), are essential materials for various electronic applications, including solar cells, displays, and sensors. Accurate measurement of their surface resistance is critical for evaluating the quality and performance of such materials. However, existing measurement methods have limitations in terms of accuracy and versatility. The four-probe method, known

for its high precision, is an effective approach for these measurements. The objectives of this study are to develop and investigate a device for measuring the surface resistance of TCOs using the four-probe method. The device must provide high measurement accuracy, flexibility in probe configuration adjustments, and integration with a PC to automate the measurement process and data collection. *Materials and Methods.* The device was developed using platinum probes, adjustable micro-drives for probe positioning, a stabilized DC power source, and high-sensitivity amplifiers. The probe configuration uses a triangular arrangement, which can be adapted for various types of samples. Calibration was performed using reference samples, and measurement accuracy was verified on real materials. The software includes an STM32 microcontroller and a PC interface implemented in Python. *Results.* The device demonstrated high measurement accuracy ($\pm 1\%$) within the range of $10\ \Omega/\square$ to $10\ \text{k}\Omega/\square$ and was successfully tested on ITO and AZO samples. The triangular probe configuration enabled precise resistance measurements on non-uniform materials. The software provides a user-friendly interface for data visualization and analysis. *Conclusions.* The developed device meets the stated requirements and can be used for quality control of TCOs in various applications requiring precise surface resistance measurements. The software component facilitates seamless integration into workflows, automating data collection and processing. Future improvements may include enhancing user convenience and expanding device functionality.

Keywords: transparent conducting oxides, surface resistance, four-probe method, microcontroller, software, calibration, resistance measurement, USB interface

Financing: the work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices» (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Kozlov G.V., Alexandrov V.S. A device for measuring the surface resistance of transparent conductive oxides by the four-probe method. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):91–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-11

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО), такие как *ITO* (оксид индия-олова) и *AZO* (оксид алюминия-цинка), находят широкое применение в производстве солнечных элементов, сенсоров, дисплеев и других электронных компонентов [1, 2]. Эти материалы обладают сочетанием высокой проводимости и прозрачности, что делает их незаменимыми для технологии экранов и солнечных панелей. Одним из важных параметров, определяющих качество прозрачных проводящих оксидов, является их поверхностное сопротивление, которое должно быть низким и равномерным по всей поверхности материала [3–5]. Для точного измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов часто используется четырехзондовый метод. Этот метод исключает влияние контактного сопротивления и позволяет измерять сопротивление материала на его поверхности [3]. Однако существующие устройства для таких измерений имеют ограничения, связанные с точностью, гибкостью настройки и сложностью использования. В этой статье представлено устройство для измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов, которое обладает высокой точностью, компактностью и возможностью настройки параметров в зависимости от типа исследуемого материала. Целью работы является разработка устройства для измерения поверхностного сопротивления с использованием четырехзондового метода, а также интеграция его с ПК для удобства управления и анализа данных.

Материалы и методы

Проектирование средства измерения поверхностного сопротивления ППО базируется на принципах высокой точности, гибкости конфигурации и простоты использования. Для этого был выбран четырехзондовый метод, который позволяет устранить влияние контактного сопротивления и измерять сопротивление материала в зависимости от его геометрии.

Основные задачи при разработке устройства включали:

- обеспечение точности измерений с минимальными погрешностями;
- создание устройства, которое может работать с различными конфигурациями зондов (треугольной, квадратной и линейной);
- интеграцию устройства с персональным компьютером для удобства управления и анализа данных.

Конструкция устройства

Корпус устройства выполнен из металла с экраном, что обеспечивает защиту от внешних электромагнитных помех. Платформа для размещения образца изготовлена из прозрачного

стекла, что позволяет визуально контролировать его положение и фиксацию. Направляющие для зондов оснащены регулируемыми микроприводами, которые позволяют точно настраивать расстояние между зондами и их расположение в зависимости от формы образца.

Зонды изготовлены из платины, что снижает контактное сопротивление и повышает точность измерений. Основная конфигурация зондов – треугольная схема, которая помогает учитывать неоднородности материала и градиенты сопротивления. Возможность регулировки расположения зондов позволяет использовать и другие конфигурации, такие как квадратная или линейная, для работы с различными типами образцов.

Электронная часть включает следующие основные элементы:

1) источник постоянного тока: стабилизированный источник тока обеспечивает подачу тока между зондами. Диапазон регулировки тока позволяет подбирать оптимальные условия для измерений;

2) высокочувствительные усилители: усилители с низким уровнем шума (например, ОРА227) используются для точного измерения напряжения на зондах;

3) АЦП (16 бит): используется для высокоточного считывания сигналов с зондов и передачи данных на микроконтроллер;

4) микроконтроллер STM32: управляет процессом измерений, регулирует подачу тока и положение зондов, а также обрабатывает данные с АЦП.

Структура средства измерения поверхностного сопротивления

Укрупненная структурная схема средства измерения поверхностного сопротивления посредством четырехзондового метода представлена на рис. 1.

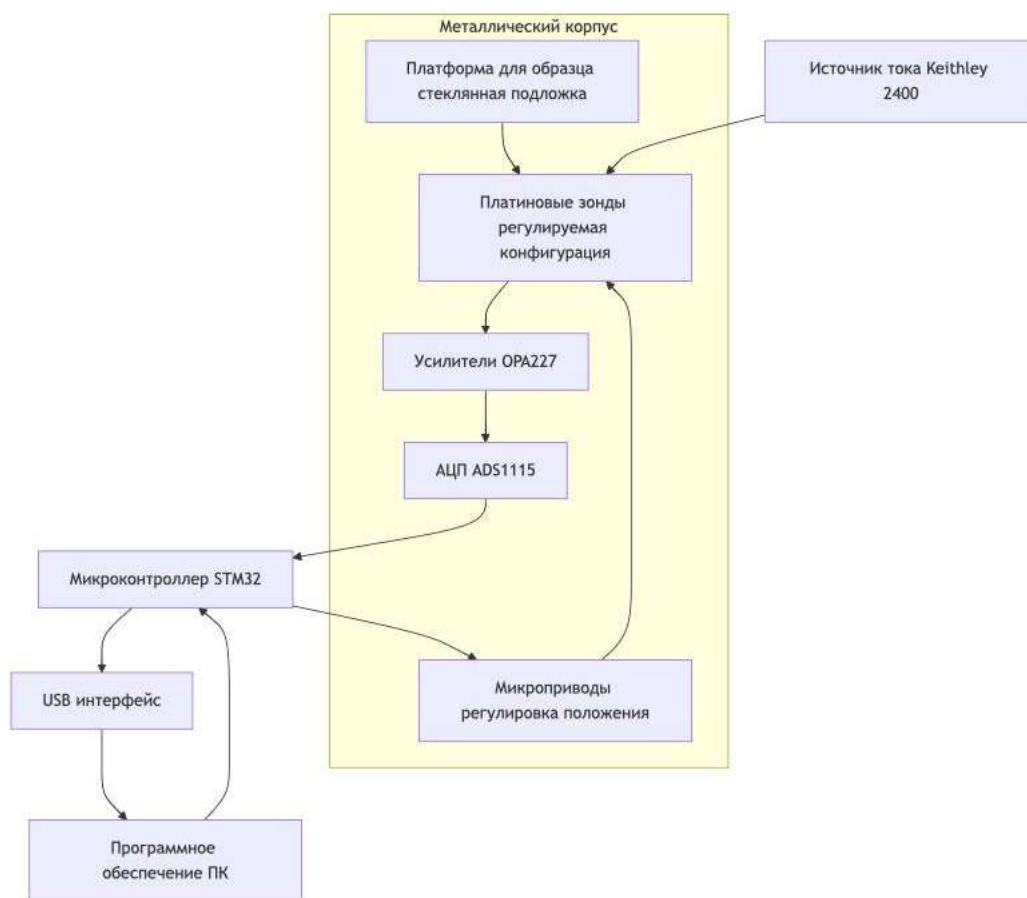


Рис. 1. Структурная схема разработанного средства измерения поверхностного сопротивления посредством четырехзондового метода

Программное обеспечение базируется на использовании микроконтроллера, который отвечает за управление процессом измерений, включая регулировку тока и положения зондов, а также сбор данных.

Интерфейс для персонального компьютера представляет собой приложение, написанное на Python, отображает результаты измерений в реальном времени и позволяет сохранять данные для дальнейшего анализа. Интерфейс включает функции калибровки устройства и адаптации к различным образцам [3].

Методы измерений и калибровки

Используемый четырехзондовый метод позволяет исключить влияние контактного сопротивления. Для этого ток подается через два внешних зонда, а напряжение измеряется между двумя внутренними¹ [6, 7]. Сопротивление вычисляется по закону Ома с учетом геометрического коэффициента, зависящего от конфигурации зондов. Калибровка устройства проводится с использованием эталонных образцов с известным сопротивлением, а также с учетом поправок на контактное сопротивление [8].

Разработанное средство измерений имеет следующие технические и метрологические характеристики:

- диапазон измерений: от 10 Ом/□ до 10 кОм/□;
- относительная основная погрешность измерения поверхностного сопротивления не более ± 1 %;
- габаритные размеры: 200×150×100 мм.

Калибровка средства измерений на основе использования эталонных образцов показала соответствие требуемым метрологическим характеристикам, результаты калибровки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты калибровки прибора с помощью эталонных образцов

Номер образца	Эталонное сопротивление, Ом/□	Измеренное значение, Ом/□	Относительная погрешность, %
1	50	49,8	0,4
2	500	499,6	0,08
3	1000	998,9	0,11

Прибор апробирован посредством измерений поверхностного сопротивления образцов ИТО и AZO, что подтвердило его метрологические характеристики и пригодность к работе с материалами, имеющими разные свойства:

- ИТО: поверхностное сопротивление варьировалось от 15 до 50 Ом/□. Измерения показали отличное согласование с данными производителя;
- AZO: сопротивление варьировалось от 1000 до 5000 Ом/□, что позволило выявить неоднородности на поверхности материала.

Треугольная конфигурация зондов подтвердила свою эффективность в работе с неоднородными образцами. Например, для тонкопленочных покрытий AZO она позволила точно выявить изменения сопротивления, связанные с изменением толщины слоя.

Программное обеспечение осуществляет управление процессом измерений, выполняет обработку экспериментальных данных, позволяет осуществлять построение графиков изменения сопротивления по площади исследуемого образца, а также в зависимости от других влияющих факторов.

Заключение

Разработанное средство измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов на основе четырехзондового метода обеспечивает высокую точность измерений (относительная погрешность не превышает ± 1 %), гибкость в настройке конфигурации зондов и удобство в использовании благодаря интеграции с персональным компьютером. Полученные результаты подтверждают его эффективность для использования в научных и промышленных приложениях, связанных с исследованием и контролем качества материалов. В перспективе предполагается дальнейшее совершенствование устройства, включая расширение функциональных возможностей и улучшение интерфейса.

¹ ГОСТ Р 53134–2008. Электрические и магнитные измерения. Методы измерения сопротивления проводников, обладающих высокой электропроводностью.

Список литературы

1. Пандей С. С. Transparent Conducting Oxides // *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2003. Т. 39, № 1. С. 1–40.
2. 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.
3. Пимента А. Д. Р., Ли Ж. М., Кардозо П. Ж. [и др.]. Four-Point Probe Measurement of Surface Resistivity of Transparent Conductive Oxides // *Journal of Applied Physics*. 2014. Т. 116, № 23. С. 233703.
4. 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.
5. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. Functional materials for dye-sensitized solar cells // *Журнал нано- и электронной физики*. 2015. Т. 7, № 4. С. 04062.
6. Лю Б. В., Джонсон Х. Ж., Мартин К. Л. [и др.]. Design and Development of a Precision Measurement System for Surface Resistance // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. Т. 65, № 10. С. 2621–2628.
7. Мак Криери Р. Л. *Electrochemical Techniques in Surface Analysis*. Springer, 2019. 285 с.
8. Artamonov D.V., Baranov V.A., Pecherskaya E.A. [et al.]. Application of a hyper-complex impedance model for indirect measurements of materials parameters of functional electronics // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*. Altay, 2019. P. 760–764.

References

1. Pandey S.S. Transparent Conducting Oxides. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2003;39(1):1–40.
2. 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 the Russian Academy of Sciences. inter-university. scientific.-practical conference*. Penza, 2018:256–258. (In Russ.)
3. Pimenta A.D. R., Li Zh.M., Kardozo P.Zh. et al. Four-Point Probe Measurement of Surface Resistivity of Transparent Conductive Oxides. *Journal of Applied Physics*. 2014;116(23):233703.
4. 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.)
5. Raksha S.V., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A., Nikolaev K.O. Functional materials for dye-sensitized solar cells. *Zhurnal nano- i elektronnoy fiziki = Journal of nano- and electronic physics*. 2015;7(4):04062.
6. Lyu B.V., Dzhonson Kh.Zh., Martin K.L. et al. Design and Development of a Precision Measurement System for Surface Resistance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016;65(10):2621–2628.
7. Mak Krieri R.L. *Electrochemical Techniques in Surface Analysis*. Springer, 2019:285.
8. Artamonov D.V., Baranov V.A., Pecherskaya E.A. et al. Application of a hyper-complex impedance model for indirect measurements of materials parameters of functional electronics. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*. Altay, 2019:760–764.

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Дмитрий Викторович Якушов

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

Dmitry V. Yakushov

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

Геннадий Васильевич Козлов

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

Gennady V. Kozlov

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

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)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.02.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.03.2025

Принята к публикации/Accepted 14.04.2025

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

УДК 615.47

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МУКОПОЛИСАХАРИДОЗА 1 ТИПА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МРТ

Е. В. Богданов

Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского, Москва, Россия
Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1) является редким наследственным заболеванием лизосомного метаболизма, что приводит к накоплению гликозаминогликанов в тканях организма. Вследствие нейродегенеративных изменений у пациентов с МПС 1 наблюдаются когнитивные и моторные нарушения, которые требуют постоянного клинического мониторинга. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является основным инструментом визуализации структурных изменений в головном мозге, однако традиционные методы анализа МРТ-данных обладают рядом ограничений, связанных с субъективной интерпретацией изображений и высокой трудоемкостью обработки данных. *Материалы и методы.* В настоящем исследовании предложен алгоритм автоматизированного анализа МРТ-данных, направленный на оценку динамики изменений структуры головного мозга у пациентов с МПС 1. Алгоритм включает несколько ключевых этапов: предобработку изображений, количественный анализ объемов серого и белого вещества, а также желудочков. Вычисление объемов мозговых структур осуществляется на основе сегментированных данных, после чего производится их сравнение с возрастными и половыми нормативами. Особое внимание в алгоритме уделено расчету отклонений объемов серого и белого вещества, а также желудочков мозга от референтных значений, что позволяет количественно оценить степень нейродегенеративных изменений. На основе этих данных осуществляется оценка динамики заболевания путем сравнения параметров на последовательных временных точках. Введенные критерии изменения объемов мозговых структур позволяют определить степень прогрессирования патологического процесса, а также спрогнозировать дальнейшее развитие заболевания на основе экстраполяции текущих трендов. *Результаты и выводы.* Реализация алгоритма проведена в программной среде MATLAB, что обеспечивает автоматизацию обработки изображений, повышение точности расчетов и удобство интерпретации результатов. Разработанный подход протестирован на клинических данных пациентов с установленным диагнозом МПС 1, что позволило подтвердить его эффективность в оценке динамических изменений структур головного мозга.

Ключевые слова: мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1), магнитно-резонансная томография, алгоритм анализа МРТ-данных, объемы серого и белого вещества, желудочки мозга, динамика изменений

Для цитирования: Богданов Е. В. Анализ динамики мукополисахаридоза 1 типа на основе данных МРТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 97–104. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

ANALYSIS OF MUCOPOLYSACCHARIDOSIS TYPE 1 PROGRESSION BASED ON MRI DATA

E.V. Bogdanov

Russian Scientific Center of Surgery named after academician B.V. Petrovsky, Moscow, Russia
Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Abstract. *Background.* Mucopolysaccharidosis Type 1 (MPS 1) is a rare inherited lysosomal metabolism disorder that leads to the accumulation of glycosaminoglycans in body tissues. Due to neurodegenerative changes, patients with MPS

1 experience cognitive and motor impairments that require continuous clinical monitoring. Magnetic resonance imaging (MRI) is the primary tool for visualizing structural changes in the brain; however, traditional MRI data analysis methods have several limitations related to subjective image interpretation and the high complexity of data processing. *Materials and methods.* This study proposes an algorithm for automated MRI data analysis aimed at assessing the dynamics of brain structure changes in patients with MPS 1. The algorithm includes several key stages: image preprocessing, segmentation of brain structures, quantitative analysis of gray and white matter volumes, as well as ventricular structures. The calculation of brain structure volumes is performed based on segmented data, followed by comparison with age- and sex-specific normative values. A particular focus of the algorithm is the calculation of deviations in the volumes of gray and white matter, as well as brain ventricles, from reference values, which allows for a quantitative assessment of the degree of neurodegenerative changes. Based on this data, disease progression is evaluated by comparing parameters at successive time points. The introduced criteria for changes in brain structure volumes help determine the degree of pathological process progression and forecast further disease development through extrapolation of current trends. *Results and conclusions.* The algorithm has been implemented in the MATLAB programming environment, enabling automation of image processing, increased calculation accuracy, and ease of result interpretation. The developed approach was tested on clinical data from patients diagnosed with MPS 1, which confirmed its effectiveness in assessing dynamic changes in brain structures.

Keywords: mucopolysaccharidosis type 1 (MPS 1), magnetic resonance imaging, MRI data analysis algorithm, gray and white matter volumes, brain ventricles, change dynamics

For citation: Bogdanov E.V. Analysis of mucopolysaccharidosis type 1 progression based on MRI data. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):97–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-12

Введение

Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1) представляет собой наследственное лизосомное заболевание, обусловленное дефицитом фермента α -L-идуронидазы, что приводит к накоплению гликозаминогликанов в различных тканях организма. Данная патология характеризуется прогрессирующим поражением внутренних органов, костно-суставной системы и центральной нервной системы (ЦНС), что существенно снижает качество жизни пациентов [1].

Наиболее значимые изменения в структуре головного мозга при МПС 1 выявляются с использованием методов магнитно-резонансной томографии (МРТ). Однако стандартные методы визуального анализа данных МРТ требуют значительных временных затрат и подвержены субъективным интерпретациям. В связи с этим актуальной задачей является разработка автоматизированных алгоритмов анализа томографических изображений, способных количественно оценивать динамику нейродегенеративных изменений и прогнозировать дальнейшее течение заболевания [2, 3].

Настоящее исследование направлено на разработку алгоритма обработки данных МРТ, включающего расчет объемов желудочков, серого и белого вещества, а также вычисление отклонений объемов мозговых структур от нормативных значений с учетом возраста и пола пациента [4, 5] для получения количественных параметров оценки динамики заболевания.

Предложенный алгоритм реализован в программной среде MATLAB и протестирован на клинических данных пациентов с установленным диагнозом МПС 1.

Алгоритм анализа данных

Для структурированной обработки МРТ-данных и оценки динамики изменений предлагается последовательный алгоритм, включающий основные этапы от загрузки данных до прогнозирования дальнейшего развития патологического процесса. Данная схема упрощает процесс анализа, снижает субъективность интерпретации и позволяет проводить количественную оценку изменений структур головного мозга.

На следующем рисунке представлена блок-схема алгоритма, отражающая последовательность действий, необходимых для обработки и анализа данных (рис. 1).

На первом этапе производится ручной ввод данных:

1. Проверка возраста и пола пациента.
2. Запрос наличия данных предыдущих исследований и загрузка снимков.
3. Ввод объемов серого вещества, белого вещества и желудочков, если данные доступны или используется предыдущая серия МР-снимков.

Этот этап необходим для обеспечения индивидуального подхода к анализу данных пациента и повышения точности последующей обработки МР-снимков.



Рис. 1. Алгоритм программы

После ввода исходных данных и загрузки МР-снимков необходимо подготовить изображения для дальнейшего анализа. На этом этапе производится:

1. Предобработка данных:
 - 1) коррекция изображений с использованием вейвлет-порогового и анизотропного фильтров для снижения шума [6];
 - 2) нормализация яркости и интенсивности изображений.
2. Сегментация структур мозга:
 - 1) сегментация серого вещества, белого вещества и желудочков с использованием метода и морфологических операций [7];
 - 2) применение размытия для повышения точности сегментации.
3. Измерение объемов структур мозга: расчет объемов серого вещества, белого вещества и желудочков на основе сегментированных данных [3].

Таким образом, последовательная обработка данных – от предобработки изображений до измерения объемов – обеспечивает точное и надежное исследование структуры мозга, необходимое для дальнейшего анализа динамики заболевания.

После получения количественных данных о структуре мозга следующим шагом является их анализ в контексте возрастных и половых норм. Простое измерение объемов тканей не дает полной картины состояния пациента, поэтому необходимо сравнить их с нормативными значениями.

Для этого рассчитывается степень отклонения объемов серого вещества, белого вещества и желудочков от средних значений для соответствующей возрастной и половой группы. Это позволяет определить, насколько выражены потенциальные патологические изменения.

Расчет отклонений от нормы:

1. Вычисление отклонений объемов структур мозга от возрастных и половых норм с использованием формулы

$$\Delta_{\text{откл}} = \frac{|V_{\text{пац}} - V_{\text{норм}}|}{\sigma_{\text{норм}}},$$

где $V_{\text{пац}}$ – это объем ткани в мозге пациента; $V_{\text{норм}}$ – средний объем для нормальной группы людей (в том числе с учетом пола и возраста); σ – стандартное отклонение для данной группы. Это позволяет определить, насколько объем ткани пациента отклоняется от средних значений для его возрастной и половой группы, что в свою очередь дает представление о том, насколько сильно развиты патологические изменения.

2. Сравнение отклонений.

После того, как отклонения для каждой ткани были вычислены, сравниваются отклонения для текущего и предыдущего снимков мозга пациента. Это необходимо для того, чтобы определить, изменилось ли состояние пациента, и если да – в какую сторону. Сравнение отклонений проводится по следующей формуле:

$$\text{Изменение отклонения} = \text{Отклонение}_{\text{новый}} - \text{Отклонение}_{\text{пред}}.$$

Если отклонение увеличивается, это может свидетельствовать о прогрессировании заболевания или ухудшении состояния пациента.

Следующим этапом является оценка текущего состояния пациента на основе этих изменений. Для этого используется нормировка изменения отклонений и вычисление вероятности ухудшения или улучшения состояния пациента. Эта вероятность оценивается с помощью формул:

$$P_{\text{ухудшение}} = \max \left(0, \min \left(1, \frac{\text{Изменение отклонения}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{улучшение}} = \max \left(0, \min \left(1, \frac{-\text{Изменение отклонения}}{1,5} \right) \right) \times 100,$$

где $P_{\text{ухудшение}}$ – вероятность ухудшения состояния; $P_{\text{улучшение}}$ – вероятность улучшения. Оба значения нормируются в диапазон от 0 до 100, что позволяет четко интерпретировать результат.

3. Прогнозирование изменений.

Важным этапом является прогнозирование будущих изменений состояния пациента. Для этого используются данные о текущих изменениях в отклонениях, которые экстраполируются на различные временные промежутки – например, на полгода, год или три года. Прогнозы вычисляются с помощью следующей формулы:

$$\text{Прогноз изменения отклонений} = \text{Изменение отклонений} \times (1 + t),$$

где t – временной интервал, в который мы прогнозируем изменения. Важно, что экстраполяция изменений позволяет не только отслеживать динамику отклонений, но и прогнозировать возможные ухудшения состояния пациента в будущем.

Для каждого временного промежутка рассчитываются вероятности ухудшения, улучшения и стабильности состояния пациента, используя аналогичные формулы:

$$P_{\text{ухудшение}}^{\text{прогноз}} = \max \left(0, \min \left(1, \frac{\text{Прогноз изменения отклонений}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{улучшение}}^{\text{прогноз}} = \max \left(0, \min \left(1, \frac{-\text{Прогноз изменения отклонений}}{1,5} \right) \right) \times 100;$$

$$P_{\text{стабильность}}^{\text{прогноз}} = 100 - P_{\text{ухудшение}}^{\text{прогноз}} - P_{\text{улучшение}}^{\text{прогноз}}.$$

Эти вероятности позволяют не только отслеживать текущие изменения, но и делать выводы о том, какое состояние пациента можно ожидать в будущем. Таким образом, алгоритм предоставляет полную картину о состоянии пациента как на текущий момент, так и с учетом возможных изменений в будущем, что является важным для принятия решений о лечении и прогнозировании его эффективности.

Реализация алгоритма

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB и включает в себя следующие ключевые модули:

- **Обработка входных данных:** Алгоритм принимает данные МРТ-сканов в различных форматах (например, NIfTI, DICOM). Предусмотрена проверка корректности загружаемых данных.
- **Фильтрация шума:** Для повышения качества изображений используются вейвлет-пороговый и анизотропный фильтры. Эти методы устраняют артефакты и шум, сохраняя ключевые особенности изображения.
- **Сегментация:** Центральным срез изображения используется для упрощения анализа. Применяется метод Otsu для выделения серого и белого вещества, а также морфологические операции для уточнения контуров желудочков мозга.
- **Анализ отклонений:** Вычисляются отклонения от возрастных и половых норм. Эти данные интерпретируются для оценки текущего состояния пациента.
- **Прогнозирование:** На основе изменений в объемах структур мозга строится прогноз с учетом временных интервалов. Оцениваются вероятности ухудшения, улучшения или стабилизации состояния пациента.

Код алгоритма включает обработку изображений, фильтрацию, сегментацию и расчет объемов структур. Для улучшения взаимодействия с пользователем реализована система пошагового ввода данных. Алгоритм в среде MATLAB представлен на рис. 2.

```
function calculate_MPS()
% Основная функция для обработки и анализа МРТ снимка.

% Запрос возраста до числа
age = input('Введите возраст пациента: ');
while age <= 0 || age > 120
    fprintf('Ошибка: возраст должен быть от 1 до 120 лет. Попробуйте еще раз.\n');
    age = input('Введите возраст пациента: '); % Запрашиваем снова, если введено некорректное значение
end

% Запрос пола до числа
sex = input('Введите пол пациента (M для мужского, F для женского): ', 's');
while ~ismember(sex, {'M', 'F'})
    fprintf('Ошибка: пол должен быть M или F. Попробуйте еще раз.\n');
    sex = input('Введите пол пациента (M для мужского, F для женского): ', 's'); % Запрашиваем снова, если введено некорректное значение
end

% Теперь запрашиваем, есть ли данные предыдущего исследования
previous_data = input('Наши ли данные предыдущего исследования (Да/Нет) ', 's');

if strcmp(previous_data, 'Да') || strcmp(previous_data, 'YES')
% Если данные предыдущего исследования известны
fprintf('Данные предыдущего исследования известны.\n');

% Ввод объемов для предыдущего исследования
fprintf('Введите данные по объемам структур мозга на момент предыдущего исследования.\n');
previous_white_matter = input('Введите объем белого вещества (мл) ');
previous_gray_matter = input('Введите объем серого вещества (мл) ');
previous_ventricles = input('Введите объем желудочков (мл) ');

% Ввод возраста на момент предыдущего исследования
while true
    previous_age = input('Введите возраст пациента на момент предыдущего исследования: ');
    if previous_age > 0 && previous_age <= 120
        break; % Завершаем цикл при корректном значении
    else
        fprintf('Ошибка: возраст должен быть от 1 до 120 лет. Попробуйте еще раз.\n');
    end
end

% Загрузка нового снимка
fprintf('Теперь загрузите новый снимок для анализа.\n');
new_mri_data = load_mri_data('новый');
```

```
% Суммарная оценка изменений
total_deviation_diff = weight_gray * gray_deviation_diff + ...
    weight_white * white_deviation_diff + ...
    weight_ventricle * ventricle_deviation_diff;

% Оценка вероятностей текущего состояния
probability_deterioration = max(0, min(1, total_deviation_diff / 1.5)) * 100; % Нормализован отклонение к шкале вероятностей
probability_improvement = max(0, min(1, -total_deviation_diff / 1.5)) * 100;
probability_stability = max(0, 100 - probability_deterioration - probability_improvement);

% Вывод отклонений для обоих снимков
fprintf('Отклонение серого вещества (предыдущий снимок) %.2f, (новый снимок) %.2f\n', previous_gray_deviation, new_gray_deviation);
fprintf('Отклонение белого вещества (предыдущий снимок) %.2f, (новый снимок) %.2f\n', previous_white_deviation, new_white_deviation);
fprintf('Отклонение желудочков (предыдущий снимок) %.2f, (новый снимок) %.2f\n', previous_ventricle_deviation, new_ventricle_deviation);

% Вывод изменений отклонений
fprintf('Изменение отклонений для серого вещества %.2f\n', gray_deviation_diff);
fprintf('Изменение отклонений для белого вещества %.2f\n', white_deviation_diff);
fprintf('Изменение отклонений для желудочков %.2f\n', ventricle_deviation_diff);

% Прогнозирование на будущее
time_intervals = [0.5, 1, 2]; % Периоды, год, три года
predicted_deviation_diffs = total_deviation_diff * (2 + time_intervals); % Прогнозы изменений
predicted_probabilities = arrayfun(@(diff) ...
    [max(0, min(1, diff / 1.5)) * 100, ...
    max(0, min(1, -diff / 1.5)) * 100, ...
    max(0, 100 - abs(diff) / 1.5 * 100)], ...
    predicted_deviation_diffs, 'UniformOutput', false);

% Вывод текущего состояния
fprintf('Текущее состояние:\n');
fprintf('Ухудшение с вероятностью %.2f%%\n', probability_deterioration);
fprintf('Улучшение с вероятностью %.2f%%\n', probability_improvement);
fprintf('Отсутствие изменений с вероятностью %.2f%%\n', probability_stability);

% Прогноз на будущее
for i = 1:length(time_intervals)
    fprintf('Прогноз состояние через %.1f лет:\n', time_intervals(i));
    fprintf('Ухудшение с вероятностью %.2f%%\n', predicted_probabilities(i)(1));
    fprintf('Улучшение с вероятностью %.2f%%\n', predicted_probabilities(i)(2));
    fprintf('Отсутствие изменений с вероятностью %.2f%%\n', predicted_probabilities(i)(3));
end
```

Рис. 2. Реализация алгоритма в среде MATLAB

Результаты и обсуждение

Пример клинического применения.

Пациент: мужчина, 15 лет, с установленным диагнозом МПС 1. Проведено два исследования МРТ с интервалом в 1 год. Объемы структур мозга представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объемы структур мозга

Структура мозга	Первичное исследование, см ³	Повторное исследование, см ³
Серое вещество	770	740
Белое вещество	440	410
Желудочки	55	65

Возраст пациента: **14** лет.

Диагноз: Мукополисахаридоз 1 типа (МПС 1 типа).

Согласно вышеизложенным формулам MATLAB обрабатывает данные и получает результаты.

Полученные результаты после обработки данных:

1) отклонение для серого вещества:

- отклонение для серого вещества (первичное) = **0,67**;
- отклонение для серого вещества (последнее) = **1,33**;

2) отклонение для белого вещества:

- отклонение для белого вещества (первичное) = **0,57**;
- отклонение для белого вещества (последнее) = **1,43**;

3) отклонение для желудочков:

- отклонение для желудочков (первичное) = **0,625**;
- отклонение для желудочков (последнее) = **1,875**;

4) изменения в отклонениях:

- серое вещество: $1,33 - 0,67 = \mathbf{0,66}$;
- белое вещество: $1,43 - 0,57 = \mathbf{0,86}$;
- желудочки: $1,875 - 0,625 = \mathbf{1,25}$;

5) расчет суммарного изменения отклонений:

Используя вес для каждой структуры (предположительно, 0,4 – для серого вещества, 0,3 – для белого вещества и 0,3 – для желудочков):

– общее изменение = $0,4 \times 0,66 + 0,3 \times 0,86 + 0,3 \times 1,25 = 0,897$;

б) расчет вероятности ухудшения и прогноз состояния:

– вероятность ухудшения = **59,8 %**.

Проекция изменений на будущее (полгода, год и три года):

– для полугода: $\approx 89,7 \%$;

– прогноз через 1 год $\approx 119,6 \%$, то есть **100 %**;

– для трех лет: $\approx 239,2 \%$, то есть **100 %**.

Обсуждение

Для более полного раскрытия темы следует учитывать влияние сопутствующих факторов, таких как генетическая гетерогенность и индивидуальные особенности пациентов, на прогрессирование заболевания [8]. Кроме того, важным аспектом является развитие методов автоматизированного анализа данных МРТ с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволит не только повысить точность прогнозов, но и значительно сократить время обработки данных. Интеграция многомодальных данных, включая биохимические показатели и результаты других инструментальных исследований, также представляется перспективным направлением для улучшения диагностики и мониторинга состояния пациентов [9].

Разработанный алгоритм продемонстрировал высокую точность в оценке изменений объемов структур мозга. Прогнозирование позволяет своевременно корректировать терапевтические подходы и предотвращать тяжелые осложнения, такие как гидроцефалия и эпилепсия [10]. В клинической практике данный подход может быть использован для мониторинга пациентов с МПС 1 и другими нейродегенеративными заболеваниями.

Заключение

В ходе проведенного исследования был разработан и реализован алгоритм автоматизированного анализа магнитно-резонансных томографических данных, предназначенный для мониторинга прогрессирования мукополисахаридоза 1 типа (МПС 1). Алгоритм включает этапы предобработки изображений, сегментации структур головного мозга, количественного анализа объемов серого и белого вещества, а также желудочков. Использование метода расчета отклонений объемов мозговых структур от нормативных значений позволило объективно оценить динамику нейродегенеративных изменений и прогнозировать вероятность дальнейшего ухудшения состояния пациента.

Реализация алгоритма в среде MATLAB обеспечила высокую степень автоматизации обработки данных, что позволило сократить временные затраты на анализ и повысить точность интерпретации результатов.

Проведенное испытание алгоритма автоматизированного анализа МРТ-данных на клиническом примере пациента с мукополисахаридозом 1 типа (МПС 1) подтвердило его эффективность в оценке динамики структурных изменений головного мозга. В ходе анализа были успешно выполнены все ключевые этапы: предобработка изображений, сегментация серого и белого вещества, а также желудочков мозга, что позволило провести количественную оценку объемов этих структур. Полученные результаты были сопоставлены с возрастными и половыми нормативами, что обеспечило объективную интерпретацию данных.

Выявленные изменения мозговых структур коррелировали с клиническими проявлениями заболевания, подтверждая значимость предложенного алгоритма для мониторинга состояния пациентов. Автоматизированный подход позволил минимизировать влияние субъективных факторов и повысить точность измерений. Таким образом, разработанный метод может быть полезен для динамического наблюдения за пациентами с МПС 1, оценки эффективности терапии и дальнейших исследований, направленных на изучение нейродегенеративных процессов при данном заболевании [10].

Полученные результаты подтверждают значимость разработки методов количественного анализа МРТ-данных для диагностики и мониторинга редких наследственных заболеваний, включая МПС 1. Внедрение автоматизированных алгоритмов обработки изображений способствует повышению объективности оценки состояния пациентов, что особенно важно в условиях прогрессирующих нейродегенеративных заболеваний.

Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает интеграцию алгоритма с методами машинного обучения и искусственного интеллекта, что позволит повысить точность прогнозов и адаптировать анализ к индивидуальным особенностям пациентов.

Перспективы

Дальнейшее развитие алгоритма предполагает интеграцию данных лабораторных и инструментальных исследований, что позволит повысить точность прогнозов. Также актуально использование методов искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных и повышения эффективности анализа. Кроме того, перспективным направлением является объединение данных нейровизуализации с биохимическими и генетическими маркерами заболевания, что может привести к созданию комплексных моделей персонализированного мониторинга состояния пациентов с МПС 1.

Список литературы

1. Вашакмадзе Н. Д. Применение методов нейровизуализации для диагностики и мониторинга прогрессирования редких наследственных заболеваний // Вестник радиологии. 2020. № 5. С. 45–52.
2. Palmucci S. [et al.]. Imaging findings of mucopolysaccharidoses: a pictorial review // Insights Imaging. 2013. № 4. P. 443–459.
3. Reichert R. Neuroimaging Findings in Patients with Mucopolysaccharidosis: What You Really Need to Know // RadioGraphics. 2016. Vol. 36, № 5. P. 1448–1462.
4. Nagano R. Three-dimensional CT and histopathological findings of airway malacia in Hunter syndrome // Tokai J Exp Clin Med. 2007. Vol. 32. № 2. P. 59–61.
5. Союз педиатров России. Мукополисахаридоз I типа у детей : клинические рекомендации. М. : Союз педиатров России, 2016. 32 с.
6. Davison J. E. Quantitative in vivo brain magnetic resonance spectroscopic monitoring of neurological involvement in mucopolysaccharidosis type II (Hunter Syndrome) // Journal of Inherited Metabolic Disease: Official Journal of the Society for the Study of Inborn Errors of Metabolism. 2010. Vol. 33. P. 395–399.
7. Davison J. E. Intellectual and neurological functioning in Morquio syndrome (MPS IVa) // Journal of inherited metabolic disease. 2013. Vol. 36. P. 323–328.
8. Rasalkar D. D. Pictorial review of mucopolysaccharidosis with emphasis on MRI features of brain and spine // The British journal of radiology. 2011. Vol. 84, № 1001. P. 469–477.
9. Jan Ya-Ting. Adjunct diagnostic value of radiological findings in mucopolysaccharidosis type IVa-related thoracic spinal abnormalities: a pilot study // Orphanet journal of rare diseases. 2022. Vol. 17, № 1. P. 296.
10. Mandolfo O. Innate Immunity in Mucopolysaccharide Diseases // International journal of molecular sciences. 2022. Vol. 23, № 4. P. 1999.

References

1. Vashakmadze N.D. Application of neuroimaging methods for diagnosis and monitoring of the progression of rare hereditary diseases. *Vestnik radiologii = Bulletin of Radiology*. 2020;(5):45–52. (In Russ.)
2. Palmucci S. et al. Imaging findings of mucopolysaccharidoses: a pictorial review. *Insights Imaging*. 2013;(4):443–459.
3. Reichert R. Neuroimaging Findings in Patients with Mucopolysaccharidosis: What You Really Need to Know. *RadioGraphics*. 2016;36(5):1448–1462.
4. Nagano R. Three-dimensional CT and histopathological findings of airway malacia in Hunter syndrome. *Tokai J Exp Clin Med*. 2007;32(2):59–61.
5. *Soyuz pediatrov Rossii. Mukopolisakharidoz I tipa u detey: klinicheskie rekomendatsii = Union of Pediatricians of Russia. Type I mucopolysaccharidosis in children : clinical recommendations*. Moscow: Soyuz pediatrov Rossii, 2016:32. (In Russ.)
6. Davison J.E. Quantitative in vivo brain magnetic resonance spectroscopic monitoring of neurological involvement in mucopolysaccharidosis type II (Hunter Syndrome). *Journal of Inherited Metabolic Disease: Official Journal of the Society for the Study of Inborn Errors of Metabolism*. 2010;33:395–399.
7. Davison J.E. Intellectual and neurological functioning in Morquio syndrome (MPS IVa). *Journal of inherited metabolic disease*. 2013;36:323–328.
8. Rasalkar D.D. Pictorial review of mucopolysaccharidosis with emphasis on MRI features of brain and spine. *The British journal of radiology*. 2011;84(1001):469–477.
9. Jan Ya-Ting. Adjunct diagnostic value of radiological findings in mucopolysaccharidosis type IVa-related thoracic spinal abnormalities: a pilot study. *Orphanet journal of rare diseases*. 2022;17(1):296.
10. Mandolfo O. Innate Immunity in Mucopolysaccharide Diseases. *International journal of molecular sciences*. 2022;23(4):1999.

*Информация об авторах / Information about the authors***Евгений Владимирович Богданов**

аспирант,

Российский научный центр хирургии

имени академика Б. В. Петровского

(Россия, г. Москва, ул. Фотиевой, 10, с. 1)

E-mail: Evgeniy.bogdanov95@gmail.com

Evgeniy V. Bogdanov

Postgraduate student,

Russian Scientific Center of Surgery

named after academician B.V. Petrovsky

(build. 1, 10 Fotieva street, Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**The author declares no conflicts of interests.****Поступила в редакцию / Received 03.03.2025****Поступила после рецензирования / Revised 28.03.2025****Принята к публикации / Accepted 07.04.2025**

СЖАТИЕ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В БИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О. Е. Безбородова¹, А. Ю. Бодин², О. Н. Бодин³, М. Н. Крамм⁴, Д. В. Мартынов⁵

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

^{2,4} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

^{3,5} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

^{1,5} ot@pnzgu.ru, ^{2,3,4} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ввиду большой территориальной протяженности нашей страны задача сжатия и передачи медицинской информации различной природы занимает одно из ключевых мест в обеспечении населения качественной медицинской помощью. При этом необходимо отметить, что исполняться алгоритмы сжатия данных без потерь качества должны не только на распространенных архитектурах настольных компьютеров, но и на различных специализированных платформах, применяемых, к примеру, в переносных медицинских регистраторах биопотенциалов. Поэтому задача разработки и исследования методов неискажающего сжатия медицинских данных является актуальной научной и прикладной задачей, обусловленной развитием и совершенствованием вычислительной техники. Целью данной работы является оценка методов сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: анализ существующих методов сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала; выбор метода сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала. Для биотелеметрической системы как радиотехнической и информационно-измерительной системы основными показателями являются погрешность измерения и достоверность передачи данных. *Материалы и методы.* Приведена структурная схема биотелеметрической системы, в ее основу положена структура разработанной распределенной кардиодиагностической системы и ее канала связи, рассмотрены методы сжатия данных на основе уменьшения избыточности и вейвлет-преобразования. *Результаты.* Проведены анализ возможностей методов сжатия и расчет коэффициента сжатия. *Выводы.* В результате проведенного исследования установлено, что вейвлет-преобразование данных более предпочтительно по сравнению со стандартом SCP-ECG для передачи данных электрокардиографического обследования в биотелеметрических системах.

Ключевые слова: биотелеметрическая система, сжатие данных, стандарт SCP-ECG, вейвлет-преобразование

Для цитирования: Безбородова О. Е., Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н., Мартынов Д. В. Сжатие данных с использованием вейвлет-преобразования в биотелеметрических системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 105–114. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-13

DATA COMPRESSION USING WAVELET TRANSFORM IN BIOTELEMETRY SYSTEMS

O.E. Bezborodova¹, A.Yu. Bodin², O.N. Bodin³, M.N. Kramm⁴, D.V. Martynov⁵

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

^{2,4} National Research University "MPEI", Moscow, Russia

^{3,5} Penza State Technological University, Penza, Russia

^{1,5} ot@pnzgu.ru, ^{2,3,4} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Due to the large territorial extent of our country, the task of compression and transmission of medical information of various natures occupies one of the key places in providing the population with high-quality medical care. It should be noted that lossless data compression algorithms should be executed not only on common desktop computer architectures, but also on various specialized platforms used, for example, in portable medical biopotential recorders. Therefore, the task of developing and researching methods for undistorted compression of medical data is an urgent scientific and applied task, due to the development and improvement of computing technology. The aim of this work is to evaluate the methods of compression of transmitted data in biotelemetric systems using the example of compression of an electrocardiogram. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: analysis of existing methods of compression of transmitted data in biotelemetric systems using the example of compression of an electrocardiogram; selection of a method of compression of transmitted data in biotelemetric systems using the example

of compression of an electrocardiogram. For a biotelemetric system as a radio engineering and information-measuring system, the main indicators are measurement error and reliability of data transmission. *Materials and methods.* The article presents a structural diagram of a biotelemetric system, based on the structure of the developed distributed cardiodiagnostic system and its communication channel, and discusses data compression methods based on redundancy reduction and wavelet transformation. *Results.* The analysis of the possibilities of compression methods and the calculation of the compression ratio were carried out. *Conclusions.* As a result of the conducted study, it was established that the wavelet transform of data is more preferable compared to the SCP-ECG standard for transmitting electrocardiographic examination data in biotelemetric systems.

Keywords: biotelemetry system, data compression, SCP-ECG standard, wavelet transform

For citation: Bezborodova O.E., Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N., Martynov D.V. Data compression using wavelet transform in biotelemetry systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):105–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-13

Введение

Сосредоточенность профильных медицинских лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) в крупных городах, а также стремление к сокращению сроков представления медицинских данных требуют организовать и обеспечить оперативную передачу этих данных по каналам связи от пациента к врачам в ЛПУ. Такая передача данных обеспечивается возможностями биотелеметрических систем. Во многих работах биотелеметрию (БТМ) рассматривают в качестве самостоятельной научно-технической области, изучающей проблемы сбора, преобразования, накопления, приема/передачи, обработки, оперативной аналитики и визуализации данных о функциональном состоянии организма пациента, дистанцированного от центров обработки данных [1]. Биотелеметрия представляет собой комплекс разноплановых мероприятий (организационно-управленческих, технических и экономических), обеспечивающих возможность пациента или его лечащего врача получать дистанционную консультацию другого врача, используя возможности цифровых технологий.

Биотелеметрические системы функционируют в структуре Единой государственной информационной системы здравоохранения (ЕГИСЗ) и входят в состав медицинских информационных систем (МИС) (рис. 1). Они связывают с МИС ЛПУ пациентов с мобильными медицинскими приборами, например, портативными кардиорегистраторами или приборами холтеровского мониторинга; приборы клинично-диагностических лабораторий (КДЛ), а также медицинские учреждения базового уровня для телеконсультаций с узкими специалистами (рис. 2).



Рис. 1. Иерархия МИС в соответствии со структурой здравоохранения

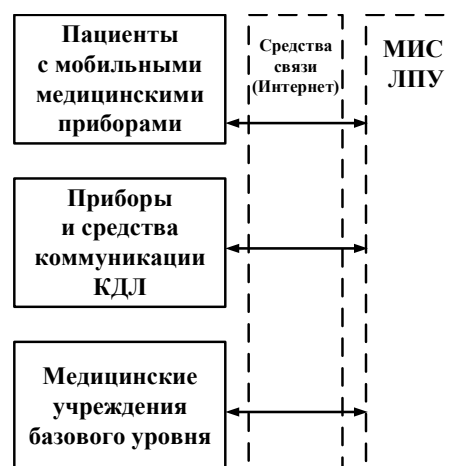


Рис. 2. Схема информационного обеспечения в биотелеметрических системах

Постоянный рост объемов передаваемых данных в биомедицинских системах приводит к сложности в оперативной передаче и обработке этих данных, так как канал связи, по которому она передается, обладает ограниченной пропускной способностью. Поэтому актуальны вопросы сжатия передаваемых данных.

Современное многообразие методов и алгоритмов сжатия данных обусловлено зависимостью эффективности их применения от формата сжимаемых данных (текст, изображения, аудио, видео и др.), следовательно, методы и алгоритмы сжатия должны быть адаптированы с учетом свойств передаваемых данных.

Цель исследования – оценить методы сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методов сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала.

2. Выбор метода сжатия передаваемых данных в биотелеметрических системах на примере сжатия электрокардиосигнала.

Для биотелеметрической системы как радиотехнической и информационно-измерительной системы основными показателями являются погрешность измерения и достоверность передачи данных.

Структура и особенности биотелеметрической системы

В качестве средства сжатия передаваемых данных биотелеметрической системы авторами предлагается кардиодиагностическая система, в которой «технологический конвейер» регистрации, преобразования, накопления, приема/передачи, обработки, оперативной аналитики и визуализации данных о функциональном состоянии организма пациента, дистанцированного от центров обработки данных, типичны и инвариантны для неинвазивного обследования в различных областях здравоохранения. На рис. 3 приведена структурная схема биотелеметрической системы электрокардиодиагностики [2]. Данные измерительного контроля от пациента поступают в техническую систему и проходя несколько первичных измерительных преобразователей (датчики, электроды, самописцы и пр.) поступают на вторичные измерительные преобразователи, которые их преобразуют в аналоговый электрический сигнал. Далее этот сигнал фильтруется, масштабируется, преобразуется в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе.

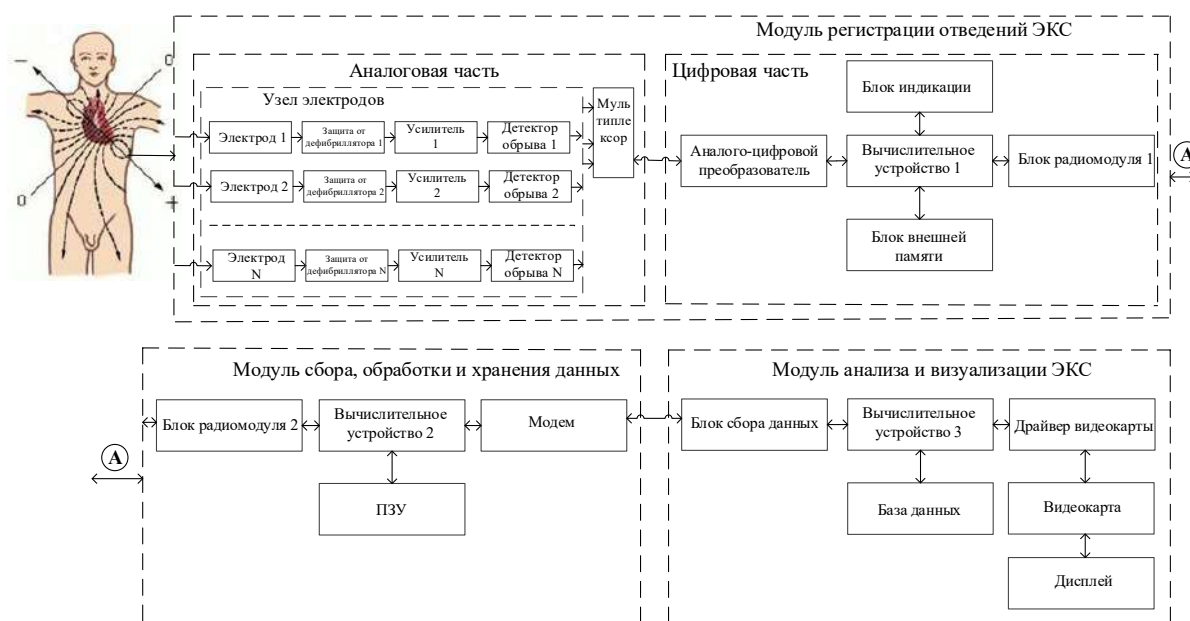


Рис. 3. Структурная схема биотелеметрической системы электрокардиодиагностики

Аналого-цифровое преобразование (АЦП) является необходимым этапом при анализе состояний сердца, поскольку осуществляет преобразование непрерывных биопотенциалов, регистрируемых электродами, в цифровую форму для дальнейшей обработки. При этом считается, что погрешность АЦП определяет погрешность измерения. Рассчитаем чувствительность АЦП с разрядностью 24 бита и уровнем опорного сигнала 2,4 В. Данными характеристиками обладают специализированные для работы с биопотенциалами АЦП [3]:

$$U_{\min} = \frac{U_{\text{ref}}}{(2^{\text{res}} - 1)} = \frac{2,4}{2^{23} - 1} \approx 0,28 \text{ мкВ}, \quad (1)$$

где $U_{\min}$ – минимальный уровень сигнала, регистрируемый АЦП (чувствительность); U_{ref} – значение опорного сигнала; res – разрядность АЦП.

При амплитудном диапазоне зарегистрированного электрокардиосигнала (ЭКС) от 10^2 до $5 \cdot 10^3$ мкВ максимальная погрешность АЦП составляет 0,003 %.

Достоверность передачи данных по каналу связи обеспечивается методами помехоустойчивого кодирования и требует отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

Методы сжатия данных

Уменьшение избыточности

Сжатие данных основано на уменьшении избыточности. При этом уменьшение избыточности исходных данных должно осуществляться без снижения их диагностической ценности. Избыточность биосигналов проявляется, во-первых, в том, что вероятность значительных отклонений от средних значений у большинства биофизических сигналов обычно мала, поэтому старшие разряды двоичного слова, описывающего каждый отсчет, на протяжении большей части времени остаются неиспользованными, т.е. избыточными. Во-вторых, часто являются избыточными значения отсчетов среднего уровня сигнала, поскольку оно остается постоянным, а также значения отсчетов, кодирующих информацию о низкочастотных составляющих сигнала.

Например, для ЭКС (рис. 4) большая часть энергетического спектра лежит в области частоты до 30 Гц, а частота дискретизации устанавливается исходя из верхней частоты спектра 500 Гц, т.е. налицо избыточность передаваемых данных (рис. 5).

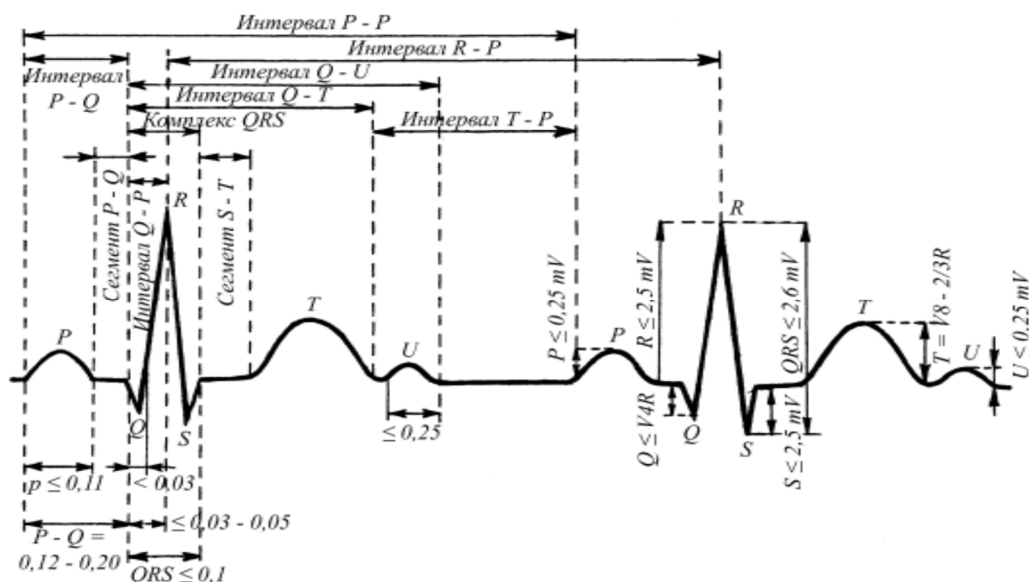


Рис. 4. Информационная структура электрокардиосигнала

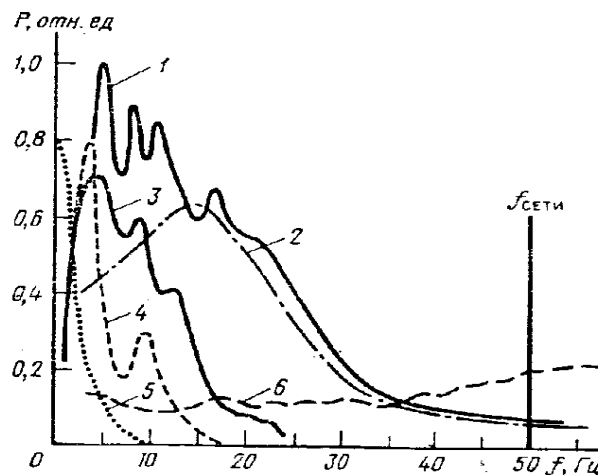


Рис. 5. Сравнительные характеристики спектральной мощности электрокардиосигнала, его составляющих и основных помех

В основе методов уменьшения избыточности лежит метод дельта-кодирования с порогом, т.е. осуществляется кодирование приращения амплитуды ЭКС между последовательными отсчетами сигнала.

Стандарт устанавливает формат передачи оцифрованного и сжатого ЭКС¹ так, что его можно восстановить после приема практически без информационных потерь. Этот стандарт устанавливает требования к разрешению сигнала ≥ 5 мкВ. Компрессия ЭКС в соответствии со стандартом основывается на выборе в сигнале *QRS* комплексов, базовых точек (вершины максимально высоких зубцов *R* и *S*). После этого выделенные фрагменты ЭКС разбиваются с использованием критериев подобия, например вычисления функции корреляции, на группы: сигналы, описывающие нормальное состояние или какие-либо отклонения (экстрасистолы). В наиболее многочисленной группе выбирают наиболее характерный фрагмент или его определяют статистически. Выбранный фрагмент вычитают из всех смежных с ним *QRS* фрагментов (фрагментов той же группы) обрабатываемого сигнала. Как результат этих действий получаем сигнал, представляемый меньшим количеством байт по отношению к исходному ЭКС.

Известно, что средний коэффициент сжатия стандарта SCP-ECG для обмена цифровыми ЭКС составляет 2,61 [4].

Дискретное вейвлет-преобразование

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) является развитием непрерывного вейвлет-преобразования [5, 6]. В ДВП для обработки исходных измерительных данных по масштабу применяют фильтры с различными частотами пропускания: высокочастотные (ВЧФ) и низкочастотные (НЧФ). Алгоритм ДВП приведен на рис. 6.

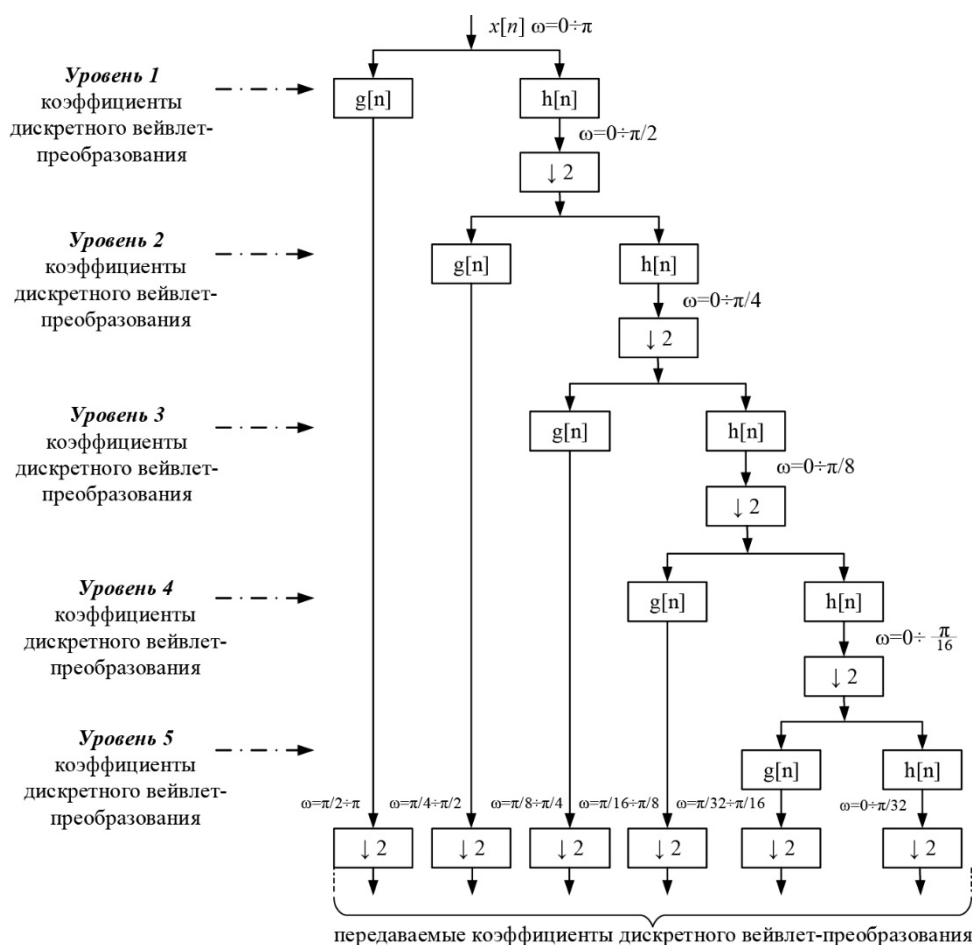


Рис. 6. Алгоритм дискретного вейвлет-преобразования:

$x[n]$ – исходная последовательность исходных данных; $h[n]$ и $g[n]$ – НЧФ и ВЧФ соответственно;

ω – полоса последовательности исходных данных на каждом уровне, рад.

¹ ENV1064. FINAL DRAFT. Standard communications protocol for computerized electrocardiography. CEN/TC251. Brussels, 1993. P. 145.

Разрешение данных, т.е. детализация информационной составляющей в передаваемых данных изменяется изменением частоты пропускания используемого фильтра, масштабирование ЭКС изменяется за счет уменьшения количества отсчетов при передаче данных и восстановления их количества после приема.

Коэффициенты ДВП получают путем дискретизации на диадической сетке $s_0 = 2$ и $t_0 = 1$, т.е. $s = 2^j$ и $t = k2^j$ (рис. 7) [7].

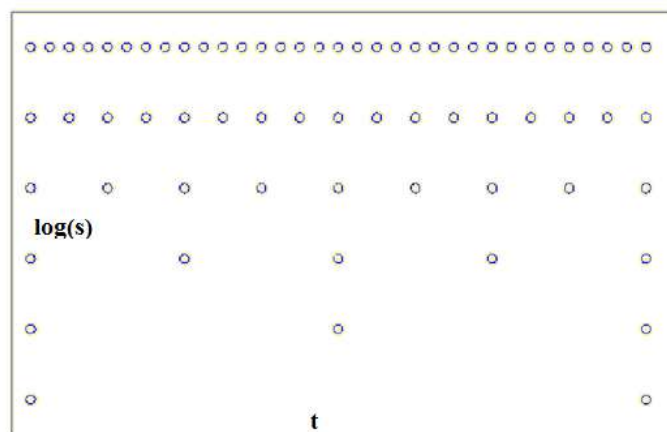


Рис. 7. Аналого-цифровое преобразование электрокардиосигнала на диадической сетке

Работа начинается с аналого-цифрового преобразования по масштабу оси s . Это выполняется путем логарифмирования по основанию два. Исходя из этого определяют коэффициенты ДВП в масштабах кратных двум: четыре, восемь и т.д. Наиболее предпочтительным является масштабирование до уровня пять или шесть. После чего также изменяется и ось времени. При выполнении этого изменения на каждом следующем шаге частота дискретизации уменьшается в два раза.

Из рис. 6, 7 видно, что ДВП работает с исходными данными в нескольких полосах частот, для каждой из которых установлено свое разрешение. Поэтому происходит разделение на «грубую» низкочастотную аппроксимацию и высокочастотные детали. При ДВП используют две группы значений: масштабирующие функции и вейвлеты. Первая группа формируется НЧФ, а вторая – ВЧФ. Каждый уровень преобразования ДВП можно записать следующей формулой, в которой показано как последовательность исходных данных, проходя через НЧФ и ВЧФ, уменьшается вдвое:

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n]g[2k-n], \quad y_{low}[k] = \sum_n x[n]h[2k-n], \quad (2)$$

где $y_{high}[k]$ и $y_{low}[k]$ – уменьшенные вдвое выходы ВЧФ и НЧФ соответственно.

На первом уровне ДВП разрешение по времени уменьшается на 50 %, потому что даже половина отсчетов может полно представить исходные данные (выход НЧФ). Но разрешение по частоте увеличивается на 50 % из-за того, что исходные данные занимают 0,5 от полосы частот, это ведет к уменьшению неопределенности. Эта последовательность действий повторяется несколько раз, обычно не более шести. Данные с выхода НЧФ поступают на аналогичную схему обработки. С выхода ВЧФ поступают вейвлет-коэффициенты.

ДВП состоит из множества, в которое включены вейвлет-коэффициенты всех уровней и отсчеты аппроксимации исходных данных последнего уровня.

Более информативные частоты исходных данных представляют как большие по амплитуде значения вейвлет-коэффициентов, характеризующие выделенный им диапазон частот.

Разрешение дискретизации по времени зависит от уровня ДВП, которому соответствует частота. Если информационная значимость исходных данных сосредоточена на высоких частотах, что бывает достаточно часто, то временная локализация этих частот будет более точной, так как они характеризуются большим количеством отсчетов. На низких частотах, напротив, отсчетов мало. Следовательно, разрешение по времени будет плохим, а разрешение по частоте – хорошим. Этот алгоритм работы с данными характерен для медицины.

Если вейвлет-коэффициенты имеют малые значения, то будет низкая амплитуда в соответствующих полосах частот исходных данных и от этих коэффициентов можно отказаться без потери информационного наполнения передаваемых данных. При этом можно существенно уменьшить объем передаваемых данных.

Импульсные характеристики НЧФ и ВЧФ являются значимыми параметрами ДВП и связаны формулой

$$g[L-1-n] = (-1)^n h[n], \quad (3)$$

где $g[n]$ – ВЧФ; $h[n]$ – НЧФ; L – длина фильтра (число точек).

ВЧФ получается из НЧФ путем «переворота» вектора его коэффициентов и изменения знака у нечетных коэффициентов. Операции фильтрации и прореживания могут быть записаны как

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n] g[-n+2k], \quad y_{low}[k] = \sum_n x[n] h[-n+2k]. \quad (4)$$

Восстановление данных после такой операции происходит достаточно просто, потому что НЧФ и ВЧФ образуют ортонормальный базис. Оно осуществляется по обратной схеме, в которой на каждом уровне обратного ДВП данные интерполируются на 50 %, проходят через НЧФ и ВЧФ, а затем суммируются.

Исходя из этого можно сделать вывод, что фильтры разложения и восстановления данных аналогичны и отличаются только обратным порядком коэффициентов.

Формула восстановления для каждого уровня ДВП может быть записана в виде

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (y_{high}[k] g[-n+2k]) + (y_{low}[k] g[-n+2k]). \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

В биотелеметрической системе (см. рис. 3) на передающей стороне осуществляется:

- вейвлет-преобразование ЭКС (пример 3D-вейвлет-спектрограммы приведен на рис. 8);
- подготовка к передаче ЭКС после вейвлет-преобразования (рис. 9).

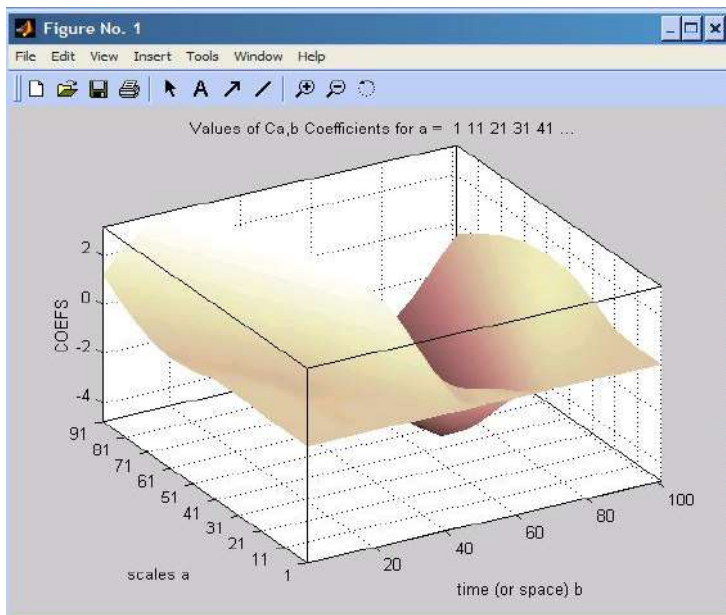


Рис. 8. 3D-вейвлет-спектрограмма

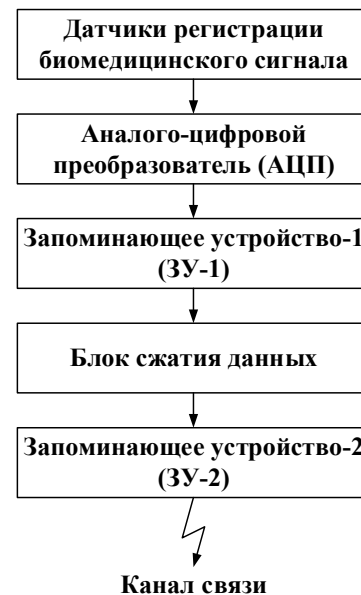


Рис. 9. Алгоритм передачи данных

Объем формируемых АЦП данных о текущем значении потенциала отведения ЭКС за интервал дискретизации описывается следующей формулой:

$$ADC_{data\ size} = N_{cmd\ size} + (DR_{adc\ channel\ size} N_{electrodes}) = (16 + 24) = 40\ bit, \quad (6)$$

где $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах; N_{cmd} – размер специфической команды для АЦП, запускающей процесс преобразования, в общем случае имеет длину 16 бит [8]; $DR_{adc\ channel\ size}$ – размер цифрового кода, содержащий информацию о значении потенциала; $N_{total\ channel}$ – количество каналов.

Рассчитаем общий объем формируемой информации о значениях отсчетов потенциалов отведения ЭКС за интервал времени 1 с:

$$ADC_{total\ size} = F_{ECG\ sample} ADC_{data\ size} = 1000 \cdot 40 = 40\ 000\ bit, \quad (7)$$

где $F_{ECG\ sample}$ – частота дискретизации блока регистрации, равная 1000 Гц [5]; $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах (см. формулу (6)).

Следует отметить, что рассчитанный объем информации соответствует размеру данных, содержащихся в одном кардиоцикле (КЦ) с частотой сердечных сокращений (ЧСС) 60 уд./мин или одно сокращение в секунду. Этот сердечный ритм соответствует нормальному ритму сердца. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения [9], нормальный сердечный ритм в покое изменяется в пределах от 55 (длительность кардиоцикла (КЦ) при этом составляет 1,09 с) до 80 уд./мин (длительность КЦ при этом составляет 0,75 с). ЧСС в покое от 55 до 40 (длительность КЦ равна 1,5 с) свидетельствует о брадикардии, а ЧСС в покое от 80 до 115 (длительность КЦ равна 0,52 с) свидетельствует о тахикардии. Значения ЧСС в покое менее 40 и более 120 (длительность КЦ равна 0,5 с) являются жизнеугрожающими и требуют незамедлительного врачебного вмешательства.

С учетом сказанного, объем информации, соответствующий размеру данных, содержащихся в одном КЦ с ЧСС 40 уд./мин, будет равен $40\ 000 \cdot 1,5 = 60\ 000\ bit$, а с ЧСС 115 уд./мин будет равен $40\ 000 \cdot 0,52 = 20\ 800\ bit$.

Таким образом, после АЦП формируется массив данных от 20 до 60 кб для одного КЦ. Другими словами, значение информационной емкости $C_{з\ 1}$ (см. рис. 9) варьируется от 20 до 60 Kbit.

Значение информационной емкости $C_{з\ 2}$ ЭКС после сжатия на основе вейвлет-преобразования определяется из следующих соображений:

– согласно алгоритму ДВП (см. рис. 6) количество коэффициентов определяется выражением

$$N = \sum_{i=1}^n 2^i, \quad (8)$$

где n – уровень ДВП. Для $n = 5$ $N = 62$;

– согласно выражению (6) объем формируемых АЦП данных за интервал дискретизации равен 40 bit.

Тогда

$$C_{з\ 2} = 62 \cdot 40 = 2480\ bit,$$

а коэффициент сжатия $K_{сж}$ изменяется в пределах от

$$K_{сж} = C_{з\ 1} / C_{з\ 2} = 20\ 000 / 2480 = 8$$

до

$$K_{сж} = C_{з\ 1} / C_{з\ 2} = 60\ 000 / 2480 = 24.$$

Заключение

Рассмотрены алгоритмы сжатия передаваемых данных в биотелеметрической системе.

В основу предлагаемого алгоритма сжатия передаваемых данных положено ДВП исходных данных. Разработанный авторами алгоритм включает три базовых этапа.

Первый этап – это накопление и преобразование данных с использованием прямого ДВП и сохранение полученных вейвлет-коэффициентов.

Второй этап – передача / прием сжатых вейвлет-коэффициентов по каналам связи.

Третий этап – восстановление данных и вычисление обратного вейвлет-преобразования.

Установлено, что вейвлет-преобразование данных более предпочтительно по сравнению со стандартом SCP-ECG для передачи данных электрокардиографического обследования в биотелеметрических системах.

Список литературы

1. Бакалов В. П. Медицинская электроника: основы биотелеметрии. М. : Изд-во Юрайт, 2021. 326 с.
2. Пат. 2764498 Российская Федерация. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Крамм М. Н. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2. 35 с.
3. Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н. [и др.]. Особенности регистрации множественных отведений электрокардиосигналов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : докл. XV Междунар. науч. конф. (ФРЭМЭ XV). Суздаль, 2022.
4. Плотников А. В., Прилуцкий Д. А., Селищев С. В. Стандарт SCP-ECG для обмена цифровыми ЭКГ. URL: https://masters.donntu.ru/2008/kita/golovach/library/4_ref/pub.html
5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М. ; Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая диалектика, 2004. 464 с.
6. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 384 с.
7. Поликар Р. Введение в вейвлет-преобразование / пер. с англ. В. Г. Грибунин. URL: <http://www.autex.spb.ru>
8. Специализированные АЦП. ADS1298 // Texas Instrument. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1296r.pdf>
9. Рекомендации по вопросам физической активности и малоподвижного образа жизни // Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>

References

1. Bakalov V.P. *Medsinskaya elektronika: osnovy biotelemetrii* = Medical electronics: fundamentals of biotelemetry. Moscow: Izd-vo Yurayt, 2021:326. (In Russ.)
2. Patent 2764498 Russian Federation. *Sposob i ustroystvo registratsii mnozhestvennykh otvedeniy elektrokardiosignala* = Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal. Bodin O.N., Kramm M.N. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, Bull. № 2. 35 p. (In Russ.)
3. Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N. et al. Features of registration of multiple leads of electrocardiosignals. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: dokl. XV Mezhdunar. nauch. konf. (FREME XV)* = Physics and radio electronics in medicine and ecology : reports of the XV International Scientific Conference (FRAME XV). Suzdal', 2022. (In Russ.)
4. Plotnikov A.V., Prilutskiy D.A., Selishchev S.V. *Standart SCP-ECG dlya obmena tsifrovymi EKG* = The SCP-ECG standard for digital ECG exchange. (In Russ.). Available at: https://masters.donntu.ru/2008/kita/golovach/library/4_ref/pub.html
5. Dobeshi I. *Desyat' lektsiy po veyvletam* = Ten lectures on wavelets. Moscow; Izhevsk: NITs Regul'yarnaya i khaoticheskaya dialektika, 2004:464. (In Russ.)
6. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V. *Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatie izobrazheniy i video* = Data compression methods. Device archivers, image and video compression. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003:384. (In Russ.)
7. Polikar R. *Vvedenie v veyvlet-preobrazovanie* = Introduction to the wavelet transform. Transl. from Eng. by. V.G. Gribunin. (In Russ.). Available at: <http://www.autex.spb.ru>
8. Specialized ADCs. ADS1298. Texas Instrument. (In Russ.). Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1296r.pdf>
9. Recommendations on physical activity and a sedentary lifestyle. *Vsemirnaya organizatsiya zdavokhraneniya* = World Health Organization. (In Russ.). Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Oksana E. Bezborodova

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

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
заведующий кафедрой биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Михаил Николаевич Крамм

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Дмитрий Владиславович Мартынов

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет, Россия
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information
and measurement technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
head of the sub-department of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of fundamentals of radio engineering,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Dmitry V. Martynov

Postgraduate student,
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 27.01.2025

Поступила после рецензирования/Revised 24.02.2025

Принята к публикации/Accepted 10.03.2025

ОБЗОР МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ В СТОМАТОЛОГИИ

А. О. Мохова¹, С. М. Геращенко²

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

¹ anna2015m2015@gmail.com, ² sgerash@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является обзор и анализ методов и алгоритмов, применяемых в системах искусственного интеллекта для поддержки принятия врачебных решений при инструментальной диагностике в стоматологии. *Материалы и методы.* В обзоре рассмотрены научные публикации, изданные в период с 2014 по 2024 г. *Результаты.* Был проведен анализ работ по заявленной тематике с точки зрения применяемых методов и алгоритмов, области их применения, размера используемой базы данных для обучения и итоговых качественных и количественных метрик применения алгоритма. *Вывод.* Систематизация методов и алгоритмов искусственного интеллекта, применяемых при инструментальной диагностике в стоматологии позволит значительно упростить как рутинные задачи, выполняемые врачами, так и облегчить анализ и систематизацию клинических данных, что особенно важно для специалистов с высокой загруженностью или молодых специалистов ввиду отсутствия большого практического опыта.

Ключевые слова: диагностика, система поддержки принятия врачебных решений, искусственный интеллект, глубокое обучение, машинное обучение, заболевания полости рта, стоматология

Для цитирования: Мохова А. О., Геращенко С. М. Обзор методов и алгоритмов, применяемых в системах искусственного интеллекта для поддержки принятия врачебных решений при инструментальной диагностике в стоматологии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 115–125. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-14

REVIEW OF METHODS AND ALGORITHMS USED IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS TO SUPPORT MEDICAL DECISION-MAKING IN INSTRUMENTAL DIAGNOSTICS IN DENTISTRY

A.O. Mokhova¹, S.M. Gerashchenko²

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

¹ anna2015m2015@gmail.com, ² sgerash@mail.ru

Abstract. *Background.* The aim of the work is to review and analyze the methods and algorithms used in artificial intelligence systems to support medical decision-making in instrumental diagnostics in dentistry. *Materials and methods.* The review examines scientific publications published between 2014 and 2024. *Results.* An analysis of works on the stated topic was carried out in terms of the methods and algorithms used, the area of their application, the size of the database used for training, and the final qualitative and quantitative metrics of the algorithm application. *Conclusion.* Systematization of artificial intelligence methods and algorithms used in instrumental diagnostics in dentistry will significantly simplify both routine tasks performed by doctors and facilitate the analysis and systematization of clinical data, which is especially important for highly busy specialists or young specialists due to the lack of extensive practical experience.

Keywords: diagnostics, medical decision support system, artificial intelligence, deep learning, machine learning, oral diseases, dentistry

For citation: Mokhova A.O., Gerashchenko S.M. Review of methods and algorithms used in artificial intelligence systems to support medical decision-making in instrumental diagnostics in dentistry. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):115–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-14

Введение

Бурное развитие систем поддержки принятия врачебных решений и применяемых в них алгоритмов искусственного интеллекта позволило значительно упростить как рутинные задачи, выполняемые врачами, так и облегчить анализ и систематизацию клинических данных [1, 2]. Применение систем искусственного интеллекта особенно актуально для тех областей медицины, где наблюдается высокая распространенность заболеваний среди населения в совокупности с большим разнообразием схожих по клинической картине патологий. Одной из таких областей медицины является стоматология.

Многообразие форм и нетипичных клинических ситуаций в стоматологии делает актуальной задачу разработки и внедрения систем поддержки принятия врачебных решений (СППВР) с использованием искусственного интеллекта, созданных на основе современной доказательной медицины [3].

Актуальность проблемы внедрения СППВР также обусловлена необходимостью оказания практической консультационной помощи молодым специалистам ввиду отсутствия у них большого опыта в вопросах дифференциальной диагностики, особенно на ранних этапах развития заболеваний [4].

Анализ литературы показал наличие научного интереса различных научных коллективов как отечественных, так и зарубежных к теме экспериментального внедрения систем СППВР на основе искусственного интеллекта в стоматологии [5–9]. Также в отечественных и зарубежных базах цитирования опубликован ряд обзоров, рассматривающих применение искусственного интеллекта в стоматологии [10–18]. В публикациях спектр применения искусственного интеллекта в стоматологии рассматривается с точки зрения диагностируемой нозологии.

Задачей данного обзора является систематизация методов и алгоритмов искусственного интеллекта, применяемых при инструментальной диагностике в стоматологии. В обзоре будут рассмотрены следующие алгоритмы и область их применения: байесовская сеть, глубокая нейронная сеть, дерево принятия решений, искусственная нейронная сеть, машина опорных векторов, сверточная нейронная сеть.

Материалы и методы

В ходе проведения обзора были проанализированы источники за период с 2014 по 2024 г., размещенные в следующих базах данных: Google Академия, Киберленинка, e-LIBRARY, Scopus, PubMed, CrossRef. Поиск проводился по следующим ключевым словам: диагностика, система поддержки принятия врачебных решений, искусственный интеллект, глубокое обучение, машинное обучение, заболевания полости рта, стоматология. Всего было проанализировано 122 публикации, критериями исключения являлись отсутствие полнотекстовой версии, отсутствие описания используемых данных и метрик работы алгоритма. В соответствии с выбранными критериями было отобрано 53 публикации, являющиеся наиболее релевантными выбранной тематике.

Результаты

В результате анализа отобранных публикаций были определены основные модели и алгоритмы, применяемые для разработки систем искусственного интеллекта для поддержки принятия врачебных решений при инструментальной диагностике в стоматологии. В перечень таких моделей вошли: байесовская сеть, глубокая нейронная сеть, дерево принятия решений, искусственная нейронная сеть, метод опорных векторов, сверточная нейронная сеть.

Байесовская сеть. Байесовская сеть, или байесовская сеть доверия, основана на вероятностных зависимостях по Байесу. Байесовская сеть – это ориентированный ациклический граф из множества переменных, соединенных дугами, которые показывают численную зависимость между переменными (узлами). Байесовская сеть рассчитывает вероятность зависимости на основе априорных и апостериорных данных. Преимущество такой сети в том, что точность предсказания увеличивается с ростом апостериорных данных, вносимых в работу алгоритма. Байесовскую сеть применяют в задачах оценки болевого синдрома, предсказания расщелины рта [19] и др.

В работе Н. Iwasaki (2015) [20] рассматривается применение байесовской сети для анализа магнитно-резонансных томограмм при диагностике прогрессирующего нарушения височно-нижнечелюстного сустава. Также в данной работе делался акцент на установленные сетью

связи между переменными, так как они сами являются важной информацией. В результате проведенных исследований была достигнута точность $>99\%$ при диагностике нарушений височно-нижнечелюстного сустава, связанных с потерей кости (191 случай) и при смещении диска (340 случаев). После обучения и анализа работы байесовской сети было установлено, что смещение диска напрямую связано с серьезными изменениями в кости, однако ранние изменения костей напрямую не связаны со смещением диска, а изменения в костях прогрессируют от мыщелка к суставной ямке.

Глубокая нейронная сеть. Отличительной особенностью глубоких нейронных сетей является наличие более одного скрытого слоя. Наличие таких слоев позволяет распознавать в данных примитивы (края объектов, паттерны в числах) и за счет комбинации извлекать сложные признаки объектов на изображениях (границы опухоли на рентген изображении) или из других данных [21].

В работе Raymond P. Danks и др. (2021) [22] представлена разработанная авторами система, рассчитывающая степень потери пародонтальной костной ткани. Понимание степени резорбции кости очень важно для выбора лечения, что позволяет снизить количество осложнений пародонтита. Глубокая нейронная сеть, использованная в работе, имеет архитектуру песочных часов. За счет такой организации нейронов в сети модель на входе получает изображение, затем извлекает из него признаки, на которые была натренирована, и возвращает то же самое изображение с наложенными маркерами, показывающими потерю пародонтальной кости. Для обучения сети были использованы 340 рентгенограмм. Точность модели составила $83,3\%$.

Дерево принятия решений. Дерево принятия решений является простым и понятным методом классификации данных на основе булевой логики. В отличие от большинства других методов, применяемых в машинном обучении, дерево принятия решений относят к так называемому «белому ящику», т.е. предсказание, которое делает модель, можно объяснить, проанализировав исходные данные и правила, которые лежат в модели после ее обучения. Алгоритм представляет собой каскад из признаков (условий), по которым определяют класс входящих данных. Развитием метода является алгоритм «случайный лес», где строится множество деревьев принятия решений и итоговым результатом является средний или наиболее вероятный ответ такого множества деревьев.

В работе You-Hyun Park (2021) [23] описана разработанная предсказательная модель для диагностирования раннего детского кариеса. В работы были проанализированы 4195 детей в возрасте от 1 до 5 лет. В качестве исходных данных использовались данные анамнеза (пол, возраст, уровень жизни) и оценка гигиены полости рта. Помимо дерева принятия решений были разработаны модели на основе градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM) и логистической регрессии. Все модели имели значение метрики AUC в диапазоне от 0,774 до 0,785 и статистически значимо не отличались. Таким образом, было установлено, что в задаче диагностирования раннего детского кариеса нет значимой разницы между логистической регрессией и методами на основе машинного обучения.

Искусственная нейронная сеть. Искусственная нейронная сеть (ИНС) является одной из самых распространенных моделей, применяемых в машинном обучении. В общем случае под ИНС понимают многослойный перцептрон, состоящий из одного входного слоя, одного выходного и одного или нескольких скрытых. Информация в данной модели распространяется в одном направлении и не образует петель. Базовой единицей ИНС является нейрон, состоящий из входного вектора и передаточной функции.

В статье Д. Д. Самохвалова, М. Д. Перова (2024) [24] описывается построенная авторами программа, состоящая из нескольких нейросетевых моделей, рассчитывающих пародонтальный риск на основе пола, возраста, диагноза, вредных привычек и т.д. Основной упор авторы делали на построение прогнозов после активного пародонтального лечения. Разработанные нейронные сети содержали входной слой, состоящий из 24 нейронов, 14 скрытых слоев по 14 нейронов в каждом и один нейрон в выходном слое. Модели проходили обучение на выборке из 109 записей с результатами: чувствительность – 0,86, специфичность – 0,87, AUC – 0,86. Предложенная авторами программа является самодостаточной, однако ее можно интегрировать в СППВР для отслеживания пациентов с высоким риском ухудшения течения пародонтита.

Метод опорных векторов. Метод опорных векторов является частным случаем линейных классификаторов, чаще всего используется в задачах классификации. Данный алгоритм относится к классу алгоритмов обучения с учителем и основан на гипотезе, что увеличение зазора между разделяемыми гиперплоскостью классами ведет к уменьшению ошибки. Идея метода

заключается в переводе исходных векторов (классифицируемых данных) в пространство с более высокой размерностью, где существует гиперплоскость, разделяющая их. Поиск гиперплоскости, оптимально разделяющей исходные классы данных, и является задачей обучения алгоритма. При наличии трех и более классов в исходных данных для каждого класса в отдельности рассчитывается гиперплоскость, разделяющая сам этот класс и остальные.

В работе Özden (2015) [25] рассматривалась возможность разработки модели для классификации шести различных состояний пародонта. В качестве алгоритмов рассматривались метод опорных векторов, дерево принятия решений и искусственная нейронная сеть. База данных для обучения и проверки алгоритма состояла из 150 записей, разделенных на тренировочную выборку (100 записей) и проверочную (50 записей). Входными данными были факторы риска, данные о состоянии пародонта и подтвержденная с помощью рентгенограмм резорбция кости. В результате исследований для модели на основе метода опорных векторов удалось достичь точности в 98 % с общим временем расчета в 19,9 с, в отличие от искусственной нейронной сети у которой точность не превысила 46 %. Авторами был сделан вывод о том, что модели на основе метода опорных векторов и дерева принятия решений достаточны для решения задач подобного рода и могут быть использованы в качестве СППВР при диагностике пародонтита.

Сверточная нейронная сеть. Сверточная нейронная сеть является развитием идеи простого многослойного перцептрона. Основной идеей сверточной нейронной сети является применение сверточных матриц для определения особенностей входных данных. Наибольшее применение сверточные нейронные сети нашли в «компьютерном зрении» и при анализе изображений из-за высокой эффективности данных моделей размечать области интереса на картинках. Каскад сверточных матриц позволяет извлекать из данных различные данные, однако для этого требуется большой набор заранее подготовленных данных и значительные вычислительные мощности.

В работе Jae-Hong Lee и др. (2018) [26] использовалась претренированная сверточная нейронная сеть GoogLeNet Inception v3 для обнаружения кариеса на периапикальных рентгенограммах. Для обучения сети был использован датасет, состоящий из 3000 изображений. Из изображений была извлечена часть, содержащая зуб с кариесом, затем данные были калиброваны для обеспечения схожей яркости и контрастности. После дообучения сети на подготовленных изображениях, полученных с помощью периапикальной рентгенографии, удалось достичь точности диагностирования в 82 % для обнаружения кариеса на премолярах и молярах.

Результаты проведенной систематизации и анализа исследований представлены в табл. 1. Гистограмма распределения публикаций в зависимости от применяемой модели представлена на рис. 1.

Таблица 1

Сводная таблица применения СППВР в стоматологии

Модель	Диагностируемая патология	Вид данных	Размер базы данных	Метрики
1	2	3	4	5
Байесовская сеть [27]	Долговечность зубных реставраций	Клинические данные	4336	Ошибка 0,42 года
Байесовская сеть [28]	Нарушения височно-верхнечелюстного сустава	MPT	590	Точность 0,99
Глубокая нейронная сеть [29]	Атрофия альвеолярного отростка	Периапикальная радиография	340	Доля правильных ключевых точек 0,833
Глубокая нейронная сеть [30]	Рак полости рта	Анализ экспрессии генов	86	Точность 0,96
Дерево принятия решений [31]	Плоскоклеточный рак полости рта	Клинические данные	1570	Чувствительность 0,753, специфичность 0,492
Дерево принятия решений [32]	Отторжение зубных имплантов	Клинические данные	747	Чувствительность 0,590, специфичность 0,768

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Дерево принятия решений [33]	Опухоль слюнной железы	Образцы тканей опухоли	115	Точность 0,84
Дерево принятия решений [34]	Нарушения височно-верхнечелюстного сустава	МРТ	214	Точность 0,74 для смещения диска
Дерево принятия решений [35]	Пародонтит	Данные факторов риска, периодонтальная карта, рентгенография	160	Точность 0,98
Дерево принятия решений [36]	Ранний детский кариес	Данные анамнеза, оценка гигиены полости рта	4195	AUC от 0,774 до 0,785
Искусственная нейронная сеть [35]	Пародонтит	Данные факторов риска, периодонтальная карта, рентгенография	160	Точность 0,46
Метод опорных векторов [34]	Нарушения височно-верхнечелюстного сустава	МРТ	214	Точность 0,74 для смещения диска
Метод опорных векторов [37]	Плоскоклеточный рак полости рта	Клинические данные	254	Чувствительность 0,84, специфичность 0,6
Метод опорных векторов [38]	Кариес цемента	Данные анамнеза, клинические данные	7272	Чувствительность 0,996, специфичность 0,943
Метод опорных векторов [39]	Остеонекроз, вызванный бифосфонатами, после удаления зубов	Клинические данные	125	Чувствительность 0,818, специфичность 0,867
Метод опорных векторов [35]	Пародонтит	Данные факторов риска, периодонтальная карта, рентгенография	160	Точность 0,98
Сверточная нейронная сеть [40]	Оральная плоскоклеточная карцинома	Конфокальная лазерная микроскопия	7894	AUC 0,96
Сверточная нейронная сеть [41]	Кариес	Рентгенограммы прикуса	141	Точность 0,8, чувствительность 0,75, специфичность 0,83
Сверточная нейронная сеть [42]	Кариес	Ближняя инфракрасная спектроскопия	217	AUC 0,836
Сверточная нейронная сеть [43]	Атрофия альвеолярного отростка	Панорамная рентгенограмма	340	Точность 0,93
Сверточная нейронная сеть [44]	Остеоартрит височно-нижнечелюстного сустава	Панорамная рентгенограмма	1189	Точность 0,78, чувствительность 0,73, специфичность 0,82
Сверточная нейронная сеть [45]	Продольный перелом корня зуба	Панорамная рентгенограмма	60	Точность 0,93

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Сверточная нейронная сеть [46]	Верхнечелюстной синусит	КЛКТ	890	AUC 0,91
Сверточная нейронная сеть [47]	Кариес цемента	Данные анамнеза	5135	Точность 0,971, чувствительность 0,996, специфичность 0,943
Сверточная нейронная сеть [48]	Рак полости рта	Гиперспектральные изображения	600	Точность 0,914
Сверточная нейронная сеть [49]	Верхнечелюстной синусит	Затылочноподбородочный вид рентгенограмм	200	AUC 0,93
Сверточная нейронная сеть [50]	Верхнечелюстной синусит	Панорамная рентгенограмма	1174	Точность 0,9, чувствительность 0,81, специфичность 0,91
Сверточная нейронная сеть [51]	Кариес	Периапикальная радиография	600	AUC 0,89
Сверточная нейронная сеть [52]	Верхнечелюстной синусит	Панорамная рентгенограмма	120	Точность 0,875, чувствительность 0,867, специфичность 0,883
Сверточная нейронная сеть [53]	Злокачественные изменения	Данные аутофлюоресценции	170	Чувствительность от 0,81 до 0,95, специфичность от 0,81 до 0,95

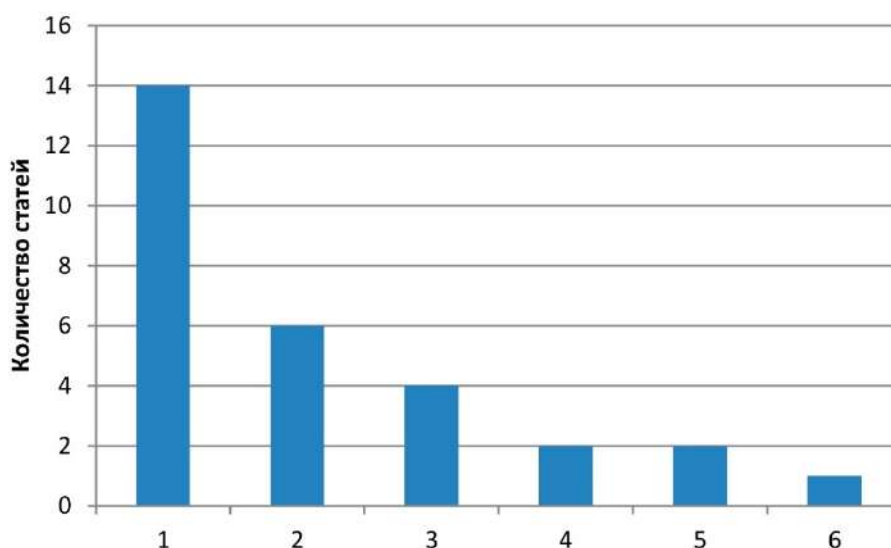


Рис. 1. Распределение количества статей в зависимости от алгоритма:

1 – сверточная нейронная сеть; 2 – дерево принятия решений; 3 – метод опорных векторов; 4 – глубокая нейронная сеть; 5 – байесовская сеть; 6 – искусственная нейронная сеть

На основе анализа таблицы и гистограммы распределения выявлено, что доминирующую позицию в области разработки систем поддержки принятия врачебных решений с использованием искусственного интеллекта занимают сверточные нейронные сети. Подобные модели показали свою эффективность при обнаружении очагов деструкции кости на рентгеновских снимках или при разметке зубов, однако они требуют больших вычислительных мощностей и большего объема базы специально подготовленных данных для обучения. В свою очередь, более простые модели (метод опорных векторов, дерево принятия решений, байесовская сеть)

требуют значительно меньшего объема данных, показывая сопоставимую точность в простых задачах по предсказанию диагноза на основе клинических данных или определения развития пародонтита в зависимости от текущего течения болезни.

Заключение

Научный и практический интерес к разработке и внедрению систем искусственного интеллекта для поддержки принятия врачебных решений в стоматологию значительно вырос за последние 10 лет. Количество публикаций и разработок в области диагностики с использованием искусственного интеллекта в стоматологии увеличивается с каждым годом, однако в настоящее время широкого применения данных технологий в реальной практике не наблюдается. СППВР на основе искусственного интеллекта на сегодня показывает достаточно высокую точность предсказания клинического диагноза (большая часть публикаций указывает точность более 80 %). При этом предсказания искусственного интеллекта основываются на базе данных, размер которой может достигать 7900 записей (исследование по разработке компьютерного метода диагностики оральной плоскоклеточной карциномы), что значительно превышает опыт молодых специалистов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным для решения задач диагностики в стоматологии является использование простых моделей машинного обучения (дерево принятия решений, метод опорных векторов, байесовская сеть) ввиду того, что для их обучения требуются небольшие базы данных (порядка 100 записей), при этом согласно анализу точность подобных моделей может достигать 98 %. Внедрение данных систем является наиболее перспективным для решения задач практической стоматологии.

Список литературы

1. Mintz Y., Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine // Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies. 2019. Vol. 28, № 2. P. 73–81.
2. Верткин А. Л. «Гиппократ» – система поддержки принятия врачебных решений для первичного звена по раннему выявлению социально-значимых заболеваний // Медицинский алфавит. 2021. № 7. С. 11–14.
3. Маргарян Э. Г., Каджоян А. Г., Новожилова Н. Е., Атанесян А. В. Потребность систем поддержки принятия врачебных решений при диагностике заболеваний слизистой оболочки рта // Медицинский алфавит. 2022. № 7. С. 31–36.
4. Солдатов А. Н., Солдатов И. К., Ковальчук С. В. Моделирование восприятия рекомендаций системы поддержки принятия врачебных решений на основе предсказательного моделирования при проведении профилактических осмотров врачами-стоматологами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. № 2. С. 335–338.
5. Павлович М. В. Искусственный интеллект в иммунодиагностике хронического пародонтита // Инфекция и иммунитет. 2022. № 6. С. 1186–1190.
6. Jeyaraj P. R., Samuel Nadar E. R. Computer-assisted medical image classification for early diagnosis of oral cancer employing deep learning algorithm // Journal of Cancer Research and Clinical Oncology. 2019. Vol. 145, № 4. P. 829–837.
7. Feres M. Support vector machine-based differentiation between aggressive and chronic periodontitis using microbial profiles // International Dental Journal. Elsevier BV. 2018. Vol. 68, № 1. P. 39–46.
8. Tonetti M. S., Sanz M. Implementation of the new classification of periodontal diseases: Decision-making algorithms for clinical practice and education // Journal of Clinical Periodontology. 2019. Vol. 46, № 4. P. 398–405.
9. Ngan T. T. Decision Making Based on Fuzzy Aggregation Operators for Medical Diagnosis from Dental X-ray images // Journal of Medical Systems. 2016. Vol. 40, № 12. P. 1–7.
10. Shan T., Tay F. R., Gu L. Application of Artificial Intelligence in Dentistry // Journal of Dental Research. 2020. Vol. 100, № 3. P. 232–244.
11. Patil S. Artificial Intelligence in the Diagnosis of Oral Diseases: Applications and Pitfalls // Diagnostics. 2022. Vol. 12, № 5. P. 1029.
12. Artificial intelligence in dentistry: current applications and future perspectives // Quintessence International. 2020. Vol. 51, № 3. P. 248–257.
13. Battineni G. Applications of Machine Learning Predictive Models in the Chronic Disease Diagnosis // Journal of Personalized Medicine. 2020. Vol. 10, № 2. P. 21.
14. Carrillo-Perez F. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review // Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. 2022. Vol. 34, № 1. P. 259–280.

15. Schwendicke F., Samek W., Krois J. Artificial Intelligence in Dentistry: Chances and Challenges // *Journal of Dental Research*. 2020. Vol. 99, № 7. P. 769–774.
16. Chauhan R. B. An overview of image processing for dental diagnosis // *Innovation and Emerging Technologies*. 2023. Vol. 10. P. 2330001.
17. Khanagar S. B. Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – A systematic review // *Journal of Dental Sciences*. 2021. Vol. 16, № 1. P. 508–522.
18. Долгалев А. А., Мураев А. А., Ляхов П. А., Ляхова У. А. Архитектоника системы искусственного интеллекта и перспективы применения технологий машинного обучения в стоматологии. Обзор литературы // *Главный врач Юга России*. Россия. 2022. № 5. С. 2–6.
19. Machado R. A. Machine learning in prediction of genetic risk of nonsyndromic oral clefts in the Brazilian population // *Clinical Oral Investigations*. 2021. Vol. 25, № 3. P. 1273–1280.
20. Iwasaki H. Bayesian belief network analysis applied to determine the progression of temporomandibular disorders using MRI // *Dentomaxillofacial Radiology*. 2015. Vol. 44, № 4. P. 20140279.
21. Ekert T. Deep Learning for the Radiographic Detection of Apical Lesions // *Journal of Endodontics*. 2019. Vol. 45, № 7. P. 917–922.
22. Danks R. P. Automating Periodontal bone loss measurement via dental landmark localisation // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021. Vol. 16, № 7. P. 1189–1199.
23. Park Y.-H., Kim S.-H., Choi Y. Y. Prediction Models of Early Childhood Caries Based on Machine Learning Algorithms // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, № 16. P. 8613.
24. Самохвалова Д. Д., Перова М. Д. Калькулятор пародонтального риска в системе поддержки принятия клинических решений // *Вестник новых медицинских технологий*. 2024. Vol. 18, № 1. С. 23–29.
25. Ozden F. O. Diagnosis of periodontal diseases using different classification algorithms: A preliminary study // *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2015. Vol. 18, № 3. P. 416–421.
26. Lee J.-H. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm // *Journal of Dentistry*. 2018. Vol. 77. P. 106–111.
27. Aliaga I. J., Vera V., De Paz J. F. [et al.]. Modelling the longevity of dental restorations by means of a CBR system // *BioMed Research International*. 2015. № 1. P. 540306.
28. Iwasaki H. Bayesian Belief Network Analysis Applied to Determine the Progression of Temporomandibular Disorders Using MRI // *Dentomaxillofacial Radiology*. 2015. № 44. P. 20140279.
29. Danks R. P., Bano S., Orishko A. [et al.]. Automating Periodontal Bone Loss Measurement via Dental Landmark Localisation // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021. № 16. P. 1189–1199.
30. Shams W. K., Htike Z. Z. Oral Cancer Prediction Using Gene Expression Profiling and Machine Learning // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. № 12. P. 4893–4898.
31. Bur A. M., Holcomb A., Goodwin S. [et al.]. Machine learning to predict occult nodal metastasis in early oral squamous cell carcinoma // *Oral Oncology*. 2019. № 92. P. 20–25.
32. Liu C. H., Lin C. J., Hu Y. H., You Z. H. Predicting the failure of dental implants using supervised learning techniques // *Applied Sciences*, 2018. Vol. 8, № 5. P. 698.
33. López-Janeiro Á., Cabañuz C., Blasco-Santana L., Ruiz-Bravo E. A Tree-Based Machine Learning Model to Approach Morphologic Assessment of Malignant Salivary Gland Tumors // *Annals of Diagnostic Pathology*. 2022. № 56. P. 151869.
34. Orhan K., Driesen L., Shujaat S. [et al.]. Development and Validation of a Magnetic Resonance Imaging-Based Machine Learning Model for TMJ Pathologies // *BioMed Research International*. 2021. Vol. 2021, № 1. P. 6656773.
35. Ozden F. O., Özgönenel O., Özden B., Aydogdu A. Diagnosis of Periodontal Diseases Using Different Classification Algorithms: A Preliminary Study // *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2015. № 18. P. 416.
36. Park Y. H., Kim S. H., Choi Y. Y. Prediction Models of Early Childhood Caries Based on Machine Learning Algorithms // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. № 18. P. 8613.
37. Alabi R. O., Elmusrati M., Sawazaki-Calone I. [et al.]. Comparison of super-vised machine learning classification techniques in prediction of locoregional recurrences in early oral tongue cancer // *International Journal of Medical Informatics*. 2020. № 136. P. 104068.
38. Hung M., Voss M. W., Rosales M. N. [et al.]. Application of machine learning for diagnostic prediction of root caries // *Gerodontology*. 2019. Vol. 36, № 4. P. 395–404.
39. Kim D. W., Kim H., Nam W. [et al.]. Machine learning to predict the occurrence of bisphosphonate-related osteonecrosis of the jaw associated with dental extraction: A preliminary report // *Bone*. 2018. № 116. P. 207–214.
40. Aubreville M., Knipfer C., Oetter N. [et al.]. Automatic Classification of Cancerous Tissue in Laserendomicroscopy Images of the Oral Cavity Using Deep Learning // *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 11979.
41. Cantu A. G., Gehrung S., Krois J. [et al.]. Detecting Caries Lesions of Different Radiographic Extension on Bitewings Using Deep Learning // *Journal of Dentistry*. 2020. № 100. P. 103425.

42. Casalegno F., Newton T., Daher R. [et al.]. Caries Detection with Near-Infrared Transillumination Using Deep Learning // *Journal of Dental Research*. 2019. № 98. P. 1227–1233
43. Chang H. J., Lee S. J., Yong T. H. [et al.]. Deep Learning Hybrid Method to Automatically Diagnose Periodontal Bone Loss and Stage Periodontitis // *Scientific Reports*. 2020. № 20. P. 7531.
44. Choi E., Kim D., Lee J. Y., Park H. K. Artificial Intelligence in Detecting Temporomandibular Joint Osteoarthritis on Orthopantomogram // *Scientific Reports*. 2021. № 11. P. 10246.
45. Fukuda M., Inamoto K., Shibata N. [et al.]. Evaluation of an Artificial Intelligence System for Detecting Vertical Root Fracture on Panoramic Radiography // *Oral Radiology*. 2019. № 36. P. 337–343.
46. Hung K. F., Ai Q. Y. H., King A. D. [et al.]. Automatic detection and segmentation of morphological changes of the maxillary sinus mucosa on cone-beam computed tomography images using a three-dimensional convolutional neural network // *Clinical Oral Investigations*. 2022. Vol. 26. № 5. P. 3987–3998.
47. Hung M., Voss M. W., Rosales M. N. [et al.]. Application of Machine Learning for Diagnostic Prediction of Root Caries // *Gerodontology*. 2019. № 36. P. 395–404.
48. Jeyaraj P. R., Samuel Nadar E. R. Computer-Assisted Medical Image Classification for Early Diagnosis of Oral Cancer Employing Deep Learning Algorithm // *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*. 2019. № 145. P. 829–837.
49. Kim Y., Lee K. J., Sunwoo L. [et al.]. Deep Learning in Diagnosis of Maxillary Sinusitis Using Conventional Radiography // *Investigative Radiology*. 2019. № 54. P. 7–15
50. Kuwana R., Arij Y., Fukuda M. [et al.]. Performance of Deep Learning Object Detection Technology in the Detection and Diagnosis of Maxillary Sinus Lesions on Panoramic Radiographs // *Dentomaxillofacial Radiology*. 2021. № 50. P. 20200171.
51. Lee J. H., Kim D. H., Jeong S. N., Choi S. H. Detection and Diagnosis of Dental Caries Using a Deep Learning-Based Convolutional Neural Network Algorithm // *Journal of Dentistry*. 2018. № 77. P. 106–111.
52. Murata M., Arij Y., Ohashi Y. [et al.]. Deep-Learning Classification Using Convolutional Neural Network for Evaluation of Maxillary Sinusitis on Panoramic Radiography // *Oral Radiology*. 2018. № 35. P. 301–307.
53. Uthoff R. D., Song B., Sunny S. [et al.]. Point-of-Care, Smartphone-Based, Dual-Modality, Dual-View, Oral Cancer Screening Device with Neural Network Classification for Low-Resource Communities // *PLoS ONE*. 2018. № 13. P. e0207493.

References

1. Mintz Y., Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. 2019;28(2):73–81.
2. Vertkin A.L. "Hippocrates" – a medical decision support system for primary care for the early detection of socially significant diseases. *Meditinskiy alfavit = Medical Alphabet*. 2021;(7):11–14. (In Russ.)
3. Margaryan E.G., Kadzhoyan A.G., Novozhilova N.E., Atanesyan A.V. The need for medical decision support systems solutions for the diagnosis of diseases of the oral mucosa. *Meditinskiy alfavit = Medical alphabet*. 2022;(7):31–36. (In Russ.)
4. Soldatov A.N., Soldatov I.K., Koval'chuk S.V. Modeling the perception of recommendations of the medical decision support system based on predictive modeling during preventive examinations by dentists. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024;(2):335–338. (In Russ.)
5. Pavlovich M.V. Artificial intelligence in the immunodiagnostics of chronic periodontitis. *Infektsiya i immunitet = Infection and immunity*. 2022;(6):1186–1190. (In Russ.)
6. Jeyaraj P.R., Samuel Nadar E.R. Computer-assisted medical image classification for early diagnosis of oral cancer employing deep learning algorithm. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*. 2019;145(4):829–837.
7. Feres M. Support vector machine-based differentiation between aggressive and chronic periodontitis using microbial profiles. *International Dental Journal. Elsevier BV*. 2018;68(1):39–46.
8. Tonetti M.S., Sanz M. Implementation of the new classification of periodontal diseases: Decision-making algorithms for clinical practice and education. *Journal of Clinical Periodontology*. 2019;46(4):398–405.
9. Ngan T.T. Decision Making Based on Fuzzy Aggregation Operators for Medical Diagnosis from Dental X-ray images. *Journal of Medical Systems*. 2016;40(12):1–7.
10. Shan T., Tay F.R., Gu L. Application of Artificial Intelligence in Dentistry. *Journal of Dental Research*. 2020;100(3):232–244.
11. Patil S. Artificial Intelligence in the Diagnosis of Oral Diseases: Applications and Pitfalls. *Diagnostics*. 2022;12(5):1029.
12. Artificial intelligence in dentistry: current applications and future perspectives. *Quintessence International*. 2020;51(3):248–257.
13. Battineni G. Applications of Machine Learning Predictive Models in the Chronic Disease Diagnosis. *Journal of Personalized Medicine*. 2020;10(2):21.
14. Carrillo-Perez F. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2022;34(1):259–280.

15. Schwendicke F., Samek W., Krois J. Artificial Intelligence in Dentistry: Chances and Challenges. *Journal of Dental Research*. 2020;99(7):769–774.
16. Chauhan R.B. An overview of image processing for dental diagnosis. *Innovation and Emerging Technologies*. 2023;10:2330001.
17. Khanagar S.B. Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – A systematic review. *Journal of Dental Sciences*. 2021;16(1):508–522.
18. Dolgalev A.A., Muraev A.A., Lyakhov P.A., Lyakhova U.A. Architectonics of artificial intelligence system and prospects of application of machine learning technologies in dentistry. Literature review. *Glavnyy vrach Yuga Rossii. Rossiya = Chief Physician of the South of Russia. Russia*. 2022;(5):2–6. (In Russ.)
19. Machado R.A. Machine learning in prediction of genetic risk of nonsyndromic oral clefts in the Brazilian population. *Clinical Oral Investigations*. 2021;25(3):1273–1280.
20. Iwasaki H. Bayesian belief network analysis applied to determine the progression of temporomandibular disorders using MRI. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2015;44(4):20140279.
21. Ekert T. Deep Learning for the Radiographic Detection of Apical Lesions. *Journal of Endodontics*. 2019;45(7):917–922.
22. Danks R.P. Automating Periodontal bone loss measurement via dental landmark localization. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021;16(7):1189–1199.
23. Park Y.-H., Kim S.-H., Choi Y.Y. Prediction Models of Early Childhood Caries Based on Machine Learning Algorithms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(16):8613.
24. Samokhvalova D.D., Perova M.D. Periodontal Calculator risk management in the clinical decision support system. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of New Medical Technologies*. 2024;18(1):23–29. (In Russ.)
25. Ozden F.O. Diagnosis of periodontal diseases using different classification algorithms: A preliminary study. *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2015;18(3):416–421.
26. Lee J.-H. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *Journal of Dentistry*. 2018;77:106–111.
27. Aliaga I.J., Vera V., De Paz J.F. et al. Modelling the longevity of dental restorations by means of a CBR system. *BioMed Research International*. 2015;(1):540306.
28. Iwasaki H. Bayesian Belief Network Analysis Applied to Determine the Progression of Temporomandibular Disorders Using MRI. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2015;(44):20140279.
29. Danks R.P., Bano S., Orishko A. et al. Automating Periodontal Bone Loss Measurement via Dental Landmark Localisation. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021;(16):1189–1199.
30. Shams W.K., Htike Z.Z. Oral Cancer Prediction Using Gene Expression Profiling and Machine Learning. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;(12):4893–4898.
31. Bur A.M., Holcomb A., Goodwin S. et al. Machine learning to predict occult nodal metastasis in early oral squamous cell carcinoma. *Oral Oncology*. 2019;(92):20–25.
32. Liu C.H., Lin C.J., Hu Y.H., You Z.H. Predicting the failure of dental implants using supervised learning techniques. *Applied Sciences*. 2018;8(5):698.
33. López-Janeiro Á., Cabañuz C., Blasco-Santana L., Ruiz-Bravo E. A Tree-Based Machine Learning Model to Approach Morphologic Assessment of Malignant Salivary Gland Tumors. *Annals of Diagnostic Pathology*. 2022;(56):151869.
34. Orhan K., Driesen L., Shujaat S. et al. Development and Validation of a Magnetic Resonance Imaging-Based Machine Learning Model for TMJ Pathologies. *BioMed Research International*. 2021;2021(1):6656773.
35. Ozden F.O., Özgönel O., Özden B., Aydogdu A. Diagnosis of Periodontal Diseases Using Different Classification Algorithms: A Preliminary Study. *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2015;(18):416.
36. Park Y.H., Kim S.H., Choi Y.Y. Prediction Models of Early Childhood Caries Based on Machine Learning Algorithms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;(18):8613.
37. Alabi R.O., Elmusrati M., Sawazaki-Calone I. et al. Comparison of supervised machine learning classification techniques in prediction of locoregional recurrences in early oral tongue cancer. *International Journal of Medical Informatics*. 2020;(136):104068.
38. Hung M., Voss M.W., Rosales M.N. et al. Application of machine learning for diagnostic prediction of root caries. *Gerodontology*. 2019;36(4):395–404.
39. Kim D.W., Kim H., Nam W. et al. Machine learning to predict the occurrence of bisphosphonate-related osteonecrosis of the jaw associated with dental extraction: A preliminary report. *Bone*. 2018;(116):207–214.
40. Aubreville M., Knipfer C., Oetter N. et al. Automatic Classification of Cancerous Tissue in Laserendomicroscopy Images of the Oral Cavity Using Deep Learning. *Scientific Reports*. 2017;(7):11979.
41. Cantu A.G., Gehrung S., Krois J. et al. Detecting Caries Lesions of Different Radiographic Extension on Bitewings Using Deep Learning. *Journal of Dentistry*. 2020;(100):103425.
42. Casalegno F., Newton T., Daher R. et al. Caries Detection with Near-Infrared Transillumination Using Deep Learning. *Journal of Dental Research*. 2019;(98):1227–1233.

43. Chang H.J., Lee S.J., Yong T.H. et al. Deep Learning Hybrid Method to Automatically Diagnose Periodontal Bone Loss and Stage Periodontitis. *Scientific Reports*. 2020;(20):7531.
44. Choi E., Kim D., Lee J.Y., Park H.K. Artificial Intelligence in Detecting Temporomandibular Joint Osteoarthritis on Orthopantomogram. *Scientific Reports*. 2021;(11):10246.
45. Fukuda M., Inamoto K., Shibata N. et al. Evaluation of an Artificial Intelligence System for Detecting Vertical Root Fracture on Panoramic Radiography. *Oral Radiology*. 2019;(36):337–343.
46. Hung K.F., Ai Q.Y.H., King A.D. et al. Automatic detection and segmentation of morphological changes of the maxillary sinus mucosa on cone-beam computed tomography images using a three-dimensional convolutional neural network. *Clinical Oral Investigations*. 2022;26(5):3987–3998.
47. Hung M., Voss M.W., Rosales M.N. et al. Application of Machine Learning for Diagnostic Prediction of Root Caries. *Gerodontology*. 2019;(36):395–404.
48. Jeyaraj P.R., Samuel Nadar E.R. Computer-Assisted Medical Image Classification for Early Diagnosis of Oral Cancer Employing Deep Learning Algorithm. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*. 2019;(145):829–837.
49. Kim Y., Lee K.J., Sunwoo L. et al. Deep Learning in Diagnosis of Maxillary Sinusitis Using Conventional Radiography. *Investigative Radiology*. 2019;(54):7–15.
50. Kuwana R., Aiji Y., Fukuda M. et al. Performance of Deep Learning Object Detection Technology in the Detection and Diagnosis of Maxillary Sinus Lesions on Panoramic Radiographs. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2021;(50):20200171.
51. Lee J.H., Kim D.H., Jeong S.N., Choi S.H. Detection and Diagnosis of Dental Caries Using a Deep Learning-Based Convolutional Neural Network Algorithm. *Journal of Dentistry*. 2018;(77):106–111.
52. Murata M., Aiji Y., Ohashi Y. et al. Deep-Learning Classification Using Convolutional Neural Network for Evaluation of Maxillary Sinusitis on Panoramic Radiography. *Oral Radiology*. 2018;(35):301–307.
53. Uthoff R.D., Song B., Sunny S. et al. Point-of-Care, Smartphone-Based, Dual-Modality, Dual-View, Oral Cancer Screening Device with Neural Network Classification for Low-Resource Communities. *PLoS ONE*. 2018;(13):e0207493.

Информация об авторах / Information about the authors

Анна Олеговна Мохова

ассистент кафедры физиологии человека,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: anna2015m2015@gmail.com

Anna O. Mokhova

Assistant of the sub-department of human physiology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Михайлович Геращенко

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры поликлинической терапии
и мобилизационной подготовки
в здравоохранении,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sgerash@mail.ru

Sergey M. Gerashchenko

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of polyclinic therapy
and mobilization training in healthcare,
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 19.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 17.03.2025

Принята к публикации / Accepted 31.03.2025

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

В. В. Земцов¹, А. В. Иващенко²

¹ Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

² Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

¹ zemtsov.fond@gmail.com, ² anton.ivashenko@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы состоит в совершенствовании системы автономного электропитания устройств медицинского Интернета вещей за счет внедрения бетавольтаических источников питания. *Материалы и методы.* Метод исследования основан на реализации экспериментального образца бетавольтаического комплекса и проверки его характеристик на базе испытательного стенда. *Результаты.* Результаты работы состоят в реализации аппаратных и программных компонентов испытательного стенда (представляет собой отладочную плату), предназначенного для подборки режима работы бетавольтаических сборок, входящих в состав бетавольтаического комплекса, проведение его испытаний и формирование предложений по дальнейшему использованию предложенного подхода для проектирования и аппаратной реализации бетавольтаических комплексов в качестве конечных устройств, обеспечивающих импульсное питание устройств медицинского Интернета вещей. *Выводы.* Обоснованы преимущества реализации предложенного подхода, а именно: в использовании бетавольтаического комплекса в качестве системы электропитания медицинского Интернета вещей и дальнейшего применения полученных результатов в системе здравоохранения и медико-инженерном образовании.

Ключевые слова: медицинский Интернет вещей, системы электропитания, медицинская техника, бетавольтаический комплекс

Для цитирования: Земцов В. В., Иващенко А. В. Реализация автономного питания маломощных устройств медицинского интернета вещей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 126–136. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-15

IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR LOW- POWER DEVICES OF THE INTERNET OF MEDICAL THINGS

V.V. Zemtsov¹, A.V. Ivaschenko²

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara State Medical University, Samara, Russia

¹ zemtsov.fond@gmail.com, ² anton.ivashenko@gmail.com

Abstract. *Background.* The paper aims at improving the autonomous power supply system for medical Internet of Things devices by introducing betavoltaic power sources. *Materials and methods.* The research method is based on the implementation of an experimental sample of a betavoltaic complex and testing its characteristics on a test bench. *Results.* The results of the work consist in the implementation of hardware and software components of the test bench (which is a debug board) designed to select the operating mode of betavoltaic assemblies included in the betavoltaic complex, testing it and formulating proposals for further use of the proposed approach for designing and hardware implementation of betavoltaic complexes as end devices providing pulse power supply for Internet of Medical Things devices. *Conclusions.* The conclusions are to substantiate the advantages of implementing the proposed approach, namely, using a betavoltaic complex as a power supply system for the Internet of Medical Things and further application of the obtained results in the healthcare system and medical engineering education.

Keywords: medical Internet of Things, power supply systems, medical equipment, betavoltaic complex

For citation: Zemtsov V.V., Ivaschenko A.V. Implementation of autonomous power supply for low-power devices of the internet of medical things. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):126–136. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-15

Введение

Одно из важных направлений развития телемедицины, медицинской диагностики и реабилитации состоит в реализации технологий медицинского Интернета вещей [1–3]. Это направление представляет собой самостоятельную ветвь совершенствования Интернета вещей (IoT), объединяющую исследования в области медицины, информационных технологий, телекоммуникаций и связи. Перспективы развития медицинского Интернета вещей связывают с миниатюризацией используемых приборов, созданием платформы сбора и обработки информации и персонализации медицинских процедур лечения и реабилитации.

Развитие потенциала медицинского Интернета вещей [4, 5] также связывают с реализацией искусственного интеллекта для обеспечения новых возможностей по обработке больших объемов медицинских данных о здоровье отдельных пациентов. Современные технологии в этой области способны интегрировать различные умные устройства медицинской диагностики и реабилитации в единый комплекс системы цифрового здравоохранения [6, 7].

Для реализации медицинского Интернета вещей в здравоохранении необходимо также решить ряд задач инженерного характера [8–10], связанных с обеспечением производительности, интероперабельности, безопасности и энергообеспечения устройств Интернета вещей. В частности, проблема эффективного энергообеспечения устройств состоит в реализации автономных миниатюрных систем электропитания с длительным сроком эксплуатации. Для решения этой проблемы в настоящее время активно рассматривается применение бетавольтаических источников питания [11, 12].

Применение бетавольтаических источников питания в медицине предполагалось достаточно давно [13], например, в долгосрочных имплантируемых медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы [14] и дефибрилляторы. Также применяются устройства измерения внутриглазного давления у пациентов с глаукомой, имплантируемые в глаз пациента.

Современные работы [15, 16] существенно расширяют область их применения в здравоохранении, учитывая в том числе их соответствие требованиям радиационной безопасности. Перспективные области использования таких комплексов включают также разработку систем доставки лекарств *in vivo*, церебральных нейростимуляторов, внутриглазных и кохлеарных имплантатов и инфузионных насосов [17]. Другие возможные области применения для производителей бетавольтаических батарей включают электронные медицинские метки *in vivo* и системы интерфейса мозг-компьютер.

Медицинские устройства миниатюрного размера с длительным автономным питанием имеют высокий потенциал по снижению расходов и смягчению травм, связанных с инвазивными операциями по их имплантации. Бетавольтаические источники питания не требуют обслуживания в течение длительного времени и позволяют реализовать электропитание различных устройств в системах здравоохранения и удаленного мониторинга. В целом создание бетавольтаических комплексов является одной из актуальных фронтальных задач современной инженерии [18–20].

В настоящей статье представлены результаты разработки и испытаний программно-конфигурируемого испытательного стенда, предназначенного для подбора требуемой конфигурации бетавольтаических сборок (в зависимости от типа медицинского устройства, режимов его работы и требуемой мощности) и аппаратной реализации конечных устройств – бетавольтаических комплексов, обеспечивающих автономное питание медицинского Интернета вещей.

Задача проводимого исследования заключалась в разработке испытательного стенда, включая аппаратные и программные составляющие, обеспечивающие ступенчатое повышение напряжения, проверку зарядно-разрядных характеристик бетавольтаических сборок, потребления энергии с бетавольтаических сборок, измерения выходного напряжения, управления параметрами преобразования напряжения.

Материалы и методы

Устройства медицинского Интернета вещей связаны с облачными платформами и сервисами, которые хранят и анализируют собранные ими данные. Инструменты Интернета вещей трансформируют систему оказания медицинских услуг благодаря своей способности собирать, интерпретировать и распространять медицинские данные. Реализация их автономного питания возможна с использованием бетавольтаических комплексов, в основе которых лежит бетавольтаический источник питания, сопряженный с заряжаемыми ионисторами (накопители энергии), при котором процессы заряда и разряда контролируются микроконтроллером.

Конструкция бетавольтаического комплекса предполагает его использование в качестве источника питания для беспроводных устройств слабой мощности, например, беспроводных датчиков медицинского Интернета вещей. Для разрабатываемого комплекса необходимо предусмотреть циклический режим работы, направленный на поддержание рабочего напряжения на выходном накопителе электрической схемы. Коммутация бетавольтаических сборок в схеме преобразования осуществляется с помощью полевых транзисторов. Сборки коммутируются с промежуточным накопителем. Преобразование напряжения осуществляется ступенчато с промежуточным накоплением энергии.

В рамках данного исследования был разработан программно-конфигурируемый испытательный стенд. Схема электрическая структурная представлена на рис. 1.

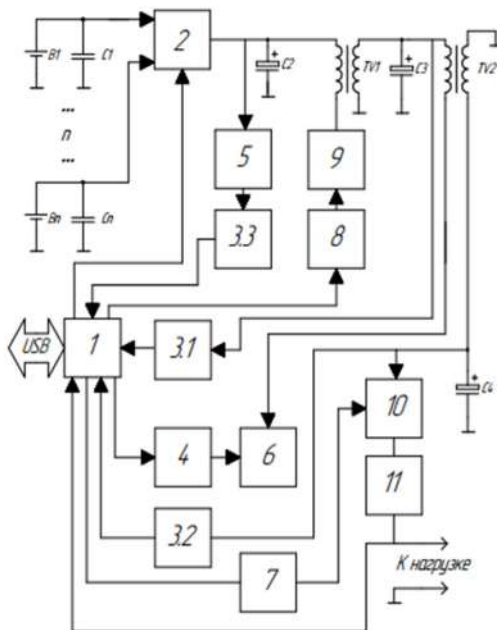


Рис. 1. Схема электрическая структурная испытательного стенда

В состав программно-конфигурируемого испытательного стенда входят управляющая плата и плата подключения бетавольтаических сборок.

На плате управления предусмотрены разъем подключения к ПК по интерфейсу USB и разъем питания. Размещение электронных плат предусмотрено в пластиковом корпусе. Значения напряжений, измеренных в процессе работы комплекса, записываются в flash-памяти микроконтроллера для дальнейшей передачи их на персональный компьютер.

В разработанном испытательном стенде предусмотрена централизованная структура. Схема работает следующим образом: напряжение с бетавольтаической сборки через мультиплексор подается на первичную обмотку трансформатора. Ключ, управляемый микроконтроллером, формирует импульсы напряжения. Через индуктивную связь на вторичной обмотке формируются импульсы более высокого напряжения, накапливаемого на конденсаторе. Вторая ступень повышения напряжения состоит из аналогичных элементов (трансформатор, ключ, конденсатор, схема управления ключевым элементом). Принцип ее работы идентичен вышеописанному. Третья ступень повышения напряжения реализована на step-up конвертере, ключевом элементе и схеме управления ключевым элементом.

Схема измерения реализована на усилителе и АЦП. Измерение напряжения осуществляется в четырех точках – на конденсаторах и на выходе схемы. Измерение тока осуществляется на выходе схемы.

Проведение испытаний программно-конфигурируемого испытательного стенда включает проверку следующих функциональных возможностей: накопление энергии для потребления тока в импульсном режиме и циклическое переключение между энергопреобразователями электрического тока (бетавольтаическими сборками) при достижении порогового значения напряжения посредством управляющего программного обеспечения.

Для повышения напряжения, получаемого с выходных контактов бетавольтаической сборки, была выбрана схема импульсного преобразователя напряжения (см. рис. 2). Суть схемы

заключается в формировании импульсов тока, которые затем подаются на первичную обмотку трансформатора. В предлагаемой схеме формирователем импульсов является МОП-транзистор с низким зарядом затвора STP32L06 или аналог со схожими характеристиками. Емкость затвора – 25 пС.

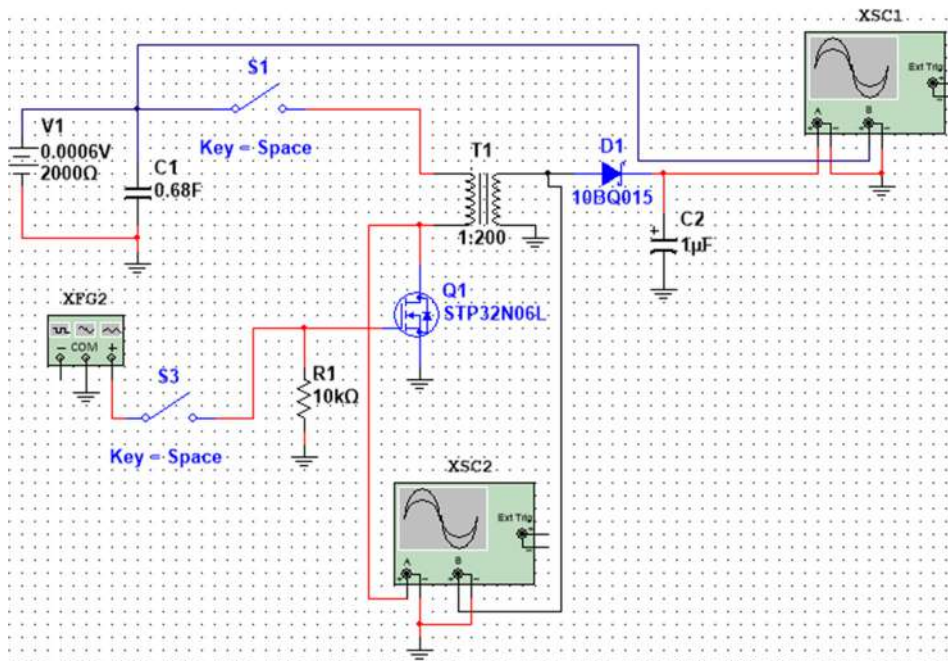


Рис. 2. Схема электрическая повышения напряжения, получаемого с выходных контактов бетавольтаической сборки

Реализация процесса управления и измерения осуществлена на микроконтроллере STM32F103, выбор данного контроллера обоснован достаточным для контроля напряжения в ключевых точках встроенных каналов АЦП, 10 каналов, наличием 7 таймеров для тактирования ключей, а также аппаратной реализацией интерфейса USB, что снижает номенклатуру изделий, входящих в состав комплекса.

Для коммутации на первых ступенях повышения напряжения используется схема транзисторного преобразователя. Измерение напряжений на первых ступенях повышения проводится с помощью усилителей, реализованных на интегральных микросхемах. Напряжения на конечной и промежуточной ступенях повышения напряжения подаются на входы АЦП.

Результаты

Разработанный программно-конфигурируемый испытательный стенд обеспечивает следующие функции: коммутация бетавольтаических сборок, преобразование напряжения, накопление-аккумулирование энергии, измерение напряжения, контроль напряжения и тока на выходе схемы преобразования, контроль процесса преобразования напряжения и графическое отображение параметров комплекса на экране ПК. Разработанный испытательный стенд приведен на рис. 3.



Рис. 3. Реализация испытательного стенда на печатной плате

Для управления испытательным стендом было разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя. Разработка программного обеспечения испытательного стенда осуществлялась в среде разработки PDE (Processing Development Environment). Язык разработки – Processing, на базе Java. Программное обеспечение предназначено для отображения состояния испытательного стенда, отображения значений напряжений на промежуточных накопителях, отображения значений тока и напряжения на выходе комплекса, и управления режимами преобразования напряжения. Вид пользовательского интерфейса рабочего окна программы представлен на рис. 4.



Рис. 4. Вид окна управляющего ПО

Функции управляющего программного обеспечения:

- запуск и остановка преобразования напряжения;
- установка напряжения запуска генерации. В окне программы задается напряжение, определяющее порог включения импульсного преобразователя;
- установка частоты импульсного преобразователя;
- отображение напряжения и тока на выходе ступеней повышения в виде графика и числом в окне программы;
- сохранение полученных данных в виде файла формата txt.

В левом верхнем углу окна отображается индикатор подключения к стенду. В левой верхней части также расположено окно для ввода значения порогового напряжения переключения между бетавольтаическими сборками. Под обозначениями ступеней находятся окно, отображающее напряжение в данной точке, окно ввода периодичности импульсов и окно ввода частоты. Ниже расположена кнопка запуска преобразования данной ступени с установленной пользователем частотой. В нижнем поле в виде графика отображаются напряжения на контролируемых участках или ток на выходе комплекса в зависимости от выбранного пользователем режима отображения.

Система предназначена для преобразования электрических параметров бетавольтаической сборки до уровня, при котором возможно ее использование в качестве источника питания для малопотребляющих электронных устройств в импульсных режимах работы. Система работает в двух параллельных режимах. Первый – режим измерения. В системе реализовано измерение напряжения на каждой ступени повышения. Измеренное напряжение отображается

в виде графика в окне программы. Второй – режим повышения напряжения. В этом режиме система за счет импульсных трансформаторных преобразователей повышает напряжение и накапливает его на промежуточных конденсаторах.

Управление ступенями повышения напряжения реализовано путем изменения частоты переключения транзисторов, коммутирующих напряжение на импульсных трансформаторах. Также осуществляется автоматическое отключение режима генерации при достижении порогового напряжения на входе преобразователя каждой ступени. Диагностика аппаратного комплекса заключается в измерении частот в контрольных точках схемы, а именно на затворах транзисторов импульсных преобразователей.

Для проверки работоспособности испытательного стенда были проведены его испытания с использованием бетавольтаических сборок в целях проверки реализации основных принципов работы бетавольтаического комплекса на площадке ГНЦ НИИАР г. Димитровград. Для повышения входных характеристик бетавольтаического источника питания использовался заряжаемый ионистор (суперконденсатор) в качестве вторичного источника энергии. Бетавольтаическая сборка представляет собой бетавольтаический источник питания сопряженный с суперконденсатором.

Проведение испытаний стенда проводилось на компьютере со следующими характеристиками и конфигурацией: ОС MS Windows 10 x32/x64, RAM: 512 2048 Mb, HDD: 80Gb. В качестве нагрузки в составе стенда предусмотрен маломощный светодиод, позволяющий визуально оценить работоспособность системы.

В результате испытаний установлено, что при достижении порогового напряжения, заданного в ПО испытательного стенда, на осциллограмме наблюдается скачок напряжения. При запуске ступеней преобразования на осциллограммах затворов наблюдаются импульсы. На осциллограммах, снятых с накопителей энергии на каскадах, наблюдается рост напряжения. Отсутствует влияние опорного напряжения от внешнего источника питания на значения тока и напряжения на выходе испытательного стенда. Таким образом, испытательный стенд стабильно работает при подключении нагрузки на выход и позволяет обеспечивать питанием малопотребляющие электронные устройства.

Обсуждение

В качестве варианта миниатюрного исполнения бетавольтаической сборки может использоваться металлический корпус с размещением бетавольтаических источников питания в сочетании с заряжаемыми ионисторами (суперконденсаторами), как показано на рис. 5.

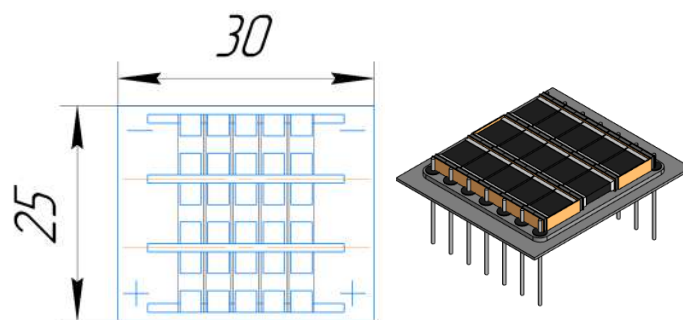


Рис. 5. Пример размещения БВЭП в металлическом корпусе, сопряженный с заряжаемыми ионисторами производства компании TDK (перезаряжаемый твердотельный аккумулятор Cera Charge для поверхностного монтажа)

Данный подход придает компактному накопителю более широкие возможности, например, использование его энергии для импульсных мониторинговых датчиков с возможностью передачи информации от устройств, работающих в автономном режиме, или в медицинских нейрофизиологических целях.

При проведении испытаний заявленные характеристики стенда показали удовлетворительные результаты. Это дает основания считать использование предложенного решения подходящим для работы с бетавольтаическими сборками для проведения экспериментальных исследований и отладки режимов работы бетавольтаического комплекса для получения необходимых значений тока и напряжения на выходе и дальнейшего проектирования конечного устройства для обеспечения автономного питания устройств медицинского назначения.

Напряжение бетавольтаических сборок (бетавольтаический источник питания сопряженный с заряжаемым ионистором) на входе схемы испытательного стенда составляло 26,06 мВ. Пороговое значение напряжения для переключения на следующую бетавольтаическую сборку осуществлялось при достижении напряжения 13,03 мВ. Периодичность переключения составила 12 с с частотой 59 кГц (рис. 6, 7).

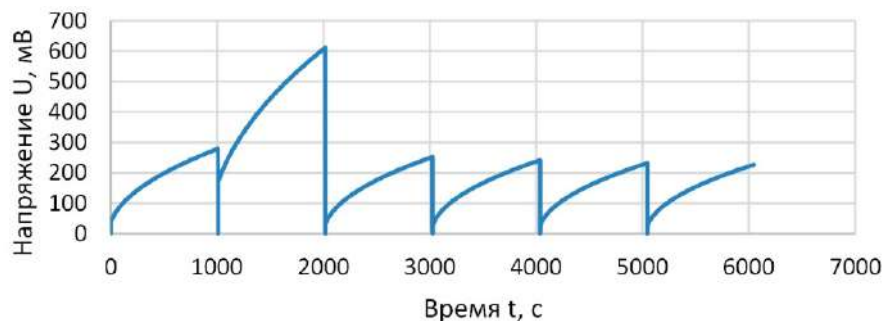


Рис. 6. Напряжение на первом каскаде схемы усиления испытательного стенда

На первом каскаде осуществлялось накопление напряжения с промежутком 1000 секунд с передачей его на второй каскад: в промежутке времени с 0 до 1000 секунды равного 279 мВ, в промежутке с 1000 до 2000 секунды равного 612 мВ, в промежутке с 2000 до 3000 секунды равного 252 мВ, в промежутке с 3000 до 4000 секунды равного 241 мВ, в промежутке с 4000 до 5000 секунды равного 232 мВ, в промежутке с 5000 до 6000 секунды равного 226 мВ.

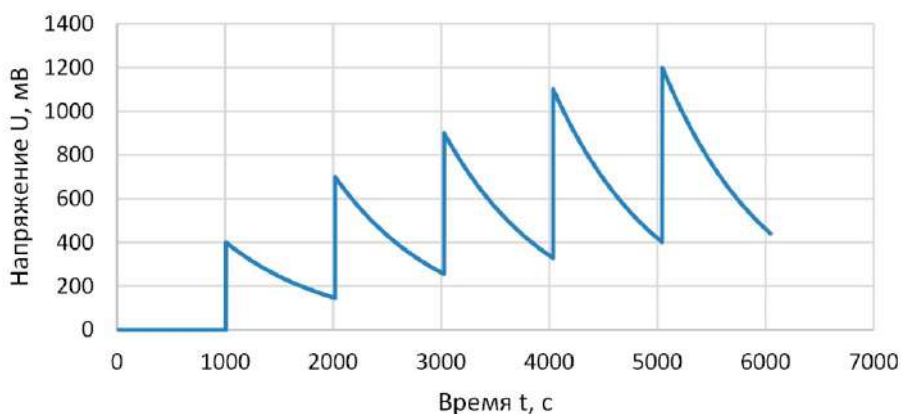


Рис. 7. Напряжение на втором каскаде схемы усиления испытательного стенда

На втором каскаде каждые 1000 секунд достигается пиковое значение напряжения и после 5000 секунды передается на step-up конвектор: в 1000 секунду достигается пиковое значения напряжения 400 мВ, в 2000 секунду пиковое значение напряжения достигает 700 мВ, в 3000 секунду пиковое значение напряжения достигает 900 мВ, в 4000 секунду пиковое напряжение достигает 1100 мВ, в 5000 секунд пиковое значение напряжения достигает 1200 мВ.

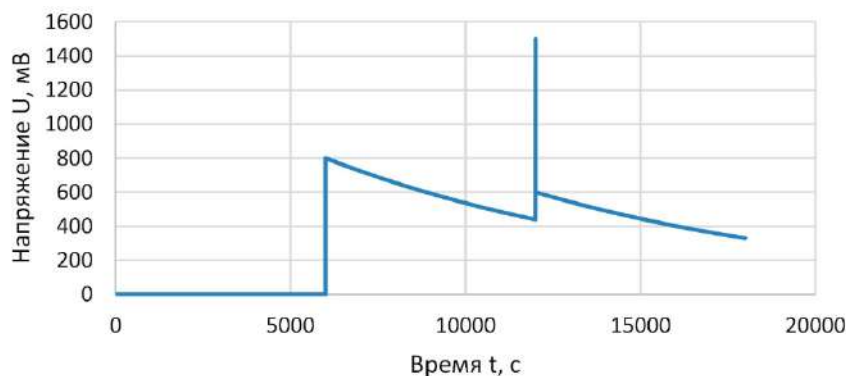


Рис. 8. Напряжение на выходе испытательного стенда

На 6000 секунде со второго каскада энергия передается на step-up конвертор. Выходное напряжение составило 1500 мВ на 12 000 секунде (рис. 8).

При включении нагрузки срабатывает светодиод, реализованный индикатор испытательного стенда, что свидетельствует о том, что реализованная схема преобразования напряжения с бетавольтаических сборок работает.

Описанный выше подход и аппаратная реализация испытательного стенда для конфигурирования работы бетавольтаических сборок предложены впервые. Такой подход позволяет, с одной стороны, повысить удельную мощность бетавольтаического источника питания, с другой – обеспечить автономное питание устройством медицинского Интернета вещей в импульсном режиме.

Полученные результаты в целом согласуются с аналогичными исследованиями [21] и позволяют реализовать исследование и отладку режимов работы бетавольтаического комплекса для получения необходимых значений тока и напряжения на выходе устройств медицинского назначения.

Преимуществом использования бетавольтаического источника питания в качестве первичного источника тока является практически неограниченный источник энергии в течение длительного периода времени.

Таким образом, разработка систем электропитания устройств медицинского Интернета вещей на основе бетавольтаических источников питания представляется перспективной задачей в рамках общего тренда развития цифрового и персонализированного здравоохранения.

Заключение

Разработанный испытательный стенд и результаты проведенных испытаний показали возможность использования бетавольтаических источников питания в сочетании со вторичными источниками энергии – заряжаемыми ионисторами для решения проблемы ограниченной мощности бетавольтаических источников питания за счет программного конфигурирования. Программное конфигурирование режимов работы преобразователя напряжения позволяет отладить режим работы бетавольтаических сборок под решение задач дальнейшей аппаратной реализации законченного устройства требуемых типоразмеров – бетавольтаического комплекса, обеспечивающего автономное импульсное питание устройств медицинского Интернета вещей.

Реализация технологии медицинского Интернета вещей, объединяющего сеть взаимосвязанных датчиков, носимых устройств, медицинских приборов и клинических систем позволяет различным медицинским приложениям снижать расходы на здравоохранение, обеспечивать оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации и улучшать качество медицинского обслуживания. Внедрение систем организации автономного питания датчиков контроля состояния оборудования с использованием бетавольтаических комплексов, позволит увеличить темпы развития медицинского Интернета вещей.

Умные медицинские устройства с автономным электропитанием, такие как носимые мониторы и сенсоры, позволят отслеживать состояние пациентов в режиме реального времени, что особенно важно для хронических больных и пожилых людей. Телемедицина, основанная на технологиях медицинского Интернета вещей, предоставляет возможность удаленного консультирования и диагностики, расширяя доступ к медицинской помощи.

Список литературы

1. Аксенова Е. И., Горбатов С. Ю. Интернет медицинских вещей (IoMT): новые возможности для здравоохранения. М. : НИИОЗММ ДЗМ, 2021. 36 с.
2. Ashfaq Z., Rafay A., Mumtaz R. [et al.]. A review of enabling technologies for Internet of Medical Things (IoMT) Ecosystem // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. P. 101660. doi: 10.1016/j.asej.2021.101660
3. Mathkor D., Mathkor N., Bassfar Z. [et al.]. Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends // Journal of Infection and Public Health. 2024. Vol. 17, iss. 4. P. 559–572. doi: 10.1016/j.jiph.2024.01.013
4. Nishad D., Tripathi D. Internet of Medical Things (IoMT): applications and challenges // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 2020. Vol. 11. P. 2885–2889. doi: 10.61841/turcomat.v11i3.14654

5. Dwivedi R., Mehrotra D., Chandra S. Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2022. Vol. 12, iss. 2. P. 302–318. doi: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010
6. Vishnu S., Ramson S. R. J., Jegan R. Internet of Medical Things (IoMT) – an overview // 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) (Coimbatore, India, 2020). 2020. P. 101–104. doi: 10.1109/ICDCS48716.2020.243558
7. Sindhuja R., Kapse S., Kapse S. A survey of Internet of Medical Things (IoMT) applications, architectures and challenges in smart healthcare systems // *ITM Web of Conferences*. 2023. Vol. 56. P. 05013. doi: 10.1051/itmconf/20235605013
8. Joyia G., Liaqat R., Farooq A., Rehman S. Internet of Medical Things (IOMT): applications, benefits and future challenges in healthcare domain // *Journal of Communications*. 2017. Vol. 12. P. 240–247. doi: 10.12720/jcm.12.4.240-247
9. Askar N., Habbal A., Mohammed A. [et al.]. Architecture, protocols, and applications of the Internet of Medical Things (IoMT) // *Journal of Communications*. 2022. Vol. 17. P. 900–918. doi: 10.12720/jcm.17.11.900-918
10. Pradyumna G. R., Hegde R. B., Bommegowda K. B. [et al.]. Empowering healthcare with IoMT: evolution, machine learning integration, security, and interoperability challenges // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 20603–20623. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362239
11. Kim H., Lee J., Lee S. [et al.]. Multiple-year battery based on highly efficient and stable dual-site radioactive isotope dye-sensitized betavoltaic cell // *Journal of Power Sources*. 2024. Vol. 606. P. 234427. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234427
12. Цветков Л. А., Цветков С. Л., Пустовалов А. А. [и др.]. Радионуклиды для β -вольтаических атомных батарей (миниатюрных, энергоемких, с многолетним сроком службы) // *Радиохимия*. 2022. Т. 64, № 3. С. 281–288.
13. Olsen L. C. Betavoltaic energy conversion // *Energy Conversion*. 1973. Vol. 13, № 4. P. 117–124. doi: 10.1016/0013-7480(73)90010-7
14. Mohamadian M., Feghhi S.A.H., Afarideh H. Conceptual design of GaN betavoltaic battery using in cardiac pacemaker // 13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems 2007, ICENES 2007.
15. Miley G., Luo N. Betavoltaic battery for industry and medicine use employing isotopes from nuclear reactor and weapon waste // *Transactions of the American Nuclear Society*. 2010. Vol. 103. P. 1168–1169
16. Altana C., Cottone F., Mengoni D. First simulations on higher-efficiency betavoltaic battery integrated with electrets for space, medicine and remote sensing applications // 21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS). 2022. P. 245–247. doi: 10.1109/PowerMEMS56853.2022.10007077
17. Betavoltaic Cell Market – Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity and Forecasted, 2018–2028. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/26/2655312/0/en/Betavoltaic-Cell-Market-Global-Industry-Size-Share-Trends-Opportunity-and-Forecasted-2018-2028.html> (дата обращения: 04.02.2025).
18. Daruich de Souza C., Kim J. B., Kim J. [et al.]. The basics of betavoltaic nuclear batteries // *International Journal of Current Advanced Research*. 2021. Vol. 10, № 11. P. 12. doi: 10.24327/ijcar.2021.25544.5098
19. Krasnov A. A., Legotin S. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review) // *Instruments and Experimental Techniques*. 2020. Vol. 63, № 4. P. 437–452. doi: 10.1134/S0020441220040156
20. Yakimov E. Prediction of Betavoltaic Battery Parameters // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 3740. doi: 10.3390/en16093740
21. Рисованный В. Д., Костылев А. И., Душин В. Н. [и др.]. Атомные батареи конденсаторного типа нового поколения с жидким электролитом // *Атомная энергия*. 2022. Т. 132, № 3. С. 175–178

References

1. Aksenova E.I., Gorbato S.Yu. *Internet meditsinskikh veshchey (IoMT): novye vozmozhnosti dlya zdoravookhraneniya = Internet of Medical Things (IoMT): new opportunities for healthcare*. Moscow: NII OZMM DZM, 2021:36. (In Russ.)
2. Ashfaq Z., Rafay A., Mumtaz R. et al. A review of enabling technologies for Internet of Medical Things (IoMT) Ecosystem. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022;13:101660. doi: 10.1016/j.asej.2021.101660
3. Mathkor D., Mathkor N., Bassfar Z. et al. Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends. *Journal of Infection and Public Health*. 2024;17(4):559–572. doi: 10.1016/j.jiph.2024.01.013
4. Nishad D., Tripathi D. Internet of Medical Things (IoMT): applications and challenges. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2020;11:2885–2889. doi: 10.61841/turcomat.v11i3.14654
5. Dwivedi R., Mehrotra D., Chandra S. Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2022;12(2):302–318. doi: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010

6. Vishnu S., Ramson S.R.J., Jegan R. Internet of Medical Things (IoMT) – an overview. *5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) (Coimbatore, India, 2020)*. 2020:101–104. doi: 10.1109/ICDCS48716.2020.243558
7. Sindhuja R., Kapse S., Kapse S. A survey of Internet of Medical Things (IoMT) applications, architectures and challenges in smart healthcare systems. *ITM Web of Conferences*. 2023;56:05013. doi: 10.1051/itmconf/20235605013
8. Joyia G., Liaqat R., Farooq A., Rehman S. Internet of Medical Things (IOMT): applications, benefits and future challenges in healthcare domain. *Journal of Communications*. 2017;12:240–247. doi: 10.12720/jcm.12.4.240-247
9. Askar N., Habbal A., Mohammed A. et al. Architecture, protocols, and applications of the Internet of Medical Things (IoMT). *Journal of Communications*. 2022;17:900–918. doi: 10.12720/jcm.17.11.900-918
10. Pradyumna G.R., Hegde R.B., Bommegowda K.B. et al. Empowering healthcare with IoMT: evolution, machine learning integration, security, and interoperability challenges. *IEEE Access*. 2024;12:20603–20623. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362239
11. Kim H., Lee J., Lee S. et al. Multiple-year battery based on highly efficient and stable dual-site radioactive isotope dye-sensitized betavoltaic cell. *Journal of Power Sources*. 2024;606:234427. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234427
12. Tsvetkov L.A., Tsvetkov S.L., Pustovalov A.A. et al. Radionuclides for β -voltaic atomic batteries (miniature, energy-intensive, with a long service life). *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2022;64(3):281–288. (In Russ.)
13. Olsen L.C. Betavoltaic energy conversion. *Energy Conversion*. 1973;13(4):117–124. doi: 10.1016/0013-7480(73)90010-7
14. Mohamadian M., Feghhi S.A.H., Afarideh H. Conceptual design of GaN betavoltaic battery using in cardiac pacemaker. *13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems 2007, ICENES*. 2007.
15. Miley G., Luo N. Betavoltaic battery for industry and medicine use employing isotopes from nuclear reactor and weapon waste. *Transactions of the American Nuclear Society*. 2010;103:1168–1169.
16. Altana C., Cottone F., Mengoni D. First simulations on higher-efficiency betavoltaic battery integrated with electrets for space, medicine and remote sensing applications. *21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS)*. 2022:245–247. doi: 10.1109/PowerMEMS56853.2022.10007077
17. *Betavoltaic Cell Market – Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity and Forecasted, 2018–2028*. Available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/26/2655312/0/en/Betavoltaic-Cell-Market-Global-Industry-Size-Share-Trends-Opportunity-and-Forecasted-2018-2028.html> (accessed 04.02.2025).
18. Daruich de Souza C., Kim J.B., Kim J. et al. The basics of betavoltaic nuclear batteries. *International Journal of Current Advanced Research*. 2021;10(11):12. doi: 10.24327/ijcar.2021.25544.5098
19. Krasnov A.A., Legotin S. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review). *Instruments and Experimental Techniques*. 2020;63(4):437–452. doi: 10.1134/S0020441220040156
20. Yakimov E. Prediction of Betavoltaic Battery Parameters. *Energies*. 2023;16:3740. doi: 10.3390/en16093740
21. Risovanny V.D., Kostylev A.I., Dushin V.N. et al. New generation capacitor type nuclear batteries with liquid electrolyte. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2022;132(3):175–178. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Земцов

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: zemtsov.fond@gmail.com

Vladimir V. Zemtsov

Postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Антон Владимирович Иващенко

доктор технических наук, профессор,
директор Передовой медицинской
инженерной школы,
Самарский государственный
медицинский университет
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

Anton V. Ivaschenko

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Higher School of Medical
Engineering,
Samara State Medical University
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 17.04.2025

Принята к публикации/Accepted 29.04.2025

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ В ЭНДОСКОПИИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

В. В. Хрящев

Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова, Ярославль, Россия
v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается задача построения системы поддержки принятия врачебного решения для эндоскопических исследований желудочно-кишечного тракта на основе нейросетевых методов и алгоритмов анализа видеоданных. Для ее решения предлагается структура системы искусственного интеллекта, работающая с учетом специфики видеоэндоскопических исследований. *Материалы и методы.* Для построения системы используются методы глубокого машинного обучения. В качестве ядра для ключевых алгоритмов обработки видеопотока используются нейросетевые архитектуры семейства YOLO, а также трансформерные архитектуры. *Результаты и выводы.* Для исследований желудочно-кишечного тракта на основе анализа эндоскопических видеопоследовательностей, а также современных нейросетевых методов и алгоритмов предложена концепция построения системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР). На базе двух медицинских учреждений проведена ее опытная эксплуатация. Установлено, что разработанную на основе предложенной концепции СППВР можно использовать во время проведения эндоскопического обследования пациентов. Кроме того, данная система оказалась достаточно эффективной при мониторинге скринингового исследования в части контроля качества его проведения, выполненного по записи результатов в медико-информационную систему учреждения здравоохранения.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, эндоскопия, глубокое машинное обучение, клиническое исследование, скрининговое исследование

Для цитирования: Хрящев В. В. Концепция построения системы поддержки принятия врачебных решений в эндоскопии желудочно-кишечного тракта // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 137–144. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-16

CONCEPT FOR A CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN GASTROINTESTINAL ENDOSCOPY

V.V. Khryashchev

P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Abstract. *Background.* The article considers the problem of constructing a system for supporting medical decision-making for endoscopic examinations of the gastrointestinal tract based on neural network methods and video data analysis algorithms. To solve this problem, the structure of an artificial intelligence system is proposed that takes into account the specifics of video endoscopic examinations. *Materials and methods.* Deep machine learning methods are used to construct the system. Neural network architectures of the YOLO family, as well as transform architectures, are used as the core for key algorithms for processing the video stream. *Results and conclusions.* The concept of constructing a system for supporting medical decision-making is proposed. A trial operation of the system was carried out in two medical institutions. Studies have shown that the system can be used both directly during an endoscopic examination and for quality control of a screening study after it has been conducted and for recording the results in a medical information system.

Keywords: decision support system, endoscopy, deep machine learning, clinical test, screening test

For citation: Khryashchev V.V. Concept for a clinical decision support system in gastrointestinal endoscopy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):137–144. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-16

Введение

Действия человека в любой сфере жизнедеятельности являются результатом процессов принятия соответствующих управленческих решений. Учитывая необходимость принятия подходящего решения в надлежащее время, наличие системы, обеспечивающей помощь в принятии таких решений, имеет большую ценность. Соответствующая система поддержки принятия решений (СППР) представляет собой информационную систему, которая поддерживает деятельность организаций, предприятий или физических лиц с учетом поставленных временных ограничений. Такие СППР обычно предсказывают будущие ситуации, условия или состояния на основе уже имеющихся данных [1–3].

Одной из важных областей применения таких информационных систем являются системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР) [4–8]. Любой алгоритм, имеющий дело с цифровыми клиническими данными или знаниями, предназначен для поддержки принятия соответствующих решений. Рассматриваемые СППВР являются широко распространенным случаем применения технологий искусственного интеллекта в государственных и частных заведениях здравоохранения. Подобные системы также могут быть интегрированы в телемедицинскую практику.

В настоящее время СППВР нашли применение в следующих медицинских сферах [5, 6]:

- профилактические процедуры (подбор мер по повышению иммунитета пациента, направление его на диагностические процедуры);
- дифференциальная диагностика;
- назначение лечения (подбор необходимых лекарственных средств и лечебных процедур в соответствии с данными о пациенте, помощь в наблюдении за пациентом в процессе лечения);
- наблюдение за пациентом по окончании лечения (выявление результативности оказанных медицинских услуг, уведомление об ухудшении здоровья пациента).

Проведен анализ существующих подходов к построению СППВР в клинической практике и для скрининговых исследований [5]. Он показывает, что потенциальные преимущества использования цифровых СППВР заключаются в следующих факторах [6]:

- повышение безопасности пациентов (уменьшение ошибок при их осмотре, диагностике, назначении лечения);
- повышение качества медицинской помощи (использование последних клинических результатов);
- повышение эффективности медицинской помощи (снижение затрат за счет оптимизации процедур медицинской диагностики).

Существует также класс СППВР, предназначенных для обработки медицинских изображений и видеоданных [9]. К ним относятся системы обнаружения и классификации патологических областей на гистологических изображениях, на КТ- и МРТ-снимках, на видеоданных, полученных в ходе проведения эндоскопических исследований. Основная проблема подобных систем заключается в трудности их использования специалистами в режиме реального времени ввиду высокой вычислительной сложности соответствующих цифровых задач. Тем не менее считается, что данная область разработки СППВР является наиболее востребованной, перспективной и быстроразвивающейся во всем мире [3, 4].

На данный момент одной из перспективных областей для внедрения средств частичной автоматизации анализа медицинских видеоданных является эндоскопическая диагностика, в ходе которой специалисту требуется обнаружить патологии на слизистой оболочке желудка или кишечника путем анализа видеоданных, передаваемых с эндоскопа на экран монитора [10]. При ее проведении пациенту вводится видеоэндоскоп – высокотехнологичный многофункциональный инструмент, позволяющий не только производить малоинвазивный осмотр и диагностику ЖКТ, но и осуществлять взятие биологического материала (биопсию) для гистологического анализа из образцов тканей, подозрительных на наличие неоплазии. При этом изображение, получаемое при проведении исследования, выводится на монитор, расположенный перед врачом-эндоскопистом. Кроме того, видеоданные могут параллельно транслироваться на экран удаленному специалисту. Большинство современных эндоскопических систем поддерживает возможность формирования видеоданных высокого разрешения (Full HD, 4K), обеспечивающих возможность качественного осмотра органов ЖКТ [11, 12].

Таким образом, критический анализ области цифровой эндоскопии ЖКТ показывает, что использование СППВР потенциально позволяет снизить временные и финансовые расходы на проведение исследований, повышает точность и эффективность диагностических процедур, облегчает и расширяет процесс обучения начинающих специалистов в этой высокотехнологичной и сложной области диагностики.

Целью работы является разработка и опытная апробация концепции построения СППВР для эндоскопических исследований ЖКТ.

Разработка структуры СППВР на базе нейронной сети

Существует несколько основных механизмов рассуждения, которые могут быть положены в основу СППВР [1, 2, 13]:

- **системы на основе правил.** Система, основанная на правилах, использует различные базы знаний экспертов в форме выражений, которые можно оценивать как правила ЕСЛИ-ТО (жесткие правила);

- **байесовская сеть.** Она является типичной системой принятия решений, основанной на знаниях, которая показывает вероятностные отношения между наборами переменных – например заболеваний и симптомов на основе условной вероятности, согласно теореме Байеса. Такая сеть помогает моделировать прогресс заболевания во времени и различные виды взаимодействий. Препятствием к ее использованию является то, что в медицине иногда трудно напрямую определить, что является следствием, а что – причиной;

- **модельные системы.** При использовании такого механизма происходит моделирование цифровой системы под каждого отдельного пациента;

- **машинное обучение.** Эти методы основаны на вероятностном принятии решений в соответствии с имеющейся базой данных системы. Такие базы должны быть большими и хорошо структурированными для обеспечения поиска оптимального набора параметров, имевшихся в истории и похожих на клиническую картину текущего исследуемого пациента;

- **генетический алгоритм.** Он не основан на знаниях, а использует итерационные процессы для адаптации и обеспечения оптимального решения на основе имеющихся данных о пациенте;

- **нейронные сети.** Они являются наиболее широко признанными из типов систем, способных учиться на примерах, и в современной медицинской литературе регулярно публикуются отчеты об их использовании в различных областях [13, 14]. На современном этапе развития именно их чаще всего выбирают в качестве механизма рассуждений.

В данной работе рассматривается класс систем, основанный на методах глубокого машинного обучения, ядром которых являются обучаемые нейросетевые модели. Предоставляемая поддержка принятия решений основана на процессах сложной оценки результатов и алгоритмах искусственного интеллекта, использующих базы размеченных данных (рис. 1). Важным фактором является также интеграция нейросетевых СППВР в рабочие процессы (РП) медицинских специалистов.



Рис. 1. Структура СППВР с ядром на основе нейронной сети

Существующим ограничением нейросетевого подхода является то, что, в отличие от других рассматриваемых систем, «правила», используемые сетью, не следуют определенной логике и в большинстве случаев не являются полностью понятными для специалистов. В этом смысле нейронная сеть ведет себя как «черный ящик», что в определенной степени тормозит проникновение таких технологий в медицинскую практику. Для решения этой проблемы разрабатывается отдельный класс интерпретируемых нейронных сетей.

Другая проблема с использованием нейронных сетей связана с необходимостью сбора и экспертной разметки огромных баз медицинских данных, которые часто недоступны, а в большинстве случаев и вовсе не существуют. В связи с этим возникает необходимость поиска подходов к построению робастных нейросетевых моделей на базах данных относительно малого размера. Зачастую эта проблема может быть решена путем предобучения используемой нейросетевой модели на изображениях других, в том числе немедицинских объектов. Кроме того, имеющиеся для обучения данные могут быть размножены (аугментированы) путем различных математических преобразований.

Для обработки видеоизображений в составе СППВР чаще всего применяются нейросетевые алгоритмы детектирования, сегментации и классификации объектов. Для них используются типовые метрики для оценки качества подобного класса алгоритмов, такие как точность (Precision, P), полнота или чувствительность (Recall, R) и средняя точность (Average Precision):

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, R = \frac{TP}{TP + FN}, AP = \frac{\sum_{r=1}^N P_r}{N}, \quad (1)$$

где TP – число истинно положительных результатов; FP – число ложноположительных результатов; FN – число ложноотрицательных результатов; P_r – значение точности, соответствующее определенному значению полноты r ; N – множество различных значений полноты. Дополнительно используется метрика среднего гармонического точности и полноты ($F1$):

$$F1 = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P + R} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (2)$$

Даже для специалистов высокого уровня существует риск пропуска особо значимых областей во время эндоскопического анализа и, как следствие, принятие неверного решения при постановке диагноза пациенту. Внедрение СППВР при интерпретации видеоданных, полученных с видеоэндоскопа, позволяет повысить эффективность и точность проводимой диагностики, снизить количество пропусков патологий, дать врачу дополнительную уверенность качественно принимаемых им решений.

Описание концепции построения СППВР в эндоскопии

Разработанная концепция построения СППВР в эндоскопии на основе алгоритмов компьютерного зрения и методов искусственного интеллекта в условиях практической ограниченности входного набора аннотированных видеоизображений приведена на рис. 2.

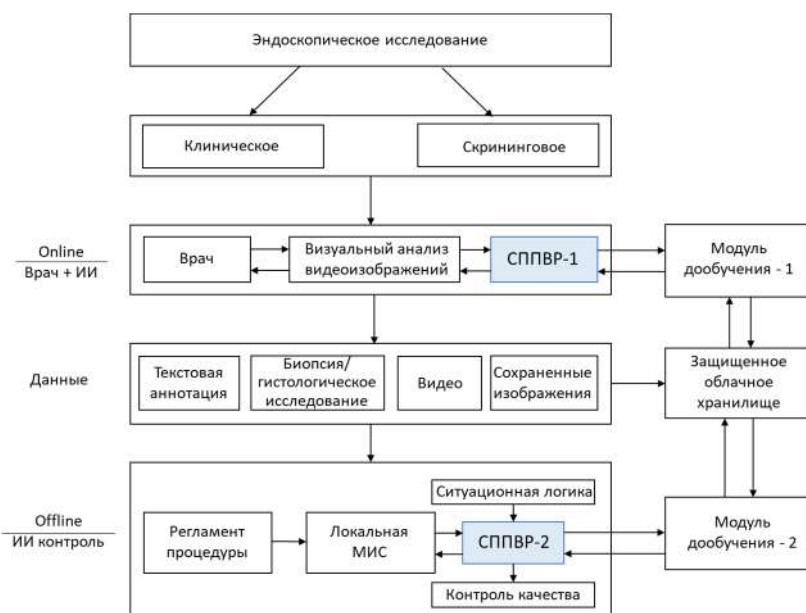


Рис. 2. Концепция построения СППВР в эндоскопии

При ее реализации аппаратная эндоскопическая стойка соединяется с высокопроизводительным сервером, оснащенный картой видеозахвата. В нем же происходит взаимодействие врача с первой СППВР-1, работающей в режиме реального времени. Подсказки врачу выводятся на мониторе в виде обведенных (раскрашенных) областей либо с помощью звуковых подсказок, фокусирующих внимание врача. В процессе исследования сохраняется его полное видео, а также набор статических изображений (кадров) по выбору врача, отражающих значимые области интереса. Они загружаются в используемую медико-информационную систему (МИС) и взаимодействуют со второй СППВР-2, работающей в режиме офлайн и позволяющей аннотировать проведенное исследование, проводить контроль качества процедуры, отбирать изображения с соответствующими областями интереса и др.

Система контроля качества работает на основе регламента соответствующей процедуры, что особенно актуально для проведения массовых скрининговых исследований. В процессе работы СППВР-1 и СППВР-2 накапливают данные в защищенном облачном хранилище, в котором проводится дообучение нейросетевых моделей, улучшающее параметры их работы с учетом накопленного опыта. Важными этапами разработки эндоскопической СППВР являются сбор и разметка визуальных данных, а также обучение нейронной сети (рис. 3).

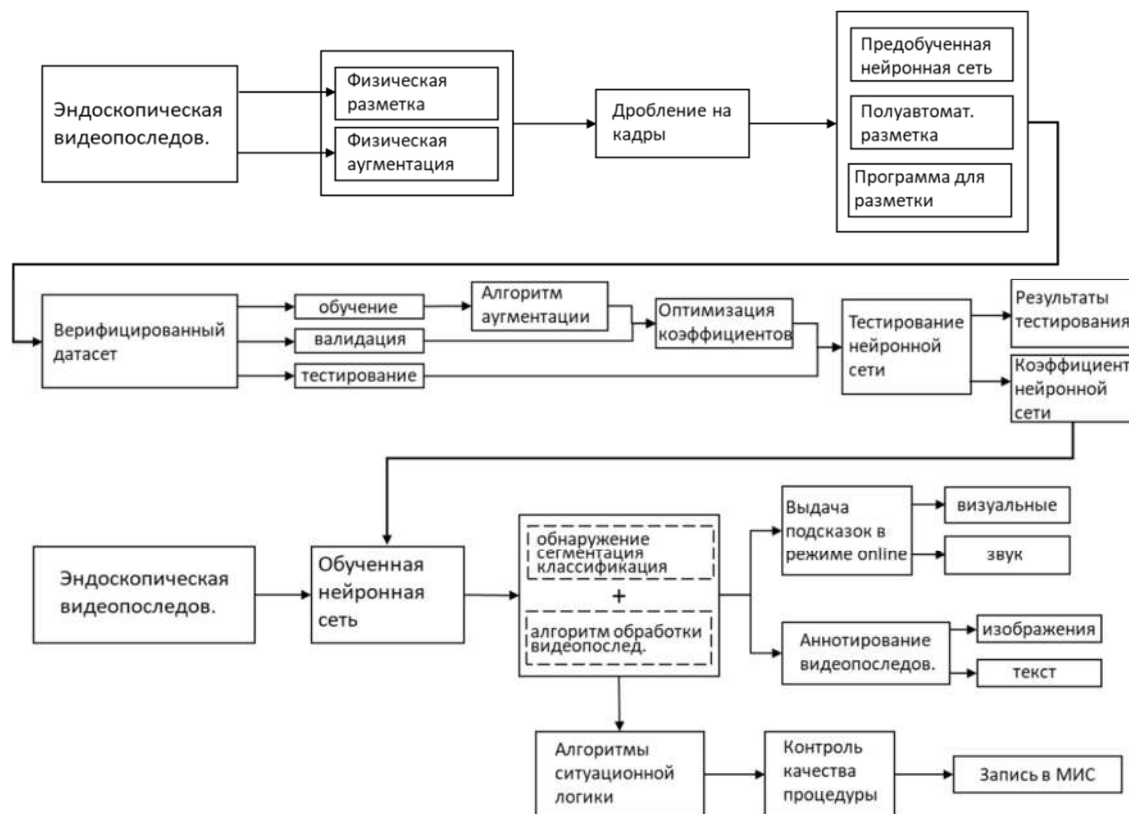


Рис. 3. Этапы построения системы ИИ для СППВР в эндоскопии

На этом этапе с учетом специфики задачи применены два новшества. Первое состоит в устройстве «физической разметки данных», выполненном в форм-факторе педалей. Это обусловлено занятостью рук врача-эндоскописта во время проведения процедуры.

Второе новшество состоит в блоке «физической аугментации» и поясняется на рис. 4. Логика его работы заключается в дополнительной по времени, ракурсу, оптическому увеличению фиксации области интереса во время проведения исследования, что позволяет более эффективно наполнять соответствующие базы видеоизображений.

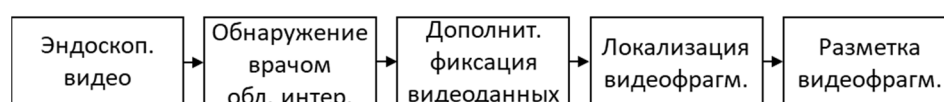


Рис. 4. Последовательность действий при реализации блока «физической аугментации» на этапе сбора и разметки визуальных данных

Для обучения и тестирования нейросетевых моделей требуется создание больших баз изображений. Обычно они создаются из видеопоследовательностей эндоскопических исследований. Самым затратным по времени этапом при их создании является разметка, которую в идеале должны выполнять врачи экспертного уровня. Чтобы значительно сократить эти затраты, предложена методика полуавтоматической разметки эндоскопических изображений с целью выделения на них соответствующих областей интереса. Структурная схема предложенной методики приведена на рис. 5.



Рис. 5. Этапы процедуры полуавтоматической разметки изображений

После аппаратной разметки эндоскопического видеоизображения с помощью педали выполняется локализация видеофрагментов и разбиение их на отдельные кадры. Далее реализуется автоматическая разметка этих кадров нейросетевым алгоритмом, обученным на предыдущих этапах исследования. Последующую доработку полученной алгоритмом разметки выполняет разметчик, являющийся специалистом по цифровой обработке изображений, а итоговую валидацию осуществляет врач-эндоскопист.

Установлено, что для разметки большого количества эндоскопических видеопоследовательностей можно применять разработанную методику итеративно. В этом случае на каждой итерации размечается часть данных, а алгоритм дообучается на новых данных. Это приводит к тому, что следующая итерация требует уже меньших трудозатрат, поскольку качество автоматической разметки возрастает.

В ФГБУ «НМХЦ им. Н. И. Пирогова» Минздрава России выполнена опытная эксплуатация разработанной системы. Она показала, что при использовании указанной методики трудозатраты при создании больших размеченных баз изображений уменьшаются на 35–45 % [15–17]. Они рассчитывались в человеко-часах, при этом учитывалась разная квалификация привлекаемого персонала. Кроме того, с применением разработанной методики выполнена разметка видеоэндоскопических фрагментов с целью формирования тестового набора изображений из реальной клинической практики указанной организации здравоохранения.

Заключение

Таким образом, предложена концепция построения СППВР в эндоскопии на основе методов и алгоритмов искусственного интеллекта. Проводилась ее опытная эксплуатация в различных задачах эндоскопического исследования ЖКТ. Результаты опытной эксплуатации предложенных СППВР в эндоскопическом отделении Ярославской областной клинической онкологической больницы и Пироговском центре показали, что система может быть использована как непосредственно во время эндоскопического исследования, так и для контроля качества исследования после его проведения и записи результатов в медико-информационную систему, что особенно важно для скрининговых эндоскопических исследований ЖКТ.

Список литературы

1. Демидова Л. А., Титов С. Б. Гибридные алгоритмы анализа и обработки данных в задачах интеллектуальной поддержки принятия решений. М. : Горячая линия – Телеком, 2017.
2. Рамеев О. А. Основы теории принятия решений в организационных системах управления. М. : Горячая линия – Телеком, 2023.
3. Khodashahri N. G., Sarabi M. M. H. Decision support system (DSS) // Singaporean Journal of Business Economics and Management Studies. 2013. Vol. 1, № 6. P. 95–102.
4. Dinevski D., Sarenac T., Bele U. Clinical Decision Support Systems // Telemedicine Techniques and Applications. 2011. № 1. P. 185–210.

5. Кирсанова А. В. Современное состояние и перспективы развития экспертных медицинских систем // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2015. № 11. С. 45–46.
6. Фролова М. С., Фролов С. В., Толстухин И. А. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой // Университет им. В. И. Вернадского. Специальный выпуск. 2014. № 52. С. 106–111.
7. Лудупова Е. Ю. Врачебные ошибки. Литературный обзор // Вестник Росздравнадзора. 2016. № 2. С. 6–15.
8. Варданыан Г. Д., Аветисян Г. А., Джаноян Г. Дж. Врачебные ошибки: современное состояние проблемы // Медицинская наука Армении НАН РА. 2019. № 4. С. 105–119.
9. Авшаров Е. М., Абгарян М. Г., Сафарянц С. А. Обработка медицинских изображений как необходимый инструментальный медицинский диагностический процесс // Вестник рентгенологии и радиологии. 2010. № 3. С. 54–61.
10. Палевская С. А., Короткевич А. Г. Эндоскопия желудочно-кишечного тракта. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2020. 752 с.
11. Куваев Р. О., Никонов Е. Л., Кашин С. В. [и др.]. Контроль качества эндоскопических исследований, перспективы автоматизированного анализа эндоскопических изображений // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2013. Т. 2. С. 51–56.
12. Кашин С. В., Никонов Е. Л., Нехайкова Н. В., Лилеев Д. В. Стандарты качественной колоноскопии (пособие для врачей) // Доказательная гастроэнтерология. 2019. № 8. С. 3–32.
13. Николенко С. И. Машинное обучение: основы. СПб. : Питер, 2025. 608 с.
14. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М. : ДМК-Пресс, 2017. 652 с.
15. Хрящев В. В., Завьялов Д. В., Андержанова А. С. Классификация эндоскопических изображений устья червеобразного отростка на основе методов глубокого машинного обучения // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 1. С. 35–38.
16. Хрящев В. В. Использование методов глубокого машинного обучения в задаче обнаружения купола слепой кишки на видеоданных колоноскопического исследования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 4. С. 133–141.
17. Хрящев В. В. Сегментация изображений полипов при колоноскопическом исследовании с использованием нейронных сетей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 66–72.

References

1. Demidova L.A., Titov S.B. *Gibridnye algoritmy analiza i obrabotki dannykh v zadachakh intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy = Hybrid algorithms for data analysis and processing in intellectual decision support tasks*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2017. (In Russ.)
2. Rameev O.A. *Osnovy teorii prinyatiya resheniy v organizatsionnykh sistemakh upravleniya = Fundamentals of decision theory in organizational management systems*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2023. (In Russ.)
3. Khodashahri N.G., Sarabi M.M.H. Decision support system (DSS). *Singaporean Journal of Business Economics and Management Studies*. 2013;1(6):95–102.
4. Dinevski D., Sarenac T., Bele U. Clinical Decision Support Systems. *Telemedicine Techniques and Applications*. 2011;(1):185–210.
5. Kirsanova A.V. The current state and prospects of development of expert medical systems. *Novyy universitet. Ser.: Tekhnicheskie nauki = New University. Ser.: Technical Sciences*. 2015;(11):45–46. (In Russ.)
6. Frolova M.S., Frolov S.V., Tolstukhin I.A. Decision support systems for equipping medical institutions with medical equipment. *Universitet im. V.I. Vernadskogo. Spetsial'nyy vypusk = Vernadsky University. Special issue*. 2014;(52):106–111. (In Russ.)
7. Ludupova E.Yu. Medical errors. Literary review. *Vestnik Roszdravnadzora = Bulletin of Roszdravnadzor*. 2016;(2):6–15. (In Russ.)
8. Vardanyan G.D., Avetisyan G.A., Dzhanyan G.Dzh. Medical errors: the current state of the problem. *Meditsinskaya nauka Armenii NAN RA = Medical Science of Armenia NAS RA*. 2019;(4):105–119. (In Russ.)
9. Avsharov E.M., Abgaryan M.G., Safaryants S.A. Medical image processing as a necessary tool for the medical diagnostic process. *Vestnik rentgenologii i radiologii = Bulletin of Radiology and Radiology*. 2010;(3):54–61. (In Russ.)
10. Palevskaya S.A., Korotkevich A.G. *Endoskopiya zheludочно-kishechnogo trakta = Endoscopy of the gastrointestinal tract*. Moscow: GEOTAR-Media, 2020:752. (In Russ.)
11. Kuvaev R.O., Nikonov E.L., Kashin S.V. et al. Quality control of endoscopic examinations, prospects for automated analysis of endoscopic images. *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik = Kremlin medicine. Clinical Bulletin*. 2013;2:51–56. (In Russ.)
12. Kashin S.V., Nikonov E.L., Nekhaykova N.V., Lileev D.V. Standards of high-quality colonoscopy (manual for doctors). *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2019;(8):3–32. (In Russ.)

13. Nikolenko S.I. *Mashinnoe obucheniye: osnovy* = *Machine learning: fundamentals*. Saint Petersburg: Piter, 2025:608. (In Russ.)
14. Gudfellou Ya., Bendzhio I., Kurvill' A. *Glubokoe obucheniye* = *Deep learning*. Moscow: DMK-Press, 2017:652. (In Russ.)
15. Khryashchev V.V., Zav'yalov D.V., Anderzhanova A.S. Classification of endoscopic images of the mouth of the appendix based on deep machine learning methods. *Tsifrovaya obrabotka signalov* = *Digital signal processing*. 2023;(1):35–38. (In Russ.)
16. Khryashchev V.V. The use of deep machine learning methods in the task of detecting the dome of the cecum on the video data of a colonoscopic examination. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2023;(4): 133–141. (In Russ.)
17. Khryashchev V.V. Segmentation of images of polyps during colonoscopic examination using neural networks. *Biomeditsinskaya radioelektronika* = *Biomedical radio electronics*. 2023;26(4):66–72. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Вячеславович Хрящев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры цифровых технологий
и машинного обучения,
Ярославский государственный университет
имени П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14)
E-mail: v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Vladimir V. Khryashchev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of digital technologies and machine learning,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 17.03.2025

Принята к публикации / Accepted 31.03.2025