

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Мишуков С. В.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ И ПРИМЕСЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

5

Слепцов В. В., Аблаева А. Е., Динь Ба Фьонг

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ КВАДРОКОПТЕРА В КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ
КООРДИНАТАМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

13

Безбородова О. Е.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

21

Безбородова О. Е.

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

29

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

39

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Бордюг А. С.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА
И ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ
СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

46

Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Пухова А. И.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
РАБОТЫ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА

53

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Соловьев А. Э., Новаков А. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА РУЛЕЙ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

61

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Максимов П. А.
3D ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕДНЫХ ТРАСС НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ И ПОЛУЧЕНИЕ
S-ПАРАМЕТРОВ В СРЕДЕ HYPERLYNX

69

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П.,
Баранова А. В., Дудников Д. С.*
СПОСОБ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ
МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

75

Хизбуллин Р. Н.
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХВОЛНОВОГО
ДУХКАНАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЛЬСОКСИМЕТРА

90

Хизбуллин Р. Н.
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛАЗЕРНОГО
ПУЛЬСОКСИМЕТРА ПСОЗ-2КЛ

101

*Антипенко В. В., Печерская Е. А., Левин А. И.,
Голубков П. Е., Камардин И. Н., Анисимова А. А.*
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДОВ
С ТКАНЬЮ ПРИ БИОИМПЕДАНСНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

114

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Трофимов А. А., Гладков А. В., Здобнов С. А.,
Марков Д. М., Недопекин Н. В.*
ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

120

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 2, 2022

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Mishukov S.V.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYSTEM
FOR CONTROLLING HUMIDITY AND IMPURITIES
OF AGRICULTURAL PRODUCTS

5

Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong

IMPROVING TRANSITION QUALITY
OF THE INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEM OF THE QUADROPTER
IN THE CONTROL CIRCUITS IN THE HORIZONTAL PLANE

13

Bezborodova O.E.

INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEM FOR CONTROL
OF THE STATE OF THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE

21

Bezborodova O.E.

HIERARCHICAL STRUCTURE OF A MULTI-AGENT SYSTEM

29

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I.

INCREASING THE ACCURACY OF HIGH VOLTAGE
CAPACITIVE DIVIDERS

39

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Bordyug A.S.

APPLICATION OF THE THEORY OF AN ACTIVE
BIPOLAR AND A PASSIVE FOUR-POLE DURING DEVELOPMENT
TRANSFORMER REPLACEMENT CIRCUITS

46

Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Tryapkin E.Yu., Pukhova A.I.
AUTOMATION OF MEASURING PARAMETERS
OF THE OPERATING MODE OF POWER LINE WIRES
WHEN STUDYING THE HEATING PROCESS

53

ELECTROMECHANICS AND ELECTRICAL DEVICES

Solovev A.E., Novakov A.V.
SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC DRIVE
OF THE RUDDERS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

61

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Maksimov P.A.
3D ELECTROMAGNETIC MODELING OF COPPER
TRACKS ON PRINTEC CIRCUIT BOARD
AND EXTRACTION OF S-PARAMETERS IN HYPERLYNX

69

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

*Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P.,
Baranova A.V., Dudnikov D.S.*
EMD-BASED TECHNIQUE FOR SPEECH SIGNAL PROCESSING

75

Khizbullin R.N.
PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF A THREE-WAVE
TWO-CHANNEL LASER PULSE OXIMETER

90

Khizbullin R.N.
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JUSTIFICATION
OF DESIGN AND CALCULATION OF OPTICAL
PART OF LASER PULSOXIMETER PSO3-2KL

101

*Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Levin A.I.,
Golubkov P.E., Kamardin I.N., Anisimova A.A.*
INVESTIGATION OF THE INTERACTION
OF ELECTRODES WITH TISSUE IN BIOPEDANCE DIAGNOSIS

114

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

Trofimov A.A., Gladkov A.V., Zdobnov S.A., Markov D.M., Nedopekin N.V.
THREE-CHANNEL ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR

120

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ И ПРИМЕСЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

С. В. Мишуков

Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия
stas.mishukov.92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Контроль влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов является основной производственной задачей, влияющей на их качество, снижение энергозатрат при хранении и переработке, стоимость, техническую и пищевую ценности, наличие полезных потребительских свойств. *Материалы и методы.* Предложен двухступенчатый метод определения влажности и примесей в продуктах, исследование которого выполнено посредством компьютерного моделирования в среде SimInTech с получением результатов расчетов модели в режиме реального времени на основе программируемых блоков. *Результаты.* Построена имитационная модель предлагаемого метода и получены результаты ее расчета в сравнении с известным способом определения параметров измерительных цепей. Разработана функциональная схема предлагаемой информационно-измерительной системы контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов. *Вывод.* Результаты расчета показали, что предлагаемый метод обладает существенным преимуществом по критерию относительной погрешности результатов определения информативных параметров.

Ключевые слова: емкостной датчик, моделирование, измерительная схема, операционный усилитель, относительная погрешность, влажность, примеси

Для цитирования: Мишуков С. В. Разработка и исследование системы контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 5–12. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYSTEM FOR CONTROLLING HUMIDITY AND IMPURITIES OF AGRICULTURAL PRODUCTS

S.V. Mishukov

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia
stas.mishukov.92@mail.ru

Abstract. *Background.* Control of moisture and impurities of agricultural products is the main production task affecting their quality, reduction of energy consumption during storage and processing, cost, technical and nutritional values, availability of useful consumer properties. *Materials and methods.* A two-stage method for determining moisture and impurities in products is proposed, the study of which is carried out by computer modeling in the SimInTech environment with obtaining the results of model calculations in real time based on programmable blocks. *Results.* A simulation model of the proposed method is constructed and the results of its calculation are obtained in comparison with the

known method for determining the parameters of measuring circuits. A functional scheme of the proposed information and measurement system for monitoring humidity and impurities of agricultural products has been developed. *Conclusion.* The results of the calculation showed that the proposed method has a significant advantage in terms of the relative error of the results of determining informative parameters.

Keywords: capacitive sensor, simulation, measuring circuit, operational amplifier, relative error, humidity, impurities

For citation: Mishukov S.V. Development and research of a system for controlling humidity and impurities of agricultural products. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

Введение

По данным исследований Центра развития потребительского рынка Московской школы управления «Сколково» ежегодные продовольственные потери производимых продуктов составляют 1,3 млрд тонн (рис. 1), что является серьезной проблемой продовольственной безопасности всего мира.



Рис. 1. Доля мировых продовольственных потерь и отходов по товарам (% от общего числа потерь)

Значительная доля потерь приходится на сельскохозяйственные продукты растительного происхождения – фрукты и овощи 44 %, корнеплоды 20 %, зерно 19 %, масличные и бобовые культуры 3 %, что свидетельствует о серьезных проблемах в указанном секторе пищевой промышленности (рис. 2).

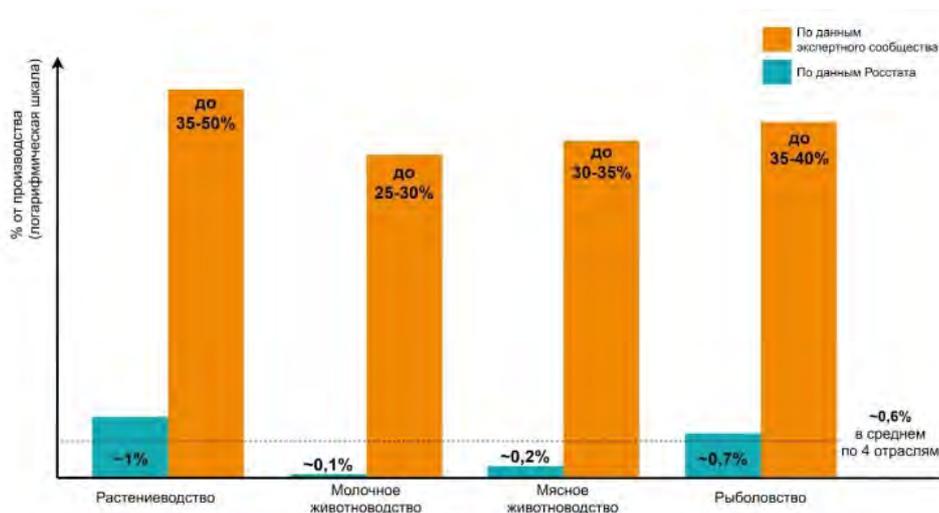


Рис. 2. Оценка продовольственных потерь в РФ

По данным экспертов, в России потери продовольственных продуктов в растениеводстве достигают 35–40 %, при этом их порча происходит на всех этапах производства, транспортировки, хранения и переработки. Например, при выращивании растительных продуктов к их порче и потерям приводит неправильный выбор сроков сборки урожая, в результате чего сельхозпроизводители получают продукцию низкого качества, которая имеет повышенную влажность и повреждения, развитие процессов гниения или поражения вредителями, как следствие, ритейлеры не принимают продукцию по причине несоответствия ее характеристик установленным требованиям. В процессе транспортировки сельхозпродукции потери могут достигать 30 %, что связано с невыполнением условий перевозки – температуры, влажности, загазованности, вибрации и другое, нарушением предельных сроков транспортировки, перегрузкой транспорта и отсутствием логистики. При хранении продукции к порче и потерям приводят несоблюдение температурного режима, влажность, отсутствие вентиляции, механические или биологические повреждения, развитие микроорганизмов, насекомых или клещей, дыхание, прорастание и др. [1].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что одной из причин потерь продовольственной сельхозпродукции является ее высокая влажность, превышающая допустимые пределы и приводящая к ускорению процессов гниения, развитию микроорганизмов, появлению плесени, прорастанию и другое, при этом оценка степени увлажненности продуктов на всех технологических этапах производства, транспортировки и хранения не выполняется, а если и выполняется, то с помощью трудоемких и медлительных методик, которые установлены ГОСТ и выполняются в лабораторных условиях. В редких случаях сельхозпроизводители применяют дорогостоящие портативные влагомеры, которые требуют ручного отбора проб и загрузки в контейнер устройства [2].

Подобные устройства сокращают потери продовольственных продуктов на разных технологических этапах, однако требуют дополнительных затрат времени на выполнение отбора проб в разных партиях продукта, полевых условиях, отдельных складов и т.д., что приводит к дополнительным издержкам на транспортные расходы, а также на содержание отдельного специалиста для проведения указанных работ. Также следует отметить, что указанные устройства не имеют возможности хранить или передавать полученные результаты измерений влагосодержания на съемные носители либо на ПК, в связи с чем сильно ограничены для возможности реализации какой-либо системы мониторинга состояния продуктов.

В таких условиях единственным рациональным решением для сельхозпроизводителей является внедрение в оборудование на всех этапах производства систем контроля влагосодержания сельскохозяйственных продуктов, которые в автоматическом режиме смогут выполнять измерения всех партий продуктов на всех технологических этапах производства, транспортировки и хранения, при этом смогут выполнять оценку качества и управлять процессами подготовки продукта к транспортировке, складированию, обработке, сушке и т.д. [3]. Однако на текущий момент таких информационно-измерительных систем (ИИС) для сельхозпродуктов очень мало, а те, которые применяются, не отвечают современным требованиям точности, быстродействия, простоты и универсальности для внедрения в эксплуатируемое сельскохозяйственное оборудование.

Материалы и методы

Указанная проблема свидетельствует о необходимости разработки новых ИИС контроля и управления на основе перспективных методов определения влажности сельскохозяйственных продуктов. Одним из таких методов является диэлькометрический метод получения информации о степени увлажнения продукта посредством емкостных датчиков (ЕД) [4], который основан на двухступенчатой схеме измерений (рис. 3), обеспечивающей упрощение алгоритма получения информативных данных об исследуемом объекте.

Как видно из представленной структурной схемы, ЕД можно представить в виде четырехэлементной схемы замещения (СЗ), включающей основные информативные параметры, описывающие датчик с исследуемым продуктом: R_1 – сквозное активное сопротивление, характеризующее сквозную активную проводимость среды; C_1 – емкость, характеризующая мгновенную поляризацию, зависящую от электрофизических и естественных свойств среды; R_2 – активное релаксационное сопротивление, характеризующее релаксационную проводи-

мость среды, зависящую от содержания и наличия примесей в среде; C_2 – емкость, характеризующая релаксационную поляризацию и являющаяся основным информативным параметром для системы, поскольку она имеет прямую зависимость от количества частиц воды и их размеров, т.е. от влажности контролируемой среды.

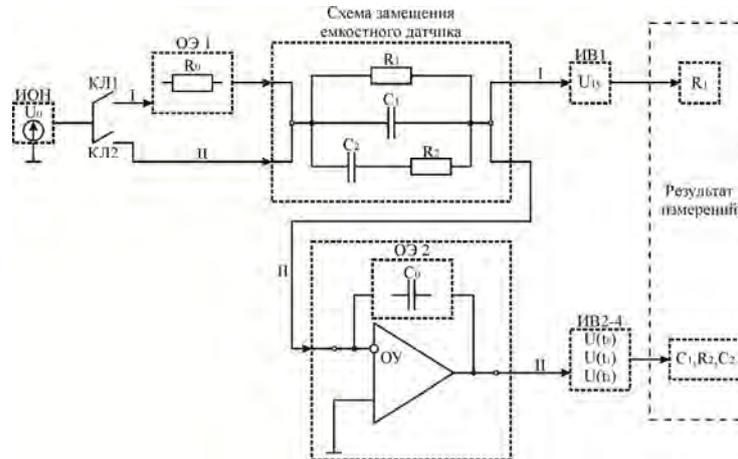


Рис. 3. Структурная схема метода определения влажности и примесей продуктов

Первая ступень измерений по предлагаемому методу позволяет определить сквозное сопротивление ЕД R_1 , для этого от источника опорного напряжения (ИОН) через ключ (КЛ1) и опорный элемент (ОЭ1) в виде резистора R_0 подается скачок постоянного напряжения U_0 , при этом сквозное сопротивление датчика R_1 и опорный резистор R_0 образуют резистивный делитель напряжения, описываемый выражением

$$R_1 = \frac{R_0 U_{1y}}{U_0 - U_{1y}}, \quad (1)$$

где U_{1y} – измеренная величина напряжения (ИВ1), В.

Модель измерительной схемы (ИС) для I ступени, построенная в среде SimInTech, представлена на рис. 4.

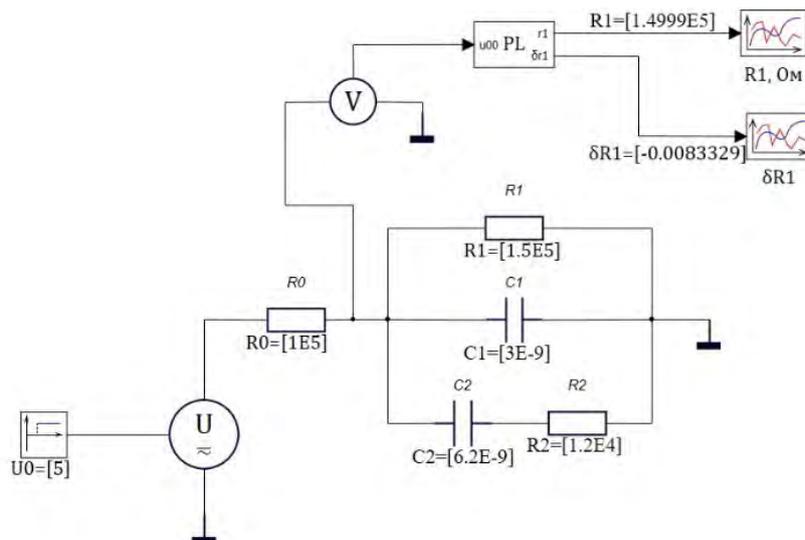


Рис. 4. ИС I ступени измерений

Значения параметров модели ИС взяты из известного способа определения параметров многоэлементных цепей [5]: $U_0 = 5$ В; $R_0 = 100$ кОм; $C_0 = 17$ нФ; $R_1 = 150$ кОм; $C_1 = 3$ нФ; $R_2 = 12$ кОм; $C_2 = 6,2$ нФ; $\tau = 74,4$ мкс.

Для выполнения расчетов в модели ИС предусмотрен блок «Язык программирования», в который введено выражение (1), в результате чего получено значение параметра ЕД $R_1 = 149,999$ кОм с относительной погрешностью $\delta R_1 = \pm 0,008$ %, что свидетельствует о работоспособности и высокой точности предлагаемого метода на I ступени измерений.

На второй ступени измерений выполняется определение значений C_1 , C_2 и R_2 , для этого от ИОН через ключ (КЛ2) на ЕД, подключенный к операционному усилителю (ОУ), отрицательная обратная связь которого реализована посредством опорного элемента (ОЭ2) в виде конденсатора C_0 , подается еще один скачок постоянного напряжения U_0 , в результате чего напряжение на выходе ОУ изменяется по экспоненциальному закону переходного процесса, в течение которого в строго заданные моменты времени t_0 , t_1 и t_2 измеряются напряжения $U(t_0)$, $U(t_1)$ и $U(t_2)$ (ИВ2-4).

Данные отсчеты напряжений являются основой для построения системы уравнений:

$$\begin{cases} U(t_0) = A_0 + A_1 t_0 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right), \\ U(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right), \\ U(t_2) = A_0 + A_1 t_2 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом вычисленного сквозного сопротивления R_1 на I ступени измерений из приведенной системы уравнений определяются соотношения коэффициентов A_0 , A_1 , A_3 и постоянная времени τ :

$$A_0 = U(t_0) , \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{U_0}{R_1 C_0} , \quad (4)$$

$$A_3 = \frac{(U(t_1) - A_0 - A_1 t_1)^2}{2U(t_1) - A_0 - U(t_2)} , \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left(\frac{U(t_1) - A_0 - A_1 t_1}{U(t_2) - U(t_1) - A_1 t_1} \right)} . \quad (6)$$

На основе функциональных зависимостей определяются значения информативных параметров ЕД:

$$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0} ; C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0} ; R_2 = \frac{\tau}{C_2} . \quad (7)$$

Модель ИС для II ступени, построенная в среде SimInTech, представлена на рис. 5.

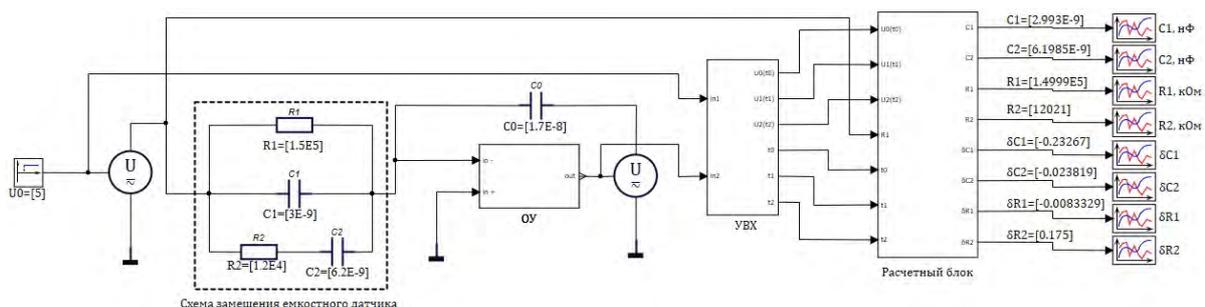


Рис. 5. ИС II ступени измерений

В приведенной модели ИС применяются пользовательские блоки: «ОУ» – операционный усилитель, схема которого была подробно описана в статье [6]; «УВХ» – устройство выборки и хранения, необходимое для получения точных временных отсчетов, выборки сигналов и точных значений напряжений $U(t_0)$, $U(t_1)$, $U(t_2)$; «Расчетный блок», выполняющий расчеты информативных параметров по выражениям (1)–(7).

Результаты

Результаты расчетов информативных параметров построенной модели ИС выведены на линии связи и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета модели ИС в среде SimInTech

Расчетные параметры	R_1 , кОм	C_1 , нФ	R_2 , кОм	C_2 , нФ
Действительные значения	150	3	12	6,2
Расчетные значения	149,999	2,993	12,021	6,198
Относительная погрешность измерений δ , %	$\pm 0,008$	$\pm 0,232$	$\pm 0,175$	$\pm 0,023$

Положительные результаты имитационного моделирования предлагаемого метода определения информативных параметров ЕД свидетельствуют о целесообразности его применения в разрабатываемой ИИС контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов, функциональная схема которой представлена на рис. 6.

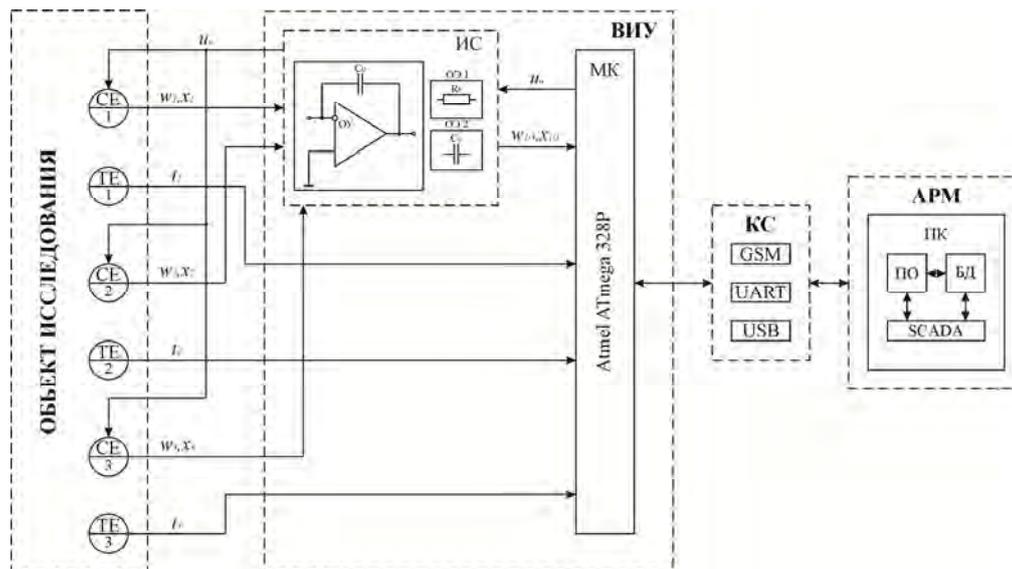


Рис. 6. Функциональная схема ИИС: CE1-3 – емкостной датчик; TE1-3 – датчик температуры; ИС – измерительная схема; ВИУ – вторичное измерительное устройство; КС – канал связи; АРМ – автоматизированное рабочее место; GSM – протокол беспроводной связи; UART – протокол связи (универсальный асинхронный приемопередатчик); USB – протокол связи (универсальная последовательная шина); ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение; БД – база данных; SCADA – программный пакет диспетчерского управления и сбора данных

Принцип работы ИИС, приведенной на функциональной схеме, заключается в следующем: в объект исследования (например, уборочную, очистительную, сушильную технику) встраиваются ЕД и датчики температуры (ДТ), которые посредством ИС предлагаемого метода и напрямую передают в ВИУ на основе МК Atmel ATmega 328P значения измеряемых величин влажности (w , %), примесей (x , % массы) и температуры (t , °C), передаваемых любым доступным КС в АРМ оператора, представляющее из себя персональный компьютер с предустановленным ПО (например, SCADA), выполняющим контроль и управление технологическим процессом сборки, транспортировки, обработки и хранения сельскохозяйственных продуктов.

Схема внедрения разработанной ИИС в сельхозпредприятие, занимающееся выращиванием пшеничных культур, приведена на рис. 7.

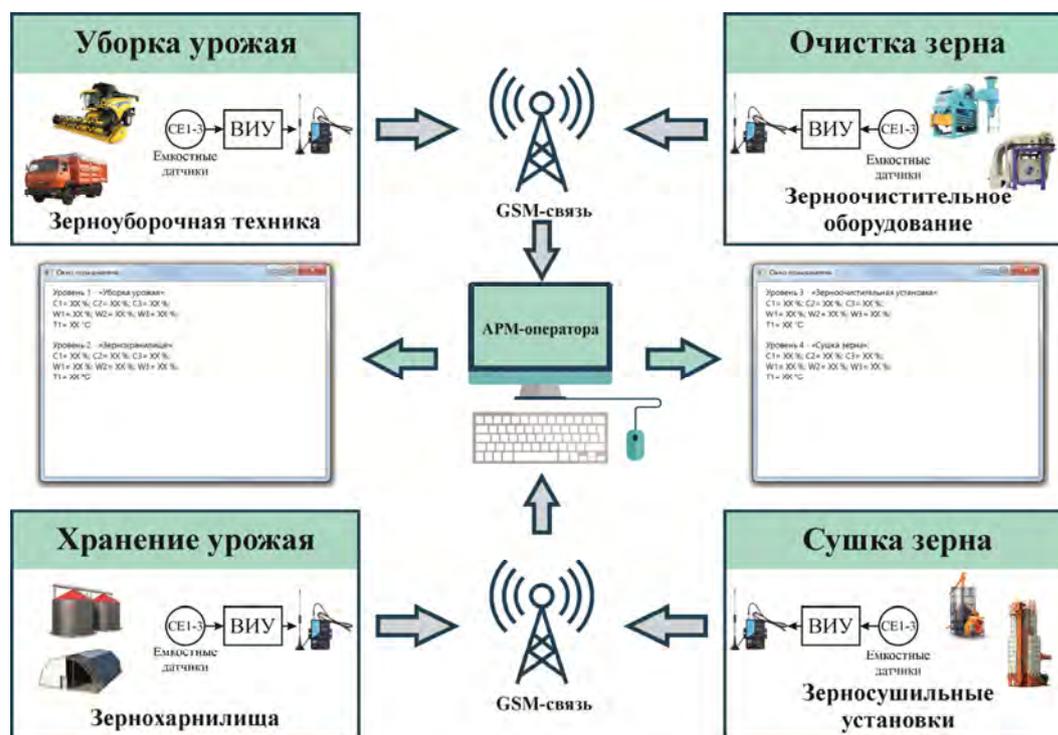


Рис. 7. Схема внедрения ИИС в технологический процесс сельскохозяйственного предприятия

Заключение

Анализ результатов имитационного моделирования в среде SimInTech показывает, что предлагаемый метод определения информативных параметров ЕД обладает невысокой относительной погрешностью измерений, достаточным быстродействием и универсальностью для применения в разработанной ИИС контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов. Применение предлагаемой ИИС позволит сельскохозяйственным предприятиям значительно упростить процесс определения схемы обработки и класса продукта на всех технологических этапах уборки, послеуборочной обработки и хранения урожая. Данная система может быть встроена в уборочную технику, что позволит еще на этапе уборки урожая получить первичные полевые сведения о состоянии продукта. Для этого датчики и ВИУ системы встраиваются в уборочную технику, например, комбайны или грузовые автомобили, информация от которых посредством GSM-связи передается в АРМ оператора и обрабатывается в диспетчерском пункте предприятия.

Предлагаемый метод определения информативных параметров многоэлементных цепей имеет практическую ценность для специалистов в области контрольно-измерительной техники при измерении физических величин (влажности, давления, температуры, плотности и т.д.), контроле характеристик радиокомпонентов в составе электрических схем, исследовании процессов в диэлектрических и полупроводниковых средах, изучении свойств тканей живых организмов и др.

Список литературы

1. Воротников И. Н., Мишуков С. В. Мобильный цифровой измерительный комплекс для определения влажности семян сельскохозяйственных культур // Цифровые технологии в сельском хозяйстве: текущее состояние и перспективы развития : сб. науч. тр. по материалам I Междунар. науч.-практ. конф. (Ставрополь, 25 сентября 2018 г.). Ставрополь : АГРУС, 2018. С. 307–314.
2. Муравлев В. К., Мырзабекова А. М. Методы контроля влажности зерновых продуктов на элеваторах // Инновации в науке. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-vlazhnosti-zernovuyh-produktov-na-elevatorah> (дата обращения: 04.01.2022).

3. Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan S. Z., Mishukov S. V. Information-measurement system for determining moisture content of dry and liquid agricultural produce // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019 (Saint Petersburg, 23–24 May 2019). Saint Petersburg : Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012041. doi:10.1088/1757-899X/643/1/012041
4. Пат. 2714954 Российская Федерация, МПК7 G01R 27/02 (2006.01). Способ определения параметров многоэлементных двухполюсников / Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ ; № 2019118177 ; заявл. 11.06.2019 ; опубл. 21.02.2020, Бюл. № 6. 2 с.
5. Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В., Светлов А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78. doi:10.21685/2307-5538-2018-3-9
6. Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 48–53. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

References

1. Vorotnikov I.N., Mishukov S.V. Mobile digital measuring complex for determining the moisture content of agricultural seeds. *Tsifrovyye tekhnologii v sel'skom khozyaystve: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. nauch. tr. po materialam I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Stavropol', 25 sentyabrya 2018 g.) = Digital technologies in agriculture: current state and prospects of development : collection of scientific tr. based on the materials of the I International Scientific and Practical Conference (Stavropol, September 25, 2018)*. Stavropol: AGRUS, 2018:307–314. (In Russ.)
2. Muravlev V.K., Myrzabekova A.M. Methods of moisture control of grain products at elevators. *Innovatsii v nauke = Innovations in science*. 2015;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-vlazhnosti-zernovykh-produktov-na-elevatorah> (accessed 04.01.2022).
3. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan S.Z., Mishukov S.V. Information-measurement system for determining moisture content of dry and liquid agricultural produce. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019 (Saint Petersburg, 23–24 May 2019)*. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019:012041. doi:10.1088/1757-899X/643/1/012041
4. Pat. 2714954 Russian Federation, МПК7 G01R 27/02 (2006.01). Method for determining the parameters of multi-element bipolar. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V.; the applicant and the patent holder of the Stavropol State Agrarian University; No. 2019118177; appl. 11.06.2019; publ. 21.02.2020, bull. № 6. (In Russ.)
5. Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V., Svetlov A.V. Cumulative measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2018-3-9
6. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V. Modeling of measuring circuits of capacitive sensors in the SimInTech environment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(3):48–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Вадимович Мишуков

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

Stanislav V. Mishukov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.01.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.02.2022

Принята к публикации/Accepted 25.03.2022

УДК 621.311
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КВАДРОКОПТЕРА В КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ КООРДИНАТАМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

В. В. Слепцов¹, А. Е. Аблаева², Динь Ба Фьонг³

^{1,2,3}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
¹vsleptsov@gmail.com, ²ablaeva@gmail.com, ³nhoht_ck49@yahoo.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одной из важных задач при проектировании квадрокоптера является разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Материалы и методы.* Данная система должна обеспечивать полет квадрокоптера с максимальной независимостью от внешних возмущений. Так как информационно-измерительная и управляющая система включает в себя инерционные датчики, которые существенно ухудшают характеристики контура управления квадрокоптера, то в данной статье рассмотрена задача синтеза контура управления одной из координат в горизонтальной плоскости информационно-измерительной и управляющей системы с существенным повышением качества управления движением квадрокоптера за счет внедрения идентификаторов состояния. *Результаты и выводы.* Данная система служит для мониторинга квадрокоптером различных объектов и его способности преодолевать возмущения в неопределенных ситуациях.

Ключевые слова: квадрокоптер, идентификатор, передаточная функция, регулятор положения

Для цитирования: Слепцов В. В., Аблаева А. Е., Динь Ба Фьонг. Повышение качества переходных процессов информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера в контурах управления координатами в горизонтальной плоскости // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 13–20. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

IMPROVING TRANSITION QUALITY OF THE INFORMATION- MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE QUADROCOPTER IN THE CONTROL CIRCUITS IN THE HORIZONTAL PLANE

V.V. Sleptsov¹, A.E. Ablaeva², Dinh Ba Phuong³

^{1,2,3}MIREA – Russian Technological University, IKBSP, Moscow, Russia
¹vsleptsov@gmail.com, ²ablaeva@gmail.com, ³nhoht_ck49@yahoo.com

Abstract. *Background.* One of the important tasks in the design of a quadcopter is the development of an information-measuring and control system of a quadcopter. *Materials and methods.* This system should provide quadcopter years with the maximum reduction of external disturbances. Since the information-measuring and control system includes inertial sensors, which significantly degrade the characteristics of the control loop of the spacecraft. To solve these problems, this article considers the problem of synthesizing a control loop of one of the coordinates in the horizontal plane of an information-measuring and control system with a quadcopter state identifier. The aim of the work is to improve the quality of control of the movement of the quadcopter based on the introduction of state identifiers in the information-measuring and control system of the quadcopter. *Results and conclusions.* This system serves for the capable monitoring of various objects of the quadcopter and its ability to overcome disturbances in uncertain situations.

Keywords: quadcopter, identifier, transfer function, position controller

For citation: Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Improving transition quality of the information-measuring and control system of the quadcopter in the control circuits in the horizontal plane. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):13–20. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

Введение

В настоящее время современные квадрокоптеры (КК) должны обладать не только устойчивостью, компактностью, но и способностью преодоления возмущений в неопределенных ситуациях. Качественные характеристики в управлении квадрокоптером зависят от многих его технических систем. Одной из важнейших систем КК является информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС), которая представляет собой совокупность технических средств и программного обеспечения, осуществляющая сбор и обработку измерительной информации об объекте и выработку необходимых управляющих воздействий на объект.

Теоретическая часть

Динамику квадрокоптера можно описать системой дифференциальных уравнений, которая имеет следующий вид [1, 2]:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} [\cos(R) \sin(T) \cos(K) + \sin(R) \sin(K)] - \frac{A_x}{m} \frac{dX}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} [\sin(R) \sin(T) \cos(K) + \cos(R) \sin(K)] - \frac{A_y}{m} \frac{dY}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \cos(T) \cos(K) - \frac{A_z}{m} \frac{dZ}{dt} - g, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} = \frac{l}{J_{xx}} (F_4 - F_2), \quad (4)$$

$$\frac{d^2 K}{dt^2} = \frac{l}{J_{yy}} (F_3 - F_1), \quad (5)$$

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{lb}{J_{zz} K_T} (F_1 - F_2 + F_3 - F_4), \quad (6)$$

$$F_i = K_T \omega_i^2. \quad (7)$$

Здесь приняты следующие обозначения: F_i – силы тяги винтов ($i = 1 \dots 4$); J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} – моменты инерции квадрокоптера вокруг соответствующих осей; m – масса квадрокоптера; l – расстояние от центра квадрокоптера до мест крепления электродвигателей; b – технологический коэффициент; A_x , A_y , A_z – коэффициенты удельного сопротивления; K_T – физический коэффициент; X , Y , Z – координаты центра масс КК; R – угол рыскания; T – угол тангажа; K – угол крена; g ускорение свободного падения; ω_i – угловая скорость вращения i -го винта ($i = 1 \dots 4$);

Под ИИУС КК понимают совокупность технических средств и программного обеспечения, осуществляющую сбор, хранение и обработку информации о параметрах движения, а также выработку управляющих воздействий на элементы управления. Эти уравнения (1)–(7) позволяют разработать функциональную схему ИИУС КК, которая и представлена на рис. 1 [1, 2].

Приняты следующие обозначения: РПz, РПx, РПу, РПт, РПк, РПг – регуляторы положений по координатам Z , X , Y , T , K , R соответственно; РЭП1 – РЭП4 – четыре регулируемых по скорости электропривода; РСт, РСк и РСг – регуляторы скорости по координатам T , K и R ; ДПz, ДПx, ДПу, ДПт, ДПк, ДПг – датчики положений по координатам Z , X , Y , T , K , R соответственно; ДСт, ДСк, ДСг – датчики скорости по координатам T , K и R ; КУ1, КУ2 – корректирующие элементы; U_{zZ} , U_{zX} , U_{zY} , U_{zT} , U_{zK} , U_{zR} – сигналы задания положений по координатам Z , X , Y , T , K , R соответственно; U_{pPz} , U_{pPr} – выходные сигналы с регуляторов положения координат Z и R соответственно; U_{zT} , U_{zK} – сигналы задания координат T и K ; U_{zCT} , U_{zCK} , U_{zCR} – сигналы задания скоростей координат T , K и R ; U_{pCT} , U_{pCK} , U_{pCR} – сигналы с регуляторов скорости координат T , K и R ; F_z – сила тяги по координате Z ; P – вес КК; V_z – скорость перемещения по координате Z ; MT , VT – соответственно момент и скорость по координате T ; M_k ,

V_k – соответственно момент и скорость по координате K ; M_r , V_r – момент и скорость по координате R соответственно; K_{Tz} , K_{TT} , K_{Tk} , K_{Tr} – физические коэффициенты; $W_{pIz}(S)$, $W_{pIx}(S)$, $W_{pIy}(S)$, $W_{pIT}(S)$, $W_{pIk}(S)$, $W_{pIr}(S)$ – передаточные функции регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R соответственно; $W_{pcT}(S)$, $W_{pcK}(S)$ – передаточные функции регуляторов скорости по координатам T , K соответственно; $K_{рзп}$, $T_{рзп}$ – коэффициент передачи и постоянная времени РЭП соответственно; $K_{ДПz}$, $T_{ДПz}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Z соответственно; $K_{ДПx}$, $T_{ДПx}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате X соответственно; $K_{ДПy}$, $T_{ДПy}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Y соответственно; $K_{ДПТ}$, $T_{ДПТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате T соответственно; $K_{ДПk}$, $T_{ДПk}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате K соответственно; $K_{ДПр}$, $T_{ДПр}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R соответственно; $K_{ДсТ}$, $T_{ДсТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате T соответственно; $K_{Дск}$, $T_{Дск}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате K соответственно; $K_{Дсr}$, $T_{Дсr}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате R соответственно; K_{vz} , T_{vz} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Z соответственно; K_{vx} , T_{vx} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате X соответственно; K_{vy} , T_{vy} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Y соответственно; K_{vT} – коэффициент передачи узла скорости по координате T ; K_{vk} – коэффициент передачи узла скорости по координате K ; K_{vr} – коэффициент передачи узла скорости по координате R ; F_{pIz} , F_{pIx} , F_{pIy} , F_{pIT} , F_{pIk} , F_{pIr} , F_{pIz} – нелинейности регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R соответственно; F_1 , F_2 – нелинейности корректирующих устройств; F_{pcT} , F_{pcK} – нелинейности регуляторов скорости по координатам T и K .

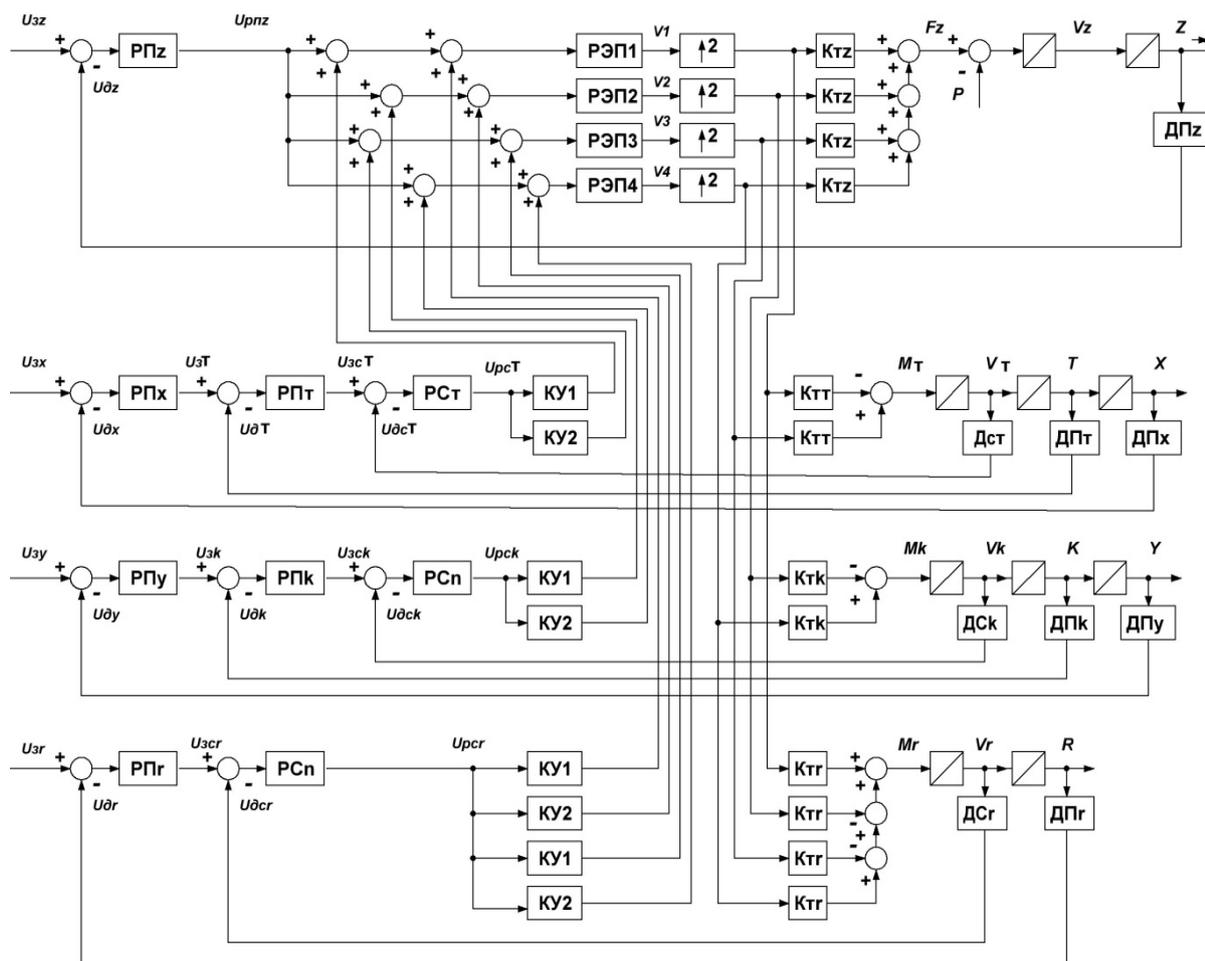


Рис. 1. Функциональная схема ИИУС КК

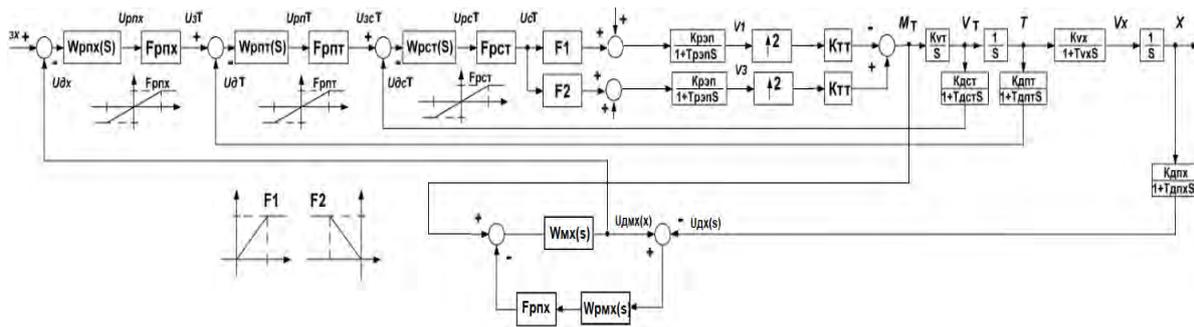


Рис. 3. Структурная схема системы управления координатой X с идентификатором состояния

Внутренний контур идентификации следует настраивать на технический оптимум [8], так как перерегулирование в нем нежелательно, т.е.

$$W_{pm}(S)W_{mx}(S) = \frac{1}{2\tau S(1 + \tau S)}. \tag{8}$$

Выберем

$$W_{mx}(S) = \frac{K_{дп} \frac{K_1}{K_2}}{S(1 + 0,1T_{дп}S)}. \tag{9}$$

Откуда

$$W_{pm}(S) = \frac{K_1}{0,2K_2K_{дп}T_{дп}} = K_{pm}. \tag{10}$$

Это передаточная функция П-регулятора.

Моделирование

Поведение синтезированной системы управления координатой X было промоделировано путем подачи на вход системы сигнала типа «ступенька» амплитудой 1 м, для значения постоянной времени датчика положения 0,03 с, без идентификатора и с ним. Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5.

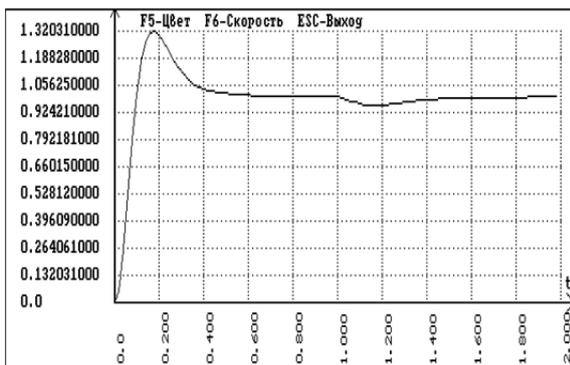


Рис. 4. Сигналы реального положения по координате X при $T_{дп} = 0,03$ с без идентификатора состояния

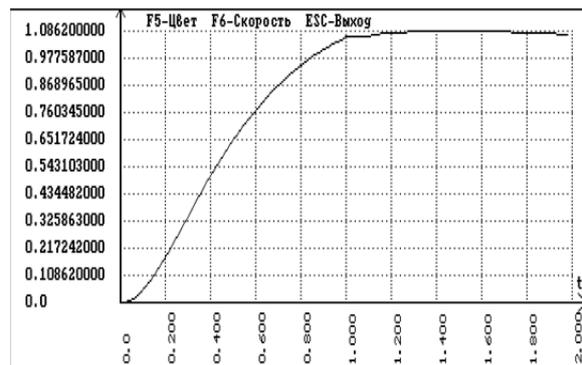


Рис. 5. Сигналы реального положения по координате X при $T_{дп} = 0,03$ с с идентификатором состояния

Анализ графиков на рис. 4 и 5 показывает, что синтезированная система управления координатой X ИИУС КК без идентификатора состояния обладает большим перерегулированием (до 32 %) и высокой колебательностью (амплитудой до 8 %), введение идентификатора состояния устраняет эти недостатки.

Проведем проверку контура управления ИИУС КК с идентификатором состояния по координате X при использовании датчиков инерционных и безинерционных при перемещении на 1 м при следующих параметрах: $K_{рп} = 400$; $T_{рп1} = 0,16$ с; $T_{рп2} = 0,1$ с; $K_T = 1 \frac{\text{рад}}{\text{В}}$; $T_T = 0,02$ с; $K_2 = 10 \frac{1}{\text{с}}$; $K_1 = 2 \frac{\text{М}}{\text{рад}}$; $K_{дп} = 1$; $T_{дп} = 0,03$ с.; $K_{рм} = 30 \frac{\text{рад М}}{\text{рад}^2}$.

Результаты моделирования при позиционном управлении, т.е. при $U_{зпi} = 1(t)$ и $F_c = 10(t - 1)$ представлены на рис. 6.

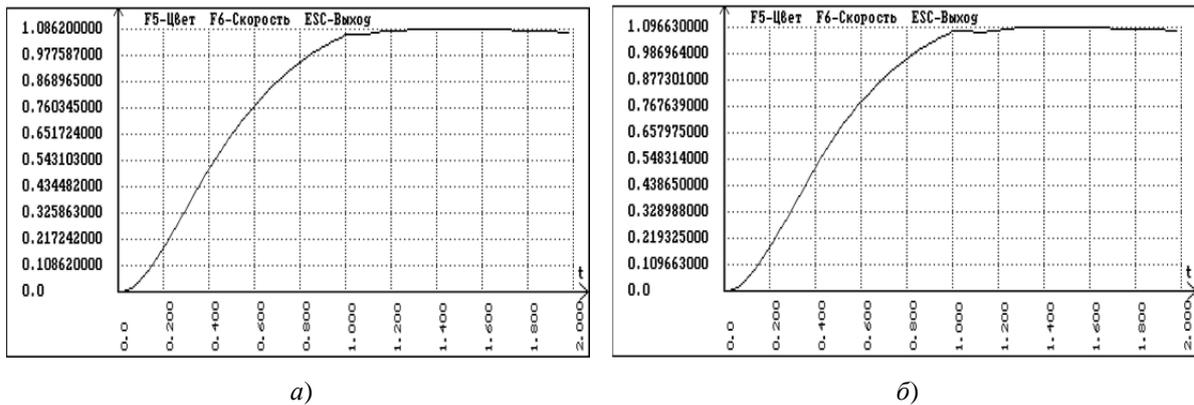


Рис. 6. Переходные процессы в контуре управления в ИИУС КК с идентификатором состояния: а – при безинерционном датчике положения; б – при инерционном датчике положения

Видно, что контур обрабатывает перемещения без перерегулирования и практически без колебаний.

Рассмотрим поведение контура при контурном управлении и набросе нагрузки (например, ветровой).

Результаты моделирования при контурном управлении, т.е. при $U_{зпi} = 1,7t$ и $F_c = 10(t - 1)$, представлены на рис. 7.

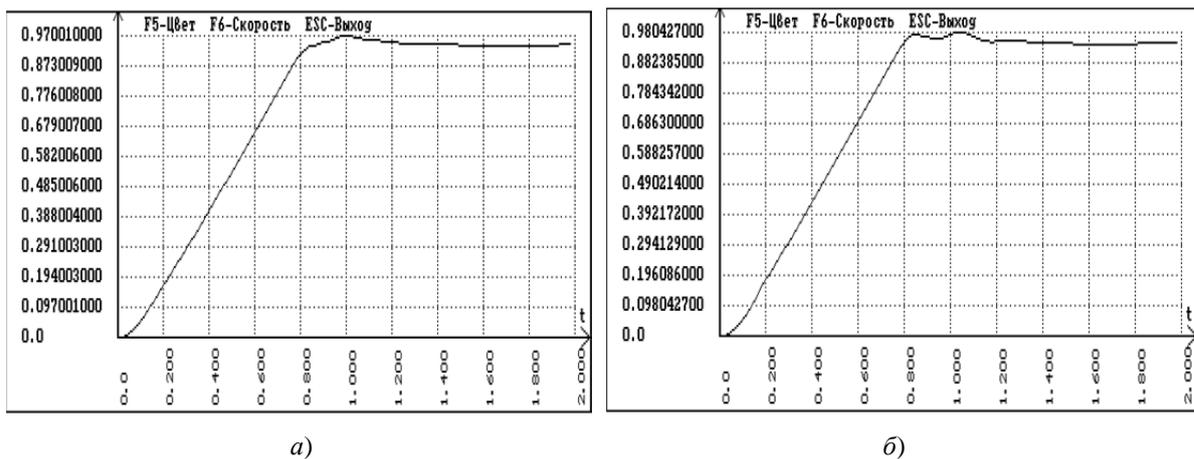


Рис. 7. Переходные процессы в контуре управления в ИИУС КК с идентификатором состояния: а – при безинерционном датчике; б – при инерционном датчике

Анализ графиков на рис. 4–7 показывает, что синтезированная система управления координатой X ИИУС КК с идентификатором состояния при использовании датчиков инерционных и безинерционных обладает хорошими регулировочными характеристиками – практическим отсутствием перерегулирования и малой колебательностью. Приведенные переходные процессы свидетельствуют о хороших технических характеристиках контура управления по координате X ИИУС КК с идентификатором состояния при использовании инерционных датчиков.

Заключение

В статье изложен синтез контура управления одной из координат информационно-измерительной и управляющей системы с идентификатором состояния квадрокоптера, способного мониторить различные объекты и преодолевать возмущения в неопределенных ситуациях.

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- контуры управления координатами горизонтальной плоскости следует настраивать на технический оптимум, что обеспечивает получение плавных переходных процессов;
- система управления координатой X ИИУС КК без идентификатора состояния обладает большим перерегулированием и высокой колебательностью при использовании инерционных датчиков;
- система управления координатой X ИИУС КК с идентификатором состояния позволяет устранить недостатки и обеспечить необходимые характеристики при использовании инерционных датчиков.

Список литературы

1. Слепцов В. В., Лагунова А. Д., Аблаева А. Е., Динь Ба Фыонг. Разработка и анализ информационно-измерительных и управляющих систем квадрокоптеров // Приборы. 2021. № 9. С. 20–27.
2. Dinh Ba Phuong. Synthesis of the control loop for the coordinate of the horizontal plane of the quadcopter information-measuring and control system // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2021. P. 012038. doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012038
3. Рокачевский О. А., Слепцов В. В., Аблаева А. Е., Динь Ба Фыонг. Синтез контура управления координатой высоты информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 1. С. 38–43.
4. Бондарев А. Н., Киричек Р. В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 13–23.
5. Подрезов Ю. В. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 3. С. 64–72.
6. Джунипер А. Дроны: критерии выбора + основы управления = безопасность: полное практическое руководство : пер. с англ. В. Яценкова. М. : КоЛибри, 2019. 159 с.
7. Гололобов В. Н., Ульянов В. И. Беспилотники для любознательных. СПб. : НиТ, 2018. 249 с.
8. Ющенко А. С., Лебедев К. Р., Забихафар С. Х. Система управления КК на основе адаптивной нейронной сети // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. № 7. С. 262–267.
9. Luukkonen T. Modelling and Control of Quadcopter. School of Science. Espoo, 2011. P. 26.

References

1. Sleptsov V.V., Lagunova A.D., Ablaeva A.E., Din' Ba Fyong. Development and analysis of information-measuring and control systems of quadcopters. *Pribory = Instruments*. 2021;(9):20–27. (In Russ.)
2. Dinh Ba Phuong. Synthesis of the control loop for the coordinate of the horizontal plane of the quadcopter information-measuring and control system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021:012038. doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012038
3. Rokachevskiy O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Din' Ba Fyong. Synthesis of the control contour of the altitude coordinate of the information-measuring and control system of the quadcopter. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2021;(1):38–43. (In Russ.)
4. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of general-purpose unmanned aerial vehicles and regulation of UAV air traffic in different countries. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information technologies and telecommunications*. 2016;4(4):13–23. (In Russ.)
5. Podrezov Yu.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles for monitoring emergency forest fire situations. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy = Problems of safety and emergency situations*. 2019;(3):64–72. (In Russ.)
6. Dzhuniper A. *Drony: kriterii vybora + osnovy upravleniya = bezopasnost': polnoe prakticheskoe rukovodstvo: per. s angl. V. Yatsenkova = Unmanned aerial vehicles: selection criteria + fundamentals of management = safety: a complete practical guide: translated from English by V. Yatsenkov*. Moscow: KoLibri, 2019:159. (In Russ.)

7. Gololobov V.N., Ul'yanov V.I. *Bespilotniki dlya lyuboznatel'nykh = Drones for the curious*. Saint Petersburg: NiT, 2018:249.
8. Yushchenko A.S., Lebedev K.R., Zabikhafar S.Kh. The control system of KK based on an adaptive neural network. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Baumana = Science and education. Bauman Moscow State Technical University*. 2017;(7):262–267. (In Russ.)
9. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter*. School of Science. Espoo, 2011:26.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Слепцов
доктор технических наук, профессор,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov
Doctor of technical sciences, professor,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Анна Евгеньевна Аблаева
старший преподаватель,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: ablaeva@gmail.com

Anna E. Ablaeva
Senior lecturer,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Динь Ба Фьонг
аспирант,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com

Dinh Ba Phuong
Postgraduate student,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 23.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 27.02.2022

УДК 681.518.3
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-3

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

О. Е. Безбородова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
oxana243@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для разработки способов и средств контроля состояния территориальной техносферы как динамической системы необходимо использование математического моделирования с целью исследования влияния и взаимодействия всех ее составляющих в различных режимах их функционирования. Также необходима достоверная измерительная информация о большом количестве контролируемых параметров. *Материалы и методы.* Предложена интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система контроля состояния территориальной техносферы. Базовым элементом этой системы, обеспечивающим минимизацию ошибки контроля, является интеллектуальный датчик, позволяющий проводить измерение, преобразование, самодиагностику и автоматическую коррекцию результатов измерений. Для обеспечения минимизации ошибки контроля предлагается в зоне предельных значений параметров использовать трансформирование чувствительности интеллектуального датчика на основе метода Монте-Карло. Предлагаются структурные схемы интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы и входящего в ее состав интеллектуального датчика и алгоритм трансформирования чувствительности интеллектуального датчика на основе метода Монте-Карло. *Результаты.* Авторами разработана схема для алгоритмической коррекции чувствительности интеллектуального датчика на основе метода Монте-Карло. Современные интеллектуальные датчики имеют многовариантную блочную структуру. Основными блоками являются первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент, сенсор), коммутатор, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, цифро-аналоговый преобразователь. *Вывод.* Предлагаемая интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система может оказать интеллектуальную поддержку при решении большого количества задач контроля и управления качеством территориальной техносферы, так как способна: обрабатывать и анализировать большой массив измерительной информации, проводить контроль состояния территориальной техносферы при ограниченной информации или неопределенности, распознавать аномальные состояния территориальной техносферы, адаптироваться, самообучаться в изменяющихся условиях и т.д.

Ключевые слова: интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система, территориальная техносфера, интеллектуальный датчик

Для цитирования: Безбородова О. Е. Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система контроля состояния территориальной техносферы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 21–28. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-3

INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM FOR CONTROL OF THE STATE OF THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE

O.E. Bezborodova

Penza State University, Penza, Russia
oxana243@yandex.ru

Abstract. *Background.* To develop methods and means of monitoring the state of the territorial technosphere as a dynamic system, it is necessary to use mathematical modeling in order to study the influence and interaction of all its components in various modes of their functioning. Reliable measurement information about a large number of controlled parameters is also required. *Materials and methods.* The article proposes an intelligent information-measuring and control system for monitoring the state of the territorial technosphere. The basic element of this system, which en-

sures the minimization of the control error, is an intelligent sensor that allows measurement, conversion, self-diagnosis and automatic correction of measurement results. To ensure the minimization of the control error, it is proposed to use the transformation of the sensitivity of an intelligent sensor based on the Monte Carlo method in the zone of limiting parameter values. Structural diagrams of an intelligent information-measuring and control system and an intelligent sensor included in it, and an algorithm for transforming the sensitivity of an intelligent sensor based on the Monte Carlo method are proposed. *Results.* The authors have developed a scheme for algorithmic correction of the sensitivity of an intelligent sensor based on the Monte Carlo method. Modern smart sensors have a multivariant block structure. The main blocks are the primary measuring transducer (sensing element, sensor), switch, analog-to-digital converter, microcontroller, digital-to-analog converter. *Conclusion.* The proposed intelligent information-measuring and control system can provide intellectual support in solving a large number of problems of monitoring and managing the quality of the territorial technosphere, as it is capable of: processing and analyzing a large array of measurement information, monitoring the state of the territorial technosphere with limited information or uncertainty, recognizing anomalous states territorial technosphere, adapt, self-learn in changing conditions, etc.

Keywords: intelligent information-measuring and control system, territorial technosphere, intelligent sensor

For citation: Bezborodova O.E. Intelligent information-measuring and control system for control of the state of the territorial technosphere. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):21–28. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-3

Постановка проблемы

Территориальная техносфера (ТТ) – это сложный динамический многопараметрический объект, включающий подсистемы естественного и искусственного происхождения: биосферу, социум и техногенику [1]. Параметры, характеризующие каждую подсистему, меняются во времени в зависимости от внешних и внутренних факторов и влияют на другие подсистемы и на всю ТТ в целом. Для разработки способов и средств контроля состояния ТТ как динамической системы необходимо использование математического моделирования с целью исследования влияния и взаимодействия всех ее составляющих в различных режимах их функционирования [2]. Также необходима достоверная измерительная информация о большом количестве контролируемых параметров (КП). По соображениям экономической целесообразности для контроля и управления состоянием ТТ выбираются наиболее значимые КП, изменяя которые можно управлять сразу несколькими параметрами. Для обеспечения минимизации ошибки контроля в зоне предельных значений КП предлагается использовать трансформирование чувствительности интеллектуального датчика на основе метода Монте-Карло (ММК).

Материалы и методы

Контролю качества ТТ сегодня уделяют большое внимание во всем мире, что свидетельствует об актуальности данной темы [3–8]. Под качеством ТТ авторы понимают состояние входящих в ее состав подсистем, характеризующееся физическими, химическими, биологическими и иными параметрами и (или) их совокупностью, отвечающее потребностям социума, обеспечивающее равновесие в биосфере и эффективное и безаварийное функционирование техногеники. По мнению авторов, для обеспечения контроля качества ТТ необходимо техническое решение, позволяющее в течение долгого времени проводить в автоматическом режиме измерения и обработку разнородных параметров ТТ. Особенно это актуально для проведения контроля качества объектов ТТ, расположенных в труднодоступных (опасных) районах (Арктика, агрессивная среда, комплексное воздействие на биосферу, социум и техногенику), когда важно обеспечить минимизацию ошибки контроля.

Согласно ГОСТу таким решением является интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система (ИнИИиУС), параметры и/или алгоритмы работы которой в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в ней преобразователей, и которая выполняет метрологический самоконтроль¹. ИнИИиУС автоматически проверяет свою метрологическую исправность в процессе эксплуатации посредством встроенных в нее технических и программных средств. Подсистема управления как

¹ ГОСТ Р 8.673-2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Интеллектуальные датчики и интеллектуальные измерительные системы. Основные термины и определения.

элемент ИнИИиУС обеспечивает сбор сведений о контролируемых подсистемах и содержит средства воздействия на их состояние.

Результаты и обсуждение

При эксплуатации ИнИИиУС выполняет управляющие, вычислительные и сервисные функции. Управляющие функции предполагают управление переключением каналов и диапазонов измерения, вычислительными ресурсами, регистраторами, внешней памятью, средствами общения с оператором. Вычислительные функции включают распределенную обработку данных, калибровку, масштабирование, фильтрацию, статистическую обработку и др. Сервисные функции предполагают обнаружение и локализация неисправностей. Структура ИнИИиУС представлена на рис. 1 [9].

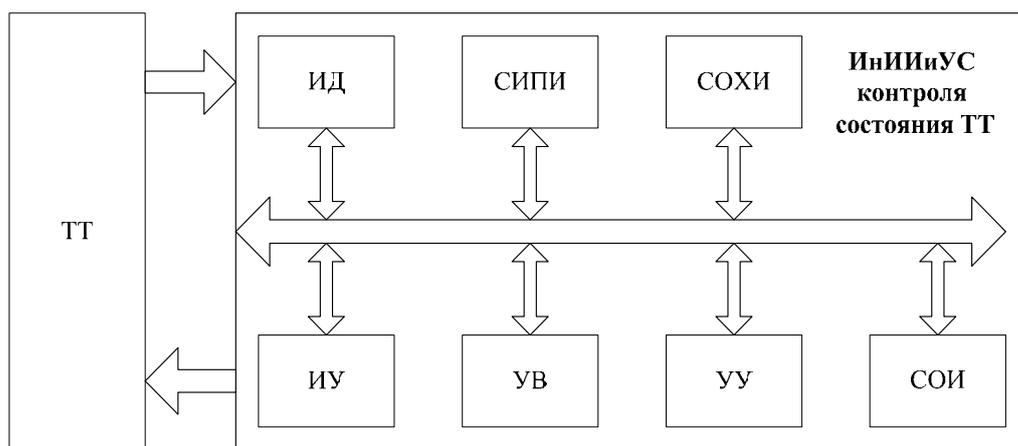


Рис. 1. Структура интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы: ИД – интеллектуальный датчик; СИПИ – структура измерения и преобразования информации; СОХИ – структура обработки и хранения информации; СОИ – структура отображения информации; УУ – устройства управления; УВ – устройство вывода; ИУ – исполнительное устройство

Принцип работы ИнИИиУС заключается в следующем: в систему встроена заранее построенная по экспериментальным данным динамическая модель ТТ, учитывающая все значимые КП, управляющие воздействия, зависимости выходных параметров (в том числе не измеряемых КП) от входных управляющих воздействий.

ИнИИиУС получает от сенсоров текущие значения КП и вводит их в модель, и вычисляет по модели значения ее выходных параметров, которые представляют собой прогноз поведения объекта. СОХИ по заданному критерию и с соблюдением ограничений рассчитываются управляющие воздействия на определенное число тактов управления; если рассчитанное управляющее воздействие не отличается от действующего на объекте, то коррекция не осуществляется. В противном случае управляющее воздействие корректирует состояние объекта и на следующем такте эти действия повторяются.

Для минимизации ошибки контроля состояния ТТ авторами предлагается использовать автоматическую коррекцию погрешностей измерения наиболее значимых КП.

Основной характеристикой измерительной системы является погрешность измерения КП. Погрешность измерения отображает величину расхождения между результатом измерения и реальным значением КП. Однако на практике величина погрешности часто не соответствует паспортным данным, а иногда и вовсе неизвестна. Более того, в процессе эксплуатации измерительной системы величина погрешности постоянно меняется. Причинами изменения погрешности могут стать изменение условий эксплуатации (внешние факторы), дрейф физических параметров системы (внутренние факторы), возмущения в каналах связи датчика с регистрирующей аппаратурой, его выход из строя датчика и т.д. В связи с этим разработка соответствующих алгоритмов коррекции погрешностей является актуальной задачей, причем очевидна необходимость построения адаптивных подходов, функционирующих в условиях неопределенности и изменчивости окружающей среды.

В соответствии с [10] при измерениях с необходимостью коррекции погрешности измеренную величину можно представить следующим образом:

$$\lambda_j^* = \lambda_j^* - \Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*, \quad (1)$$

где λ_j^* – результат измерения в j -м измерительном эксперименте; $\lambda_j^* = L\gamma_j$ – предварительный результат измерения КП с учетом погрешности измерительного канала; γ_j – входное воздействие (носитель информации об измеряемой величине), измененное внешним или внутренним воздействием L ; $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*$ – величина коррекции измеренной величины, определяемая по формуле

$$\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* = \Delta_{\text{кор}} \lambda_j^* + \delta_{\text{кор}} \lambda_j^*, \quad (2)$$

при $\Delta_{\text{кор}} \lambda_j^* = 0$ коррекция приводит к изменению полной погрешности $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*$ на величину $\delta_{\text{кор}} \lambda_j^*$. Это приводит к росту среднеквадратического отклонения погрешности, так как полная погрешность может быть определена как сумма корректируемой $\Delta_{\text{кор}} \lambda_j^*$ и некорректируемой $\Delta_{\text{нкор}} \lambda_j^*$ погрешностей по формуле

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{\text{кор}} \lambda_j^* + \Delta_{\text{нкор}} \lambda_j^*, \quad (3)$$

получаем значение погрешности без коррекции

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{\text{нкор}} \lambda_j^*,$$

с коррекцией

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{\text{нкор}} \lambda_j^* - \delta_{\text{кор}} \lambda_j^*.$$

Воспользовавшись предложенным в работе [10] представлением процедуры адаптивной коррекции погрешности $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* \leq \Delta_{\text{п}}$ ($\Delta_{\text{п}}$ – пороговый уровень $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*$, определяющий границу целесообразности применения коррекции), получаем $\lambda_j^* = L\gamma_j \vee \Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* > \Delta_{\text{п}}$ и $\lambda_j^* = R_{\text{кор}} L\gamma_j$.

В научной и справочной литературе предлагаются различные подходы к коррекции погрешностей измерений [10]. Наиболее эффективным, с нашей точки зрения, является подход, заключающийся в разработке алгоритмических методов коррекции по математической модели – концепция интеллектуального датчика (ИД)¹. ИД помимо функции измерения и преобразования параметра выполняет функции самодиагностики, защиты и блокировки, контроля состояния узлов исполнительного механизма и пр. Именно поэтому приборы, выполняющие новые дополнительные функции, принято называть интеллектуальными.

В настоящее время благодаря наличию однокристалльных микроконтроллеров с малым энергопотреблением, встроенными прецизионными аналого-цифровыми преобразователями и энергонезависимой памятью данных ведущие фирмы перешли от аналоговых методов коррекции погрешности к цифровым. ИД имеет цифровой выход и может обеспечивать передачу информации о метрологической исправности через интерфейс. При этом, обладая вычислительными возможностями, он позволяет осуществлять: автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия влияющих величин и/или старения компонентов, самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике, самообучение. ИД создают техническую основу для установления двух значений межповерочных (межкалибровочных) интервалов (при эксплуатации с использованием функции метрологического самоконтроля и без нее). Таким образом, постоянную коррекцию погрешности $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*$ осуществляет ИД.

¹ ГОСТ Р 8.673-2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Интеллектуальные датчики и интеллектуальные измерительные системы. Основные термины и определения.

Для автоматической коррекции погрешностей наиболее значимых КП предлагается в зоне предельных значений параметров использовать алгоритмическую коррекцию чувствительности ИД на основе ММК¹, заключающуюся в сравнении и коррекции измеренного значения КП в зависимости от соотношения величины погрешности $\Delta_{кор}^* \lambda_j^*$ и порогового уровня погрешности измерения $\Delta_{п}$, определяющего границу целесообразности применения коррекции.

Авторами разработана схема для алгоритмической коррекции чувствительности ИД на основе ММК, представленная на рис. 2.

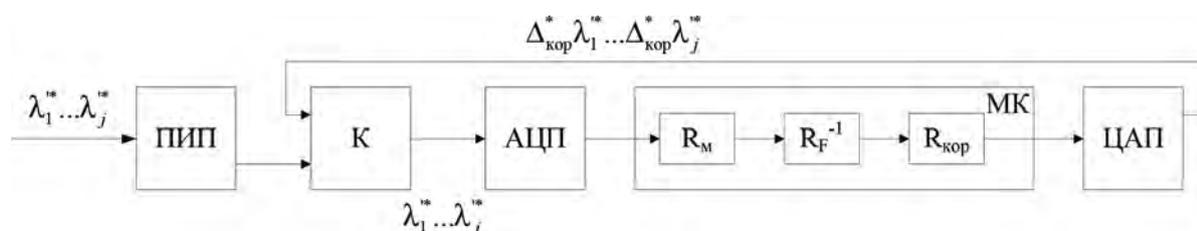


Рис. 2. Структурная схема интеллектуального датчика

Современные ИД имеют многовариантную блочную структуру. Основными блоками являются первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент, сенсор) (ПИП), коммутатор (К), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер (МК), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

Сигналы в аналоговой форме через коммутатор поступают от ПИП, преобразуются в цифровую форму вторичными преобразователями сигналов (АЦП). МК с помощью алгоритмов обработки данных на основе ММК, с использованием данных калибровки, данных для корректировки нелинейности, влияния дестабилизирующих факторов, старения, хранящихся в запоминающем устройстве, корректирует поступившие с ПИП значения измеряемой величины, приводит их к требуемым единицам измерения. МК компенсируется погрешность, обусловленная воздействием внешних и внутренних факторов. Кроме того, на него возлагается функция контроля состояния ПИП и оценка достоверности результатов измерений. Обработанный сигнал, несущий информацию об измеряемой величине, в цифровом виде передается для его регистрации и отображения или используется для управления. Кроме того, преобразуется в аналоговую форму и передается с использованием коммуникационных протоколов (IEEE 1451, RS-485, HART и т.п.) и промышленных сетей (Profibus, DeviceNet, Interbus, Fieldbus, CANbusLIN, Modbus и др.). С помощью интерфейса и коммуникационных протоколов реализуются функции калибровки ПИП, запроса и получения информации о его текущем состоянии и ИД в целом. Такие датчики удобно объединять в сеть, а доступ к предоставляемой ими информации возможен через программное обеспечение пользовательского уровня [11].

Коррекцию чувствительности выполняет МК на основе разработанного алгоритма (рис. 3), осуществляя сравнение погрешности измерения значения КП с граничным значением целесообразности применения коррекции в зоне предельных значений параметров и по результатам этого сравнения проводит масштабирование R_m , коррекцию нелинейности R_F^{-1} и характеристики преобразования $R_{кор}$ величины погрешности $\Delta_{кор}^* \lambda_j^*$.

Результатом выполнения данного алгоритма является решение о необходимости коррекции погрешности в зоне предельных значений КП.

На международном уровне требования к ИД сформулированы в серии стандартов IEEE 1451.2-1997, IEEE 1451.1-1999, IEEE 1451.3-2003, IEEE 1451.4-2004.

¹ ISO/IEC Guide 98-3:2008/Supplement 1:2008 «Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte-Carlo method».

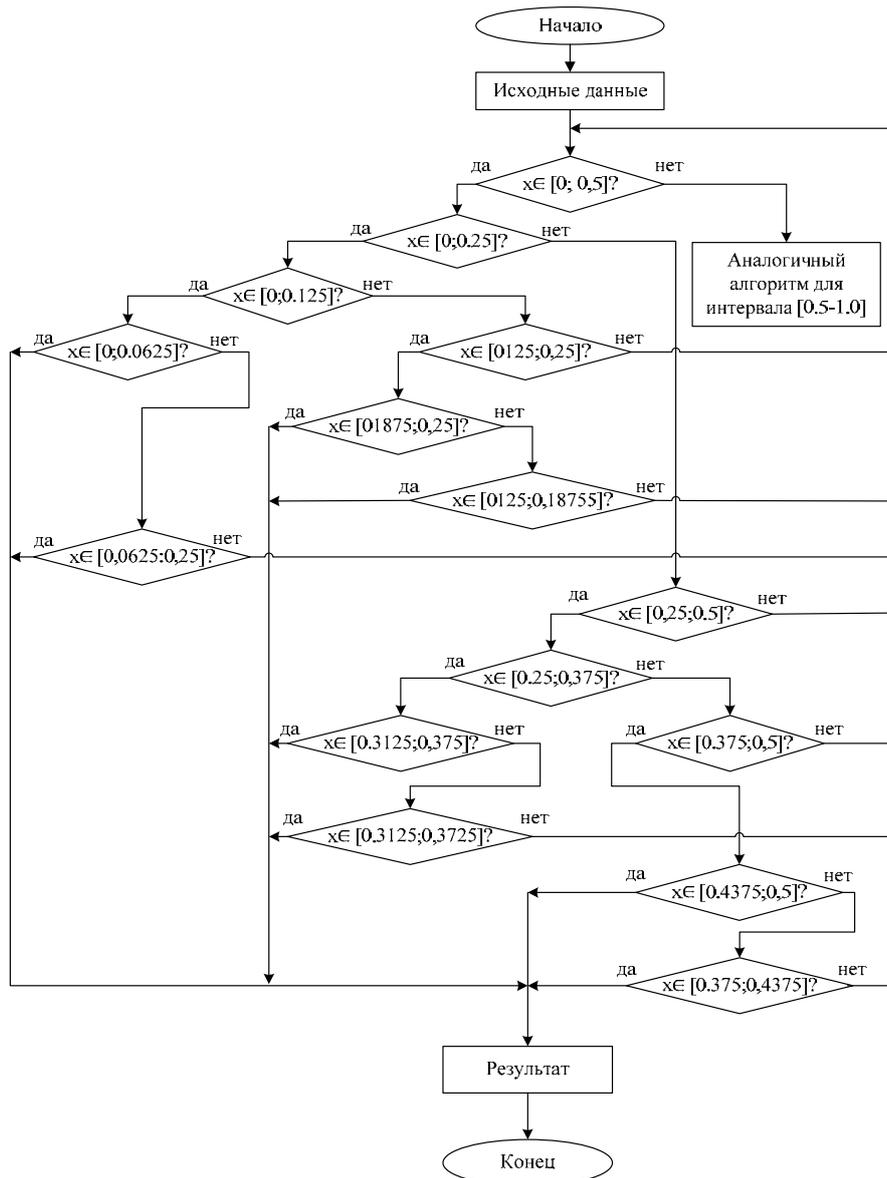


Рис. 3. Алгоритм реализации метода Монте-Карло для интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы

Среди промышленных средств автоматизации получили применение ИД [9]:

- температуры серии STT 3000 включают датчики STT-170, STT-250, STT-350, в которых реализованы следующие дополнительные к основным функции: возможности программирования и настройки с МК; использование обширной библиотеки НСХ датчиков температуры и интерфейсов промышленных шин FF, HART; дистанционная диагностика и обмен данными с удаленными устройствами; дистанционная настройка рабочего диапазона;
- для измерения pH/ORP выполняют следующие функции: автоматическая калибровка по буферному раствору; компенсация температуры раствора; автоматическая очистка электродов;
- для концентрации выполняет следующие функции: термокомпенсация показаний; расчет концентрации углекислого газа и преобразование концентрации в различные единицы измерения; расчет pH по дифференциальной проводимости;
- газоанализатор серии 7866 компании Honeywell осуществляет дистанционную передачу показаний на расстояние до 300 м, формирует аварийные сигналы и связь по шине Modbus для настройки и сбора данных;
- плотности серии DT300 компании Smar снабжен системами автокалибровки, автодиагностики и конфигурирования по сетям FF и Profibus PP.

Заключение и выводы

Предлагаемая ИнИИиУС осуществляет обработку количественных данных методами экспертных систем, к числу которых относятся методы усовершенствованного управления (Advanced Process Control – APC) [9]. Интеллектуальным средством автоматизации в составе ИнИИиУС являются ИД: первичные преобразователи температуры, давления, уровня, анализаторы концентрации, рН/ORP, электропроводности, исполнительные механизмы и другие полевые устройства.

За счет совместного использования APC и ИД предлагаемая ИнИИиУС может оказать интеллектуальную поддержку при решении большого количества задач контроля и управления качеством ТТ, так как способна:

- обрабатывать и анализировать большой массив измерительной информации;
- проводить контроль состояния ТТ при ограниченной информации или неопределенности;
- распознавать аномальные состояния ТТ;
- адаптироваться, самообучаться в изменяющихся условиях и т.д.

Список литературы

1. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. doi:10.1109/fareastcon.2018.8602540
2. Bezborodova O., Bodin O., Polosin V. Territorial Technosphere as Managed Dynamic System // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 451. P. 012189. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012189
3. Yurtseven H., Akgul M., Akay A. O. [et al.]. Monitoring system of high accuracy for the assessment of the degradation of the surface of forest roads on horizontal curves // *Environ Monitoring and Assess.* 2019. Vol. 191. P. 32. doi:10.1007/s10661-018-7155-8
4. Liu X., Xiong L., Li D. [et al.]. Monitoring and assessment of exposure to organophosphorus flame retardants in source and drinking water // *Nanjing, China Environ Monitoring and Assess.* 2019. Vol. 191. P. 119. doi:10.1007/s10661-019-7239-0
5. Rivas-Ubach A., Liu Y., Steiner A. L. [et al.]. Atmo-ecometabolomics: a new methodology for determining the chemical characteristics of atmospheric particles for environmental studies // *Environ Monitoring and Assess.* 2019. Vol. 191. P. 78. doi:10.1007/s10661-019-7205-x
6. Castle G. D., Mills G. A., Gravell A. [et al.]. Comparison of different monitoring methods for measuring metaldehyde in surface waters // *Environ Monitoring and Assess.* 2019. Vol. 191. P. 75. doi:10.1007/s10661-019-7221-x
7. Fehrmann L., Kukunda C. B., Nölke N. [et al.]. Unified land cover monitoring system based on discrete global sampling system (GSG) // *Environ Monitoring and Assess.* 2019. Vol. 191. P. 46. doi:10.1007/s10661-018-7152-y
8. Bezborodova O. [et al.] Current Problems of Radiation-Ecological Monitoring in Penza Region // *International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018)*. 2018. doi:10.2991/isees-18.2018.13
9. Харазов В. Г. Интеллектуальные устройства и системы управления. II. Информационная система. Системы автоматизации и управления // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2014. № 26 С. 92–94. doi:10.15217/issn19984-9.2014.26.92
10. Цветков Е. И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. Дополнительная глава. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 144 с.
11. Broring A. New Generation Sensor Web Enablement // *Sensors*. 2011. № 11. P. 2652–2699.

References

1. Bezborodova O.E., Bodin O.N., Polosin V.G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. doi:10.1109/fareastcon.2018.8602540
2. Bezborodova O., Bodin O., Polosin V. Territorial Technosphere as Managed Dynamic System. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;451:012189. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012189
3. Yurtseven H., Akgul M., Akay A.O. [et al.]. Monitoring system of high accuracy for the assessment of the degradation of the surface of forest roads on horizontal curves. *Environ Monitoring and Assess.* 2019;191:32. doi:10.1007/s10661-018-7155-8

4. Liu X., Xiong L., Li D. [et al.]. Monitoring and assessment of exposure to organophosphorus flame retardants in source and drinking water. *Nanjing, China Environ Monitoring and Assess.* 2019;191:119. doi:10.1007/s10661-019-7239-0
5. Rivas-Ubach A., Liu Y., Steiner A.L. [et al.]. Atmo-ecometabolomics: a new methodology for determining the chemical characteristics of atmospheric particles for environmental studies. *Environ Monitoring and Assess.* 2019;191:78. doi:10.1007/s10661-019-7205-x
6. Castle G.D., Mills G.A., Gravell A. [et al.]. Comparison of different monitoring methods for measuring metaldehyde in surface waters. *Environ Monitoring and Assess.* 2019;191:75. doi:10.1007/s10661-019-7221-x
7. Fehrmann L., Kukunda C.B., Nölke N. [et al.]. Unified land cover monitoring system based on discrete global sampling system (GSG). *Environ Monitoring and Assess.* 2019;191:46. doi:10.1007/s10661-018-7152-y
8. Bezborodova O. [et al.]. Current Problems of Radiation-Ecological Monitoring in Penza Region. *International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018)*. 2018. doi:10.2991/isees-18.2018.13
9. Kharazov V.G. Intelligent devices and control systems. II. Information system. Automation and control systems. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2014;(26):92–94. (In Russ.). doi:10.15217/issn19984-9.2014.26.92
10. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez. Dopolnitelnaya glava = Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis. Additional chapter*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2016:144. (In Russ.)
11. Broring A. New Generation Sensor Web Enablement. *Sensors*. 2011;(11):2652–2699.

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oxana243@yandex.ru

Oksana E. Bezborodova

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2022

Принята к публикации/Accepted 8.05.2022

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

О. Е. Безбородова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
oxana243@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение эффективности сбора и обработки данных необходимо для обеспечения гарантированной безотказной работы информационно-измерительных и управляющих систем. В данном случае речь идет об автоматизации процессов сбора и обработки данных, о максимально надежном хранении данных, о гарантированном постоянном доступе к ним и о возможности быстрой адаптации информационно-измерительных и управляющих систем к изменяющимся требованиям внешней среды. *Материалы и методы.* Рассмотрено решение задачи обеспечения эффективности работы синергетических информационно-измерительных и управляющих систем. Разработана структурная схема синергетической информационно-измерительной и управляющей системы на основе мультиагентных технологий и приведена декомпозиция целей. Для гетерогенной группы беспилотных воздушных судов, участвующей в поисково-спасательных работах в зоне чрезвычайной ситуации, предложены алгоритмы управления, основанные на использовании синергетического эффекта. Показано, что синергетический эффект заключается в совместном взаимодействии разноплановых беспилотных воздушных судов гетерогенной группы. Приведены расчеты и построены графы, иллюстрирующие работу гетерогенной группы беспилотных воздушных судов в нормальном режиме и при выходе из строя одного из беспилотных воздушных судов. Доказано, что за счет синергетического эффекта группа способна выполнить поставленную задачу. *Результаты.* Использование синергетического подхода в информационно-измерительных и управляющих системах на основе интеллектуального взаимодействия агентов мультиагентной системы позволяет сохранить эффективность проведения поисковых спасательных работ при выходе из строя беспилотного воздушного судна за счет нелинейной составляющей эффективности, возникающей из-за синергетического эффекта в системе. *Выводы.* Структурно-функциональная модель предложенной синергетической информационно-измерительной и управляющей системы характеризуется набором структурных элементов и их функциональным назначением, присущим большинству современных информационно-измерительных и управляющих систем, что делает ее инвариантной относительно области применения. Использование предлагаемой синергетической информационно-измерительной и управляющей системы для управления беспилотным воздушным судном в условиях чрезвычайной ситуации позволяет оптимизировать ресурсы за счет синергетического эффекта и достичь поставленной цели даже при выходе агента из строя, так как является восстанавливаемой и сохраняющей работоспособность при выходе из строя агента.

Ключевые слова: интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система, мультиагентная система, чрезвычайная ситуация, беспилотное воздушное судно

Для цитирования: Безбородова О. Е. Иерархическая структура мультиагентной системы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 29–38. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-4

HIERARCHICAL STRUCTURE OF A MULTI-AGENT SYSTEM

O.E. Bezborodova

Penza State University, Penza, Russia
oxana243@yandex.ru

Abstract. *Background.* Improving the efficiency of data collection and processing is necessary to ensure guaranteed trouble-free operation of information-measuring and control systems. In this case, we are talking about the automation of data collection and processing processes, the most reliable data storage, guaranteed constant access to them, and the ability to quickly adapt information-measuring and control systems to changing environmental requirements. *Materials and methods.* The article considers the solution to the problem of ensuring the efficiency of synergetic information-measuring and control systems. A block diagram of a synergetic information-measuring and control system based on multi-agent technologies has been developed and a decomposition of goals has been given. For a heterogeneous group

of unmanned aerial vehicles involved in search and rescue operations in an emergency zone, control algorithms based on the use of a synergistic effect are proposed. It is shown that the synergistic effect lies in the joint interaction of diverse unmanned aerial vehicles of a heterogeneous group. Calculations are given and graphs are constructed illustrating the operation of a heterogeneous group of unmanned aircraft in normal mode and when one of the unmanned aircraft fails. It is proved that due to the synergistic effect, the group is able to complete the task. *Results.* The use of a synergistic approach in information-measuring and control systems based on the intelligent interaction of agents of a multi-agent system makes it possible to maintain the efficiency of search and rescue operations in the event of an unmanned aircraft failure due to the non-linear component of efficiency arising from the synergistic effect in the system. *Conclusions.* The structural-functional model of the proposed synergistic information-measuring and control system is characterized by a set of structural elements and their functional purpose inherent in most modern information-measuring and control systems, which makes it invariant with respect to the field of application. The use of the proposed synergistic information-measuring and control system for controlling an unmanned aerial vehicle in an emergency allows you to optimize resources due to the synergistic effect and achieve your goal even if the agent fails, as it is recoverable and remains operational when the agent fails.

Keywords: intelligent information-measuring and control system, multi-agent system, emergency, unmanned aerial vehicle

For citation: Bezborodova O.E. Hierarchical structure of a multi-agent system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):29–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-4

Постановка проблемы

Повышение эффективности сбора и обработки данных необходимо для обеспечения гарантированной безотказной работы информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС). В данном случае речь идет об автоматизации процессов сбора и обработки данных, о максимально надежном хранении данных, о гарантированном постоянном доступе к ним и о возможности быстрой адаптации ИИУС к изменяющимся требованиям внешней среды.

В последние годы наблюдается рост интереса к междисциплинарному направлению – синергетике. Синергетические подходы и модели нашли широкое применение не только в философии, но и во многих отраслях науки: технике, социологии, педагогике, филологии и др. Основоположниками в этой предметной области являются Г. Хакен [1], И. Р. Пригожин [2], С. П. Курдюмов [3], Д. С. Чернавский [4], А. А. Самарский [5] и др.

Общим недостатком приведенных в специализированной литературе синергетических систем, посвященных решению задач управления процессами и объектами, является отсутствие описания технической реализации: описание алгоритмов функционирования приведено только на концептуальном уровне.

Синергетический подход к созданию систем управления строится на системных принципах, базовыми из которых являются взаимодействие и взаимозависимость системы и внешней среды, иерархичность структуры системы, целенаправленность деятельности, адаптивность к условиям внешней среды, самоорганизация, приоритет общих интересов системы, надежность.

Согласно свойству эмерджентности, совместное действие нескольких факторов почти всегда отличается от суммы отдельных эффектов. Именно это отличие, которое обычно называют эффектом синергии, фактором взаимодействия или кооперативным эффектом, является количественным выражением синергии.

Синергетический подход к проектированию систем управления заключается в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов (Ψ_s), к которым подстраиваются все другие параметры системы (x_n). Это – целевой способ самоорганизации синергетических управляющих систем. При таком подходе цель – аттрактор $\Psi_s(x_1, \dots, x_n) = 0$ – определяет сущность процесса управления, а его содержание заключается в самоуправлении и направленной самоорганизации в соответствии с заданной целью [6].

Все это характеризует синергетическую систему как интеллектуальную, частным случаем которой является мультиагентная система, состоящая из интеллектуальных агентов различного происхождения (программных, аппаратных, биологических). По данным исследователей [7–9] практическая реализация синергетических подходов при создании специали-

рованных систем управления процессами и объектами многократно повышает эффективность их функционирования.

Другим, основополагающим принципом построения ИИУС является иерархический принцип, согласно которому иерархическая структура создает относительную свободу действий над отдельными элементами для каждого уровня системы и возможность различных сочетаний локальных критериев оптимальности с глобальным критерием оптимальности функционирования системы в целом; обеспечивает относительную гибкость системы управления и возможность приспосабливаться к изменяющимся условиям; повышает надежность за счет возможности введения элементной избыточности, упорядочения направлений потоков информации. Главной задачей стратегического уровня иерархии является обеспечение гарантированной безотказной работы ИИУС, консолидация вычислительных мощностей и систем хранения. На тактическом уровне иерархии ИИУС осуществляется автоматизация процессов сбора и обработки информации, максимально надежное хранение данных, гарантированный постоянный доступ к ним. На этом уровне организации ИИУС можно модернизировать структуру, добавляя вычислительные ресурсы и увеличивая объем памяти под хранение данных, что означает возможность быстрой адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды. На оперативном уровне иерархии ИИУС осуществляется реализация функций ИИУС.

Материалы и методы

Техногенные объекты (ТО) – это сложные системы, состоящие из большого количества подсистем (агентов), которые работают при изменяющихся внутренних и внешних условиях, адекватно реагируя на эти изменения. Поэтому безаварийное функционирование ТО не может быть обеспечено без участия ИИУС. Сбои в процессе управления и контроля ТО ведут к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС). Параметрами эффективности ИИУС являются их надежность (безаварийность функционирования) и возможность быстрой адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды, а в случае ЧС – время и ресурсы, необходимые на восстановление работоспособности контролируемого ТО.

Для обеспечения необходимых параметров эффективности ИИУС должна быть построена таким образом, чтобы агенты (подсистемы) развивались самостоятельно, обеспечивая эффективность функционирования ИИУС по целевым параметрам. Такое поведение, когда одновременное эволюционное развитие нескольких агентов приводит к перестройке всей системы принятия решений в ИИУС, можно отнести к категории синергетических эффектов. Поэтому для обеспечения техносферной безопасности необходимы синергетические ИИУС, состоящие из большого числа агентов, находящихся в согласованном взаимодействии, определяющем поведение и свойства системы в целом [1].

В ИИУС различают вычислительные, информационные, интеллектуальные ресурсы и ресурсы времени. При построении и анализе ИИУС в основном оперируют вычислительными и временными ресурсами, но это не значит, что другие виды ресурсов, например, материально-технические, для решения конкретной задачи игнорируются.

Как следует из функционального назначения ИИУС, ее основной задачей является оптимальная организация информационного взаимодействия для обеспечения выполнения поставленных задач.

Под оптимизацией понимается процесс нахождения экстремумов (глобального максимума или минимума), которые могут быть оценены как лучшие значения (показатели) определенной целевой функции или выбор наилучшего (оптимального) варианта из множества возможных.

Оптимизация ресурсов может осуществляться на разных уровнях иерархии ИИУС. Одновременно должен быть выполнен принцип глобальной оптимизации, т.е. локальные критерии оптимизации и принимаемые на их основе решения не должны противоречить глобальному оптимуму ИИУС в целом.

При этом у любой ИИУС ресурсы для достижения стратегических, тактических или оперативных целей ограничены. Поэтому задача оптимизации ресурсов в ИИУС может быть сформулирована двояко:

1. При ограниченных ресурсах добиться глобального максимума векторной целевой функции ИИУС, т.е. надо хранить больше данных в выделенном пространстве, быстрее производить вычисления, не потребляя и не выделяя слишком много энергии, передавать больше

информации по имеющимся каналам связи, обеспечивать максимальную степень готовности эксплуатируемых подсистем.

2. При запланированных значениях показателей ИИУС добиться совокупного минимума используемых ресурсов.

Сказанное говорит о важности разработки методов и средств повышения эффективности функционирования ИИУС при решении задач управления процессами и объектами.

Целью работы является разработка структуры и алгоритма ИИУС, обеспечивающих оптимальное функционирование на основе синергетического подхода и иерархического принципа построения мультиагентной ИИУС.

Результаты и обсуждение

Синергизм ИИУС проявляется в усилении свойств системы (эффективности E) при объединении отдельных агентов, что выражается общей формулой [10]:

$$E_{1+\dots+N} > E_1 + \dots + E_N, \quad (1)$$

где N – количество агентов, объединенных в систему.

Синергетическую эффективность процесса объединения логично определить как системную эффективность. Тогда эта эффективность характеризует общую эффективность нелинейного взаимодействия агентов, входящих в состав системы. Следовательно, синергетическая эффективность – это способ учета общей эффективности системы, складывающийся из нескольких видов эффективности, когда ее невозможно определить простым суммированием эффективностей отдельных агентов системы.

Эффективность синергетической системы можно представить в виде двух составляющих «линейной эффективности» и «нелинейной эффективности». «Линейная эффективность» создается простым суммированием эффективностей отдельных агентов в составе синергетической ИИУС, а «нелинейная эффективность» формируется за счет появления у системы свойств и параметров не характерных для отдельных агентов (эмерджентность). Синергетическую эффективность E_s можно записать как

$$E_s = E_L + E_N, \quad (2)$$

где E_L – линейная составляющая эффективности; E_N – нелинейная составляющая эффективности.

Синергетическая эффективность является характеристикой работоспособности системы, надежности ее функционирования в границах диапазона базовых параметров (время и ресурсы) для конкретной системы [10].

Основой синергетической ИИУС является иерархическая мультиагентная система (МАС), функционирование которой направлено на обеспечение работоспособности ИИУС в нормальных и чрезвычайных условиях [11]. Это достигается гибкой согласованной корректировкой функционирования системы в ответ на изменения в окружающей ее среде в зависимости от возникающих событий (самоорганизация). В результате с помощью МАС параллельно осуществляются процессы сбора данных, анализа, планирования, оптимизации, мониторинга и контроля состояния ТО в режиме реального времени, что обеспечивает повышение безопасности его функционирования.

Основным проявлением самоорганизации синергетической ИИУС служит реконфигурирование структуры МАС и усложнение системы через флуктуации (случайные отклонения в режиме нормального функционирования ИИУС или выхода из строя отдельных агентов) состояний ее агентов. Такие флуктуации подавляются за счет отрицательных обратных связей, обеспечивающих сохранение структуры, работоспособности и близкого к равновесному состоянию системы. Но в более сложных ИИУС отклонения со временем возрастают, накапливаются и приводят либо к разрушению прежней структуры, либо к возникновению новой (включение дублирующих линий и элементов, клонирования и образования коалиций агентов).

Самоорганизация, результатом которой является реконфигурирование системы, может произойти лишь в системах высокого уровня сложности, обладающих определенным количеством взаимодействующих между собой агентов, имеющих некоторые критические параметры связи и относительно высокие значения вероятностей своих флуктуаций. В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия будут недостаточны для появления кол-

лективного поведения агентов и тем самым возникновения самоорганизации. Недостаточно сложные ИИУС не способны к спонтанной адаптации и к развитию и при чрезмерных воздействиях извне теряют свою структуру и необратимо разрушаются.

Самоорганизация ИИУС происходит только при преобладании положительных обратных связей над отрицательными. Функционирование МАС основывается на получении обратных сигналов от датчиков, несущих информацию о состоянии ТО (окружающей ИИУС среды) и последующей корректировке параметров функционирования ТО за счет действия исполнительных механизмов (система поддержки принятия решения (СППР)). В самоорганизующейся ИИУС такие изменения не устраняются, а накапливаются и усиливаются вследствие интеллектуальности входящих в состав системы агентов, что приводит к возникновению нового порядка и реконфигурированию ИИУС, образованной из элементов прежней, измененной системы.

Этот процесс осуществляется путем клонирования агентов и образования ими коалиций в составе МАС. Если от ТО через датчики поступают данные, свидетельствующие о невозможности системой достичь поставленной цели (обеспечение нормального функционирования ТО), то МАС после анализа ситуации, без внешнего вмешательства, дает команду на реконфигурирование структуры либо за счет клонирования агентов, либо перераспределения обязанностей между агентами в составе коалиции однофункциональных агентов. Выбор варианта самоорганизации системы зависит от критичности параметров функционирования ИИУС и ТО. Если нужно действовать быстро (критичный параметр время), то может быть задействовано большее количество ресурсов (агентов). Но если критическими параметрами являются и время, и ресурсы, то за счет синергизма ИИУС и наличия нелинейной эффективности (см. формулу (2)), возможно достичь цели без привлечения дополнительных ресурсов и в срок за счет перераспределения обязанностей между однофункциональными агентами [12].

Основополагающими принципами самоорганизации синергетической ИИУС являются простота информационного взаимодействия агентов МАС и возможность оперативного реконфигурирования структуры ИИУС.

Синергетическая ИИУС строится по стандартной схеме, в состав которой входят центр контроля и управления объектами, датчики и исполнительные механизмы (рис. 1). Более того, синергетическая ИИУС может быть многофункциональной, осуществлять контроль и управление различными по природе объектами. Но алгоритм достижения целей всегда один и тот же. МАС, работая на достижение поставленной цели, разбивает цель на задачи, осуществляет прогноз результата решения каждой задачи, составляет план решения каждой задачи, оценивает возможности каждого агента для решения задачи и распределяет их (рис. 2). Результаты решения отдельных задач интегрируются в результат достижения цели, на основе чего отдается команда исполнительным механизмам на изменение внешней (окружающей) среды.



Рис. 1. Структурно-функциональная модель синергетической ИИУС

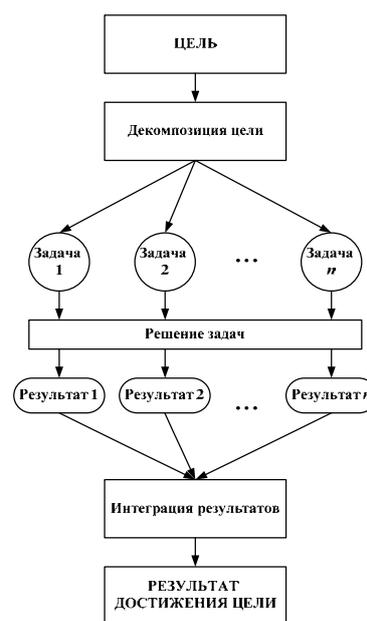


Рис. 2. Декомпозиция цели МАС синергетической ИИУС

Рассмотрим проявление синергетической эффективности ИИУС на примере работы гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (БВС) в зоне ЧС. В соответствии с работой [13] в зону ЧС при проведении поисково-спасательных работ (ПСР) отправляют гетерогенную группу БВС, входящую в состав подсистемы чрезвычайного (экстренного) реагирования. Способ проведения ПСР заключается в реализации всех этапов проведения ПСР: разведка зоны ЧС, поиск пострадавших и определение их места нахождения, минимизация уровней воздействия поражающих факторов (ПФ) ЧС, оказание пострадавшим медицинской помощи, эвакуация транспортабельных пострадавших. Все эти этапы реализуют с использованием специально оборудованной гетерогенной группы БВС, причем БВС каждой специализации может быть несколько. Гетерогенная группа БВС включена в состав подсистемы чрезвычайного (экстренного) реагирования с целью минимизации времени на обнаружение пострадавших, экстренного оказания им медицинской помощи, а также оперативной эвакуации, обнаружения и минимизации источников поражающих факторов ЧС.

Алгоритм работы (рис. 3) гетерогенной группы БВС включает этапы сбора и обработки данных, а также реализации на их основе действий, изменяющих внешнюю среду. Эти действия осуществляются синергетической ИИУС на основе интеллектуального взаимодействия агентов (в данном случае БВС) МАС, обеспечивающего при отказе одного БВС сохранение работоспособности всей гетерогенной группы [12]. Действительно, структурный расчет надежности показывает, что при отказе одного из N БВС не произойдет потеря работоспособности всей гетерогенной группы. Система переходит в более напряженный режим работы, в котором, обладая меньшими ресурсами, она выполняет заданные функции. При этом, безусловно, снижается производительность и эффективность решения задачи.



Рис. 3. Алгоритм работы синергетической ИИУС

В случае отсутствия режима «Стоп» перераспределения обязанностей БВС не осуществляется, и ПСР проходят по заранее определенному плану работы. В случае наличия режима «Стоп» анализатор ресурсов синергетической ИИУС по алгоритму, приведенному на рис. 4, осуществляет перераспределения обязанностей БВС.



Рис. 4. Алгоритм работы анализатора ресурсов синергетической ИИУС

Синергетическая ИИУС работает следующим образом: сначала агент 1-го уровня иерархии анализирует поставленную цель, в том числе и по параметрам «ресурсы – время», и распределяет ее решение на ряд параллельных задач для обеспечения децентрализации управления и сокращения времени проведения ПСР. Соответственно, по результатам анализа исходной цели агентом 2-го уровня иерархии осуществляется коммутация ресурсов ИИУС (распределение задач агентам 3-го уровня). Такая организация работы ИИУС обеспечивает максимально возможную загрузку БВС исходя из особенностей алгоритма решаемой каждой задачи и аппаратных ограничений каждого БВС. Все БВС, входящие в состав гетерогенной группы, работают параллельно и независимо друг от друга, в соответствии с задачами, но обмениваются собранными данными, что сокращает время решения поставленных задач перед каждым из них. Работу анализатора ресурсов можно рассмотреть на примере реализации формулы

$$(c_1, c_2) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 – синергетическая эффективность системы с учетом анализируемых параметров «ресурсы – время»; a_{ij} – агенты системы, для которых определяющим является i -й параметр; b_i – агенты системы, для которых определяющим является $i+1$ -й параметр.

В выражении (3) значения (c_1, c_2) количественно характеризуют ресурсы системы необходимые для достижения цели. Покажем изменение времени функционирования ИИУС при выполнении задания в случае работоспособных БВС и в случае выхода из строя одного из БВС.

Допустим, что гетерогенная группа БВС состоит из шести агентов $A := \{a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2\}$. Для четырех БВС определяющим является i -й параметр, для остальных – $i+1$ -й. Тогда реализация формулы (3) в случае всех работоспособных БВС происходит, как показано

на рис. 5. В табл. 1 представлена работа агентов (БВС) по тактам в нормальном режиме. Анализатор ресурсов в этом случае осуществляет контроль работы гетерогенной группы БВС путем проверки на наличие режима «Стоп».

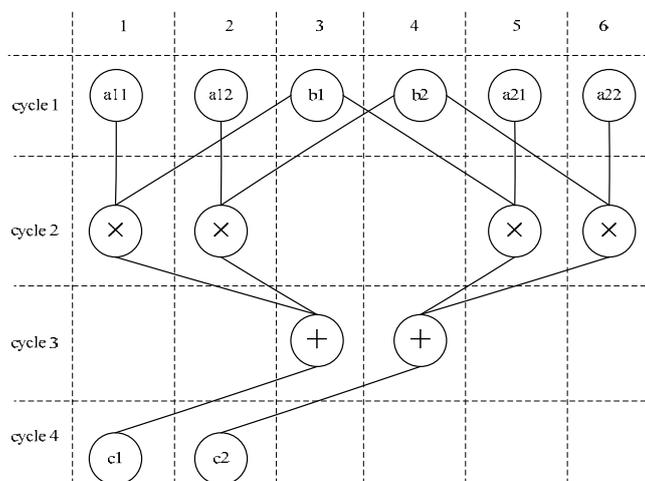


Рис. 5. Граф проведения ПСР при работоспособных БВС

Таблица 1

Работа агентов по тактам в нормальном режиме

Такты	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	чт a11	чт a12	чт b1	чт b2	чт a21	чт a22
2	1×3	2×4			3×5	4×6
3			1+2	5+6		
4	зп c1	зп c2				

П р и м е ч а н и я: чт – чтение данных; зп – запись данных.

При выходе из строя одного из БВС анализатор ресурсов осуществляет восстановительные процедуры в соответствии с вышеописанным алгоритмом. Например, пятый БВС в гетерогенной группе вышел из строя, тогда реализация формулы (3) будет выглядеть по-другому, так, как представлена на рис. 6. В табл. 2 представлена работа агентов (БВС) по тактам с неработоспособным агентом.

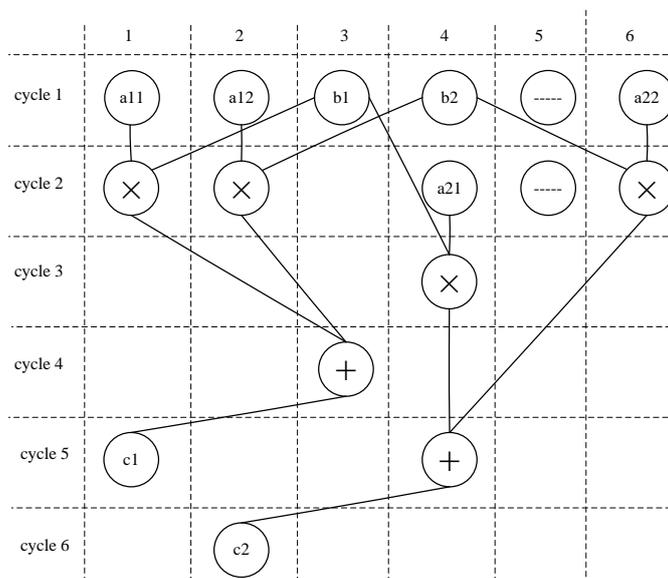


Рис. 6. Граф проведения ПСР при неработоспособном БВС

Таблица 2

Работа агентов по тактам с неработоспособным агентом

Такты	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	чт a11	чт a12	чт b1	чт b2	–	чт a22
2	1×3	2×4		чт a21	–	4×6
3				3×4	–	
4			1+2		–	
5	зп с1			4+6	–	
6		зп с2			–	

П р и м е ч а н и я: чт – чтение данных; зп – запись данных.

Как следует из рассмотрения рис. 6, «работу» пятого БВС берет на себя четвертый БВС. Работа всей гетерогенной группы продолжается, несмотря на выход из строя одного из БВС.

Таким образом, использование синергетического подхода в ИИУС на основе интеллектуального взаимодействия агентов МАС позволяет сохранить эффективность проведения ПСР при выходе из строя БВС за счет нелинейной составляющей эффективности, возникающей из-за синергетического эффекта в системе.

Заключение и выводы

Таким образом, структурно-функциональная модель предложенной синергетической ИИУС характеризуется набором структурных элементов и их функциональным назначением, присущим большинству современных ИИУС, что делает ее инвариантной относительно области применения. Использование предлагаемой синергетической ИИУС для управления БВС в условиях ЧС позволяет оптимизировать ресурсы за счет синергетического эффекта и достичь поставленную цель даже при выходе агента из строя, так как является восстанавливаемой и сохраняющей работоспособность при выходе из строя агента (БВС).

Список литературы

1. Khaken G. The hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices. Moscow : Mir Publ., 1985.
2. Nikolis G., Prigozhin I. Self-organization in nonequilibrium systems. Moscow : Mir Publ., 1979.
3. Kniازهva E. N., Kurdiymov S. P. Foundation of synergetics. Synergetic world-view. Moscow : KomKniga Publ., 2010.
4. Chernavskii D. S. Synergetics and information: Dynamic information theory. Moscow : URSS Publ., 2004.
5. Samarskii A. A., Mikhailov A. P. Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples. URL: www.twirpx.com/file/20242/
6. Колесников А. А. Синергетические системы // Программные продукты и системы. 2002. № 1. С. 3–6.
7. Манова М. В., Ширина Е. В. Синергетическая система управления интеллектуальной собственностью // Балтийский гуманитарный журнал. 2015. № 2. С. 150–153.
8. Решетников И. С. Синергетическая модель построения многомодульной информационно-управляющей системы // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 3. С. 264–267.
9. Лебедев В. И., Лебедева И. В., Шуваев А. В. Синергетические модели социально-экономических систем // Fundamental research. 2018. № 11. С. 256–260.
10. Sukharev O. S. The theory of effectiveness of economy : monograph. 2nd ed., cor. Moscow : INFRA-M, 2014. 367 p. URL: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost
11. Bezborodova O., Gromkov N., Bodin O. [et al.]. Multi-agent Technologies for Comprehensive Monitoring of the State of Territorial Technosphere // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro. 2019. P. 1–4. doi:10.1109/MECO.2019.8760064
12. Пат. 2292075 РФ. Синергетическая вычислительная система / Бодин О. Н., Логинов Д. С., Тернопольский К. А. ; № 2005119236/09 ; заявл. 21.06.2005 ; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 2. 20 с.
13. Patent 2694528 Russian Federation, Int. Cl. A62B 99/00 (2009.01). Search and rescue method / Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E., Rakhmatullov F. K., Gerasimov A. I., Ozhikenov K. A., Bayanbaj N., Berdibaeva G. K. ; № 2018139491 : Date of filing 07.11.2018 : Date of publication 16.07.2019. 31 p.

References

1. Khaken G. *The hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices*. Moscow: Mir Publ., 1985.
2. Nikolis G., Prigozhin I. *Self-organization in nonequilibrium systems*. Moscow: Mir Publ., 1979.
3. Kniazeva E.N., Kurdiunov S.P. *Foundation of synergetics. Synergetic world-view*. Moscow: KomKniga Publ., 2010.
4. Chernavskii D.S. *Synergetics and information: Dynamic information theory*. Moscow: URSS Publ., 2004.
5. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples*. Available at: www.twirpx.com/file/20242/
6. Kolesnikov A.A. Synergetic systems. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2002;(1):3–6. (In Russ.)
7. Manova M.V., Shirina E.V. Synergetic system of intellectual property management. *Baltiyskiy gumanitarnyy zhurnal = Baltic Humanitarian Journal*. 2015;(2):150–153. (In Russ.)
8. Reshetnikov I.S. A synergetic model for building a multimodule information and control system. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky*. 2011;(3):264–267. (In Russ.)
9. Lebedev V.I., Lebedeva I.V., Shuvaev A.V. Synergetic models of socio-economic systems. *Fundamental research*. 2018;(11):256–260. (In Russ.)
10. Sukharev O.S. *The theory of effectiveness of economy: monograph. 2nd ed., cor.* Moscow: INFRA-M, 2014:367. Available at: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost
11. Bezborodova O., Gromkov N., Bodin O. [et al.]. Multi-agent Technologies for Comprehensive Monitoring of the State of Territorial Technosphere. *2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro. 2019:1–4. doi:10.1109/MECO.2019.8760064
12. Pat. 2292075 RF. Synergistic computing system. Bodin O.N., Loginov D.S., Ternopol'skiy K.A.; No. 2005119236/09; appl. 21.06.2005; publ. 20.01.2007, bull. № 2:20. (In Russ.)
13. Patent 2694528 Russian Federation, Int. Cl. A62B 99/00 (2009.01). *Search and rescue method*. Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E., Rakhmatullof F.K., Gerasimov A.I., Ozhikenov K.A., Bayanbaj N., Berdibaeva G.K.; No. 2018139491; Date of filing 07.11.2018; Date of publication 16.07.2019:31.

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oxana243@yandex.ru

Oksana E. Bezborodova

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

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

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2022

Принята к публикации/Accepted 8.05.2022

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.74

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. И. Нефедьев¹, Д. И. Нефедьев²

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1,2} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются емкостные делители высокого напряжения, применяемые в операциях поверки (калибровки) высоковольтных средств измерения, а также при необходимости расширения пределов измерения электростатических вольтметров. Предметом исследования являются способы повышения точности емкостных делителей высокого напряжения с распределенными параметрами, применяемых в указанных выше областях. Целью работы является анализ двух способов повышения точности, один из которых основан на применении новых конструктивных решений, а другой – на реализации новых теоретических положений, обеспечивающих возможность повышения точности емкостных делителей высокого напряжения в широком диапазоне величин. *Материалы и методы.* Анализ двух способов повышения точности емкостных делителей высокого напряжения выполнен на основе положений теоретической метрологии, элементов математической статистики и математического моделирования, а также экспериментального исследования предложенных в работе способов повышения точности измерения. *Результаты.* Разработаны два способа повышения точностных характеристик емкостных делителей высокого напряжения. Первый способ основан на применении новых конструктивных решений для минимизации погрешности емкостных делителей высокого напряжения. Второй способ реализует новые теоретические положения, реализация которых позволяет существенно снизить погрешность емкостных делителей высокого напряжения в процессе эксплуатации. *Выводы.* Предложенная новая конструкция экранов конденсатора основной (измерительной) цепи емкостного делителя высокого напряжения и использование сочетания двух независимых друг от друга методов – метода независимой поверки (самокалибровки) и метода измерения коэффициента преобразования делителя с применением переходного воздушного конденсатора обеспечивают высокую точность измерения коэффициентов преобразования емкостных делителей высокого напряжения. Это позволит повысить как точность коммерческого учета электроэнергии, так и обеспечить децентрализованное воспроизведение и передачу относительной величины – коэффициента преобразования емкостного делителя высокого напряжения.

Ключевые слова: емкостной делитель высокого напряжения, независимая поверка, воздушный конденсатор, коэффициент преобразования

Для цитирования: Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И. Повышение точности емкостных делителей высокого напряжения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 39–45. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

INCREASING THE ACCURACY OF HIGH VOLTAGE CAPACITIVE DIVIDERS

A.I. Nefed'ev¹, D.I. Nefed'ev²

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

^{1,2} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is high-voltage capacitive dividers used in the verification (calibration) operations of high-voltage measuring instruments, as well as, if necessary, expanding the measurement limits of electrostatic voltmeters. The subject of the study is ways to improve the accuracy of high-voltage capacitive dividers with distributed parameters applied in the above areas. The aim of the work is to analyze two ways to increase accuracy, one of which is based on the application of new design solutions, and the other on the implementation of new theoretical provisions that ensure the possibility of increasing the accuracy of high-voltage capacitive dividers in a wide range of values. *Materials and methods.* The analysis of two ways to increase the accuracy of capacitive dividers of high voltage is carried out on the basis of the provisions of theoretical metrology, elements of mathematical statistics and mathematical modeling, as well as an experimental study of the methods proposed in the work to increase the accuracy of measurement. *Results.* Two methods have been developed to improve the accuracy characteristics of high-voltage em-bone dividers. The first method is based on the use of new design solutions to minimize the error of high-voltage capacitive dividers. The second method implements new theoretical provisions, the implementation of which makes it possible to significantly reduce the error of high-voltage capacitive dividers during operation. *Conclusions.* The proposed new design of the capacitor screens of the main (measuring) circuit of the high-voltage capacitive divider and the use of a combination of two independent methods – the method of independent verification (self-calibration), and the method of measuring the conversion coefficient of the divider using a transient air capacitor ensure high accuracy of measuring the conversion coefficients of high-voltage capacitive dividers. This will improve both the accuracy of commercial electricity metering and ensure decentralized reproduction and transmission of a relative value – the conversion coefficient of a high-voltage capacitive divider.

Keywords: high-voltage voltage divider, independent verification, air capacitor, conversion factor

For citation: Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I. Increasing the accuracy of high voltage capacitive dividers. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):39–45. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-5

Одной из актуальных проблем измерений в области высоковольтной энергетики является повышение точности измерения переменного напряжения, что обусловлено непрерывно возрастающими требованиями к повышению точности измерений. В области измерения высоких напряжений эта проблема остается актуальной и в настоящее время [1].

Для точных измерений высоких напряжений часто используются емкостные делители высокого напряжения (ЕДВН). Основной проблемой известных ЕДВН является существенно большая погрешность по сравнению с индуктивными делителями напряжения и измерительными трансформаторами [2–4].

Проблема повышения точности ЕДВН может быть решена двумя способами.

Первый способ повышения точности ЕДВН заключается в разработке новой конструкции его элементов [5]. Конструкция экранированного конденсатора измерительной цепи ЕДВН приведена на рис. 1.

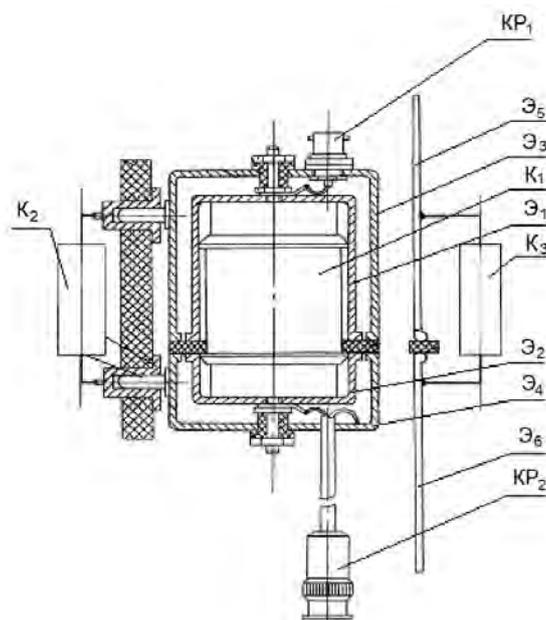


Рис. 1. Конденсатор измерительной цепи ЕДВН

Измерительная цепь ЕДВН состоит из цилиндрических конденсаторов K_1 , каждый из которых находится в металлических экранах \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , каждый из которых соединен с выводами конденсатора и электрически разделены изолирующим кольцом. Снаружи конденсатора находятся экраны \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 .

Конденсаторы измерительной цепи ЕДВН соединены с помощью разъемов KP_1 и KP_2 . К первой эквипотенциальной цепи ЕДВН относятся конденсаторы K_2 . Вторая эквипотенциальная цепь состоит из плоских экранов \mathcal{E}_5 и \mathcal{E}_6 , закрепленных на кожухе делителя, а их потенциал равен потенциалу обкладок конденсатора K_3 [6].

Постоянство коэффициента деления ЕДВН определяется стабильностью конденсаторов его измерительной цепи. Экспериментально установлено, что в ЕДВН необходимо использовать конденсаторы с зависимостью емкости от приложенного напряжения не выше $\pm 0,003\%$ в диапазоне напряжений до 500 В. В экспериментальной конструкции ЕДВН были использованы газонаполненные конденсаторы ФГТ-И емкостью 0,1 мкФ на напряжение 1000 В.

Для повышения точности ЕДВН было проведено сравнение емкостей конденсаторов первой эквипотенциальной цепи и измерительной цепи мостовым методом. Емкости конденсаторов указанных цепей не должны отличаться более чем на $\pm 0,1\%$.

Измерение напряжений на конденсаторах измерительной цепи и второй эквипотенциальной цепи ЕДВН производилось электростатическим вольтметром. При отличии значений емкостей конденсаторов измерительной и второй эквипотенциальной цепей ЕДВН производился подбор значений емкости конденсаторов второй эквипотенциальной цепи [7].

Второй способ повышения точности ЕДВН заключается в применении устройства, обеспечивающего повышение точности измерения коэффициента преобразования ЕДВН на месте их эксплуатации [7].

Разработанный метод поверки (калибровки) ЕДВН основан на сочетании двух независимых методов – метода независимой поверки (самокалибровки) и разработанного метода с применением воздушного конденсатора [8].

На рис. 2 приведено схематическое изображение устройства для измерения коэффициента преобразования ЕДВН.

Устройство состоит из источника напряжения ИН (рис. 2), компаратора тока КТ, который образован однодекадной обмоткой L_1 , шестидекадной обмоткой L_2 , квадратурной обмоткой L_3 , индикаторной обмоткой L_4 , нулевого индикатора НИ, переходного воздушного конденсатора C_B , переменного конденсатора C_{Π} и емкостного делителя высокого напряжения ЕДВН. Конденсатор C_1 является выходным и опорным ЕДВН, а конденсатор C_2 представляет собой магазин конденсаторов, емкость каждого из которых номинально равна емкости конденсатора C_1 .

Первым методом измерения коэффициента преобразования емкостного делителя напряжения является использование переходного воздушного конденсатора без нормированной погрешности, с емкостью

$$C_B = \sqrt{N_{\text{ЕДВН}}} \cdot C_{\text{вых}}.$$

Измерение коэффициента преобразования ЕДВН производится за два этапа.

Сначала переключатель S_4 установлен в положение 1, при этом определяется коэффициент преобразования N_{C_B} воздушного конденсатора по отношению к коэффициенту преобразования $N_{C_{\text{вых}}} = 1$.

Условие равновесия двух параллельных цепей:

$$C_B \rho_1 = C_{\text{вых}} \mu_1, \quad (1)$$

где μ_1 – отсчет по плечу L_1 ; ρ_1 – соответственно, отсчет по плечу L_2 компаратора тока КТ.

Заменив в равенстве (1) $C_{\text{вых}}$ и C_B соответственно на коэффициент преобразования $N_{C_{\text{вых}}}$ и N_{C_B} , получим

$$N_{C_{\text{вых}}} \rho_1 = N_{C_B} \mu_1.$$

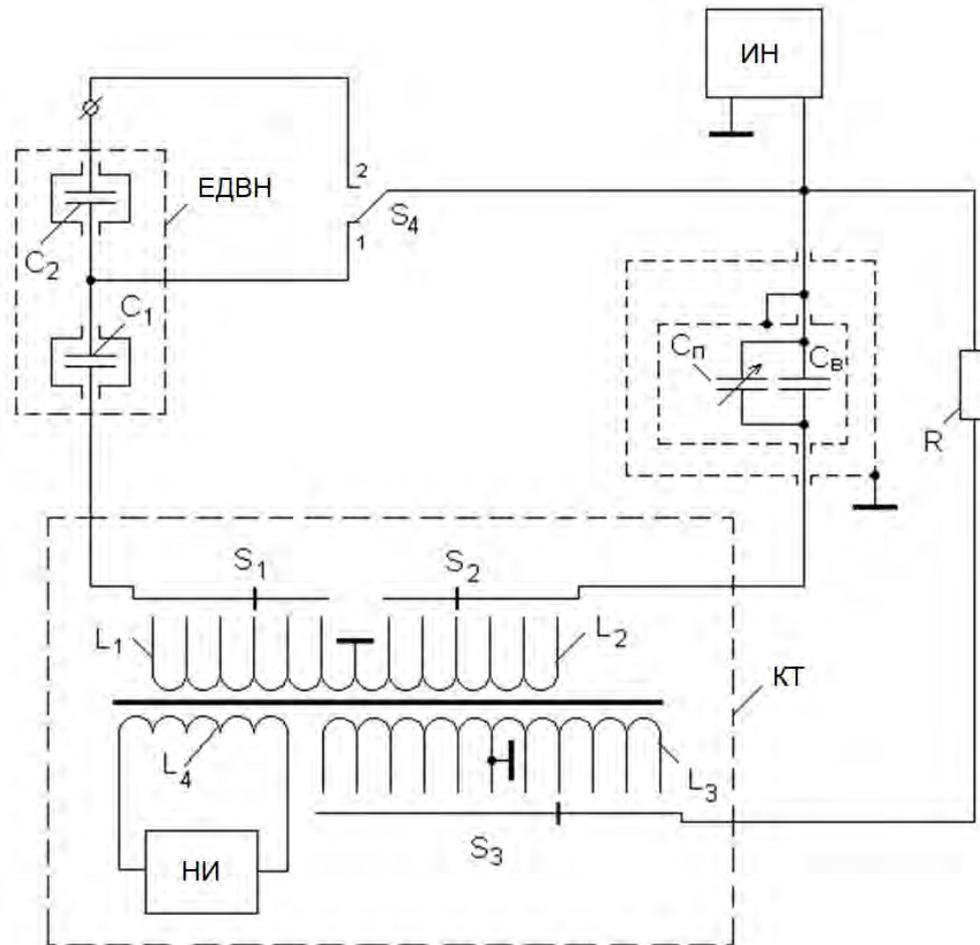


Рис. 2. Устройство для измерения коэффициента преобразования ЕДВН

Находим коэффициент преобразования $N_{Св}$:

$$N_{Св} = \frac{N_{Свых} \mu_1}{\rho_1}.$$

При $N_{Свых} = 1$ получим

$$N_{Св} = \frac{\mu_1}{\rho_1}.$$

Далее определим $N_{ЕДВН}$ (переключатель S_4 находится в положении 2). В этом случае условие равновесия схемы

$$N_{ЕДВН} \mu_2 = N_{Св} \rho_2 = \mu_1 \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

где μ_2 – отсчет по плечу L_1 ; ρ_2 – соответственно отсчет по плечу L_2 компаратора тока КТ.

Коэффициент преобразования $N_{ЕДВН}$:

$$N_{ЕДВН} = \frac{\mu_1 \rho_2}{\mu_2 \rho_1}.$$

Коэффициент преобразования $K_{ЕДВН}$ равен

$$K_{ЕДВН} = \frac{1}{N_{С_{ЕДВН}}}. \quad (2)$$

Коэффициент преобразования $K_{\text{ЕДВН}}$ был получен при условии отсутствия влияния приложенного напряжения на емкость воздушного конденсатора.

Погрешность разработанного метода измерения коэффициентов преобразования ЕДВН обусловлена следующими составляющими [8]:

– погрешностью компаратора тока $\gamma_{\text{КТ}} = 0,001 \%$ (определена методом независимой поверки);

– погрешностью, вносимой зависимостью емкости конденсаторов ФГТ-И от приложенного напряжения: $\gamma_{\Delta U} = 0,002 \%$;

– временной нестабильностью коэффициента преобразования ЕДВН: $\gamma_{\text{ВН}} = 0,005 \%$ (за шесть месяцев, определена экспериментально);

– температурной нестабильностью ЕДВН в диапазоне 10–35 °С: $\gamma_{\text{ТН}} = 0,005 \%$.

Принимая составляющие погрешности коэффициента преобразования ЕДВН и компаратора тока КТ в пределах допуска равновероятными, определим доверительную погрешность ЕДВН при доверительной вероятности 0,99:

$$\gamma_{\text{ЕДВН}} = 1,4\sqrt{\gamma_{\text{КТ}}^2 + \gamma_{\Delta U}^2 + \gamma_{\text{ВН}}^2 + \gamma_{\text{ТН}}^2} = 0,01 \%$$

Вторым методом повышения точности измерения коэффициента преобразования ЕДВН является метод независимой поверки [8].

Измерение коэффициента преобразования K_{UC} ЕДВН методом независимой поверки производится в два этапа. На первом этапе (переключатель S_4 – в положении 1) производится балансировка плеч компаратора тока КТ с помощью переменного конденсатора $C_{\text{П}}$. При этом на плечах L_1 и L_2 выставляются отсчеты, равные единице.

На втором этапе поочередно производятся относительные измерения всех емкостей конденсаторов, входящих в ЕДВН, относительно конденсатора C_1 , который является опорным. Коэффициент преобразования K_{UC} составного ЕДВН равен отношению суммы реактивных сопротивлений емкостей всех конденсаторов $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$, входящих в состав ЕДВН, к реактивному сопротивлению Z_1 емкости выходного конденсатора ЕДВН:

$$K_{\text{UC}} = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{Z_1}, \quad (3)$$

где $Z_1 = 1 / \omega C_1$; $Z_2 = 1 / \omega C_2 \dots Z_n = 1 / \omega C_n$.

Подставляя полученные сопротивления в формулу (3), получим

$$K_{\text{UC}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} + \dots + \frac{1}{\omega C_n}}{\frac{1}{\omega C_1}} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}{\frac{1}{C_1}}.$$

Емкость C_1 является опорной для ЕДВН. Выразим $C_1 \dots C_n$ через C_1 и отсчеты $\rho_1 \dots \rho_n$ по показаниям плеча L_2 компаратора тока.

Коэффициент деления ЕДВН определяется по формуле

$$K_{\text{UC}} = 1 + \frac{1}{\rho_2} + \dots + \frac{1}{\rho_n}. \quad (4)$$

При использовании метода независимой поверки напряжение на обкладках конденсатора и на его экране является одинаковым, поэтому утечки тока с конденсатора исключены, измерения проводятся при рабочем напряжении на конденсаторах, что и обеспечивает высокую точность метода.

Погрешность метода независимой поверки коэффициента преобразования ЕДВН обусловлена следующими составляющими [8]:

– погрешностью компаратора тока $\gamma_{\text{КТ}} = 0,001 \%$ (определена методом независимой поверки);

– погрешностью, вносимой зависимостью емкости конденсаторов ФГТ-И от приложенного напряжения: $\gamma_{\Delta U} = 0,002 \%$ (определена экспериментально);

- температурной нестабильностью ЕДВН в диапазоне 10 – 35 °С: $\gamma_{ТН} = 0,005 \%$;
- погрешностью, обусловленной порогом чувствительности нулевого индикатора $\Theta_{НИ} = 0,0001 \%$.

Считая составляющие погрешности коэффициента преобразования ЕДВН и компаратора тока КТ в пределах допуска равновероятными, определим доверительную погрешность ЕДВН при доверительной вероятности 0,99:

$$\gamma_{UC} = 1,4\sqrt{\gamma_{КТ}^2 + \gamma_{\Delta U}^2 + \gamma_{ТН}^2 + \Theta_{НИ}^2} = 0,0077 \%$$

Совпадение результатов измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, определенных на основе метода переходного воздушного конденсатора и метода независимой поверки, свидетельствует как об отсутствии утечек тока с конденсаторов измерительной цепи, так и о компенсации всех погрешностей ЕДВН. При различии результатов измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, определенных на основе метода переходного воздушного и метода независимой поверки, необходимо изменить емкости экранирующих цепей таким образом, чтобы указанные коэффициенты преобразования были равны.

Таким образом, предложенная конструкция конденсатора ЕДВН и использование сочетания двух независимых друг от друга методов – метода независимой поверки (самоповерки), и метода с применением переходного воздушного конденсатора – обеспечивают высокую точность измерения коэффициентов преобразования ЕДВН, что позволит повысить как точность коммерческого учета электроэнергии, так и обеспечить децентрализованное воспроизведение и передачу относительной величины – коэффициента преобразования ЕДВН.

Список литературы

1. Булыгин Ф. В. Основные задачи «Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года»: взгляд разработчика // Главный метролог. 2017. № 5. С. 46–53.
2. Roman H., Vaclav K., Mikołaj B. [et al.]. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // Elektronika ir Elektrotechnika. 2020. № 26. P. 25–31.
3. Dianqi G. New Structure of Potential Optimization in Capacitive Voltage Divider // High Voltage Apparatus. 2018. № 54. P. 76–79.
4. Электронный образцовый делитель напряжения. URL: http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure_Tettex_ru/4860.pdf (дата обращения: 14.04.2022).
5. Ломтев Е. А., Нефедьев Д. И. Принципы построения и конструкции высоковольтных емкостных делителей напряжения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4. С. 4–8.
6. Нефедьев А. И. Емкостный делитель высокого напряжения // Электрика. 2013. № 2. С. 32–34.
7. Нефедьев А. И. Независимая поверка высоковольтных составных емкостных делителей напряжения // Приборы. 2012. № 6. С. 49–52.
8. Нефедьев А. И. Методы и средства повышения точности высоковольтных составных емкостных делителей напряжения // Приборы. 2010. № 11. С. 49–52.

References

1. Bulygin F.V. The main tasks of the "Strategy for ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation until 2025": developer's view. *Glavnyy metrolog = Chief Metrologist*. 2017;(5):46–53. (In Russ.)
2. Roman H., Vaclav K., Mikołaj B. [et al.]. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering*. 2020;(26):25–31.
3. Dianqi G. New Structure of Potential Optimization in Capacitive Voltage Divider. *High Voltage Apparatus*. 2018;(54):76–79.
4. *Elektronnyy obraztsovyy delitel' napryazheniya = Electronic model voltage divider*. (In Russ.). Available at: http://macdem.ru/images/Tettex/Brochure_Tettex_ru/4860.pdf (accessed 14.04.2022).
5. Lomtev E.A., Nefed'ev D.I. Principles of construction and construction of high-voltage capacitive voltage dividers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(4):4–8. (In Russ.)
6. Nefed'ev A.I. High voltage capacitive divider. *Elektrika = Electrician*. 2013;(2):32–34. (In Russ.)
7. Nefed'ev A.I. Independent verification of high-voltage composite capacitive voltage dividers. *Pribory = Devices*. 2012;(6):49–52. (In Russ.)

8. Nefed'ev A.I. Methods and means of improving the accuracy of high-voltage composite capacitive voltage dividers. *Pribory = Devices*. 2010;(11):49–52. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Иванович Нефедьев

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey I. Nefed'ev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of electrical engi-
neering,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Дмитрий Иванович Нефедьев

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

Dmitriy I. Nefed'ev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measurement technology 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 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2022

Принята к публикации/Accepted 15.05.2022

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 621.313

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-6

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА И ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

А. С. Бордюг

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Трансформатор осуществляет преобразование переменного напряжения и/или гальваническую развязку в самых различных областях применения –электроэнергетике, электронике и радиотехнике. Трансформатор имеет не менее двух обмоток, у которых есть общий магнитопровод и которые электрически изолированы друг от друга. *Материалы и методы.* Разработка схемы, приведенная в данной статье, основана на теории активного двухполюсника – части электрической цепи, выделенной относительно двух зажимов, содержащей источник энергии (или скомпенсированные источники) и пассивного четырехполюсника – части схемы, имеющей две пары зажимов и не содержащей в себе источника энергии. В качестве типичного активного двухполюсника может выступать трансформатор, как и в качестве пассивного четырехполюсника тоже может выступать трансформатор. *Результаты.* В статье приведена разработка оптимизации схем замещения трансформатора, которые являются удобными при теоретическом анализе и в расчетной практике. Если возникнет вопрос – почему конкретно приведенные схемы являются эффективными, то на него последует следующий ответ – поскольку они позволяют получить искомые соотношения цепей первичной и вторичных обмоток проще, быстрее и позволяют не исказить такой параметр, как точность. Причем логическая структура этих соотношений столь выразительна по своей сущности, что возможна коррекция известных критериев, а также формулировка новых. *Выводы.* Следовательно, указанные в этой статье схемы будут представлять интерес в производственно-конструкторских разработках, а также в учебно-методическом плане.

Ключевые слова: трансформатор, схема замещения, коэффициент полезного действия

Для цитирования: Бордюг А. С. Применение теории активного двухполюсника и пассивного четырехполюсника при разработке схемы замещения трансформатора // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 46–52. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-6

APPLICATION OF THE THEORY OF AN ACTIVE BIPOLAR AND A PASSIVE FOUR-POLE DURING DEVELOPMENT TRANSFORMER REPLACEMENT CIRCUITS

A.S. Bordyug

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia
alexander.bordyug@mail.ru

Abstract. *Background.* The transformer is a static electromagnetic apparatus designed to convert an alternating current of one voltage into an alternating current of another voltage of the same frequency. The transformer performs AC voltage conversion and/or galvanic isolation in various applications – electric power, electronics and radio engineering. The transformer has at least two windings, which have a common magnetic conductor and which are electrically isolated from each other. *Materials and methods.* The development of the scheme given in this article is based on the theory of an active bipolar – a part of an electric circuit isolated relative to two terminals containing an energy source (or compensated sources) and a passive four-pole – a part of the circuit that has two pairs of terminals and does not contain energy sources. A transformer can act as a typical active bipolar, as well as a transformer can act as a passive four-pole. *Results.* The article presents the development of optimization of transformer substitution schemes, which are convenient for theoretical analysis and in calculation practice. If the question arises – why the specified circuits are effective, then the next answer will follow – since they allow you to obtain the desired ratios of the circuits of the primary and secondary windings easier, faster and allow you not to distort such a parameter as accuracy. *Conclusions.* Moreover, the logical structure of these relations is so expressive in essence, that it is possible to correct known criteria, as well as the wording of new ones. Consequently, the schemes mentioned in this article will be of interest in production and design developments, as well as in the teaching and methodological plan.

Keywords: transformer, substitution scheme, efficiency factor

For citation: Bordyug A.S. Application of the theory of an active bipolar and a passive four-pole during development transformer replacement circuits. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):46–52. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-6

Введение

Схема замещения трансформатора позволяет отдельно рассчитывать цепи первичной и вторичных обмоток. В схему замещения трансформатора входят поля рассеивания магнитного потока. Вторичные цепи пересчитываются в первичную через коэффициенты трансформации.

Цель исследования

Оптимизация – один из путей к достижению снижению затрат на производство конечного субъекта системы. В свое время изобретение трансформатора позволило преобразовывать величины электрической цепи для реализации различных проектов. С течением времени трансформаторы меняли свой конструкционный состав, состав материалов для повышения коэффициента полезного действия. В данной статье для повышения коэффициента полезного действия будут применяться схемы замещения трансформатора на основе теории активного двухполюсника и пассивного четырехполюсника.

Материалы и методы исследования

Материалы для исследования в данной статье представляют собой научно-техническую литературу по таким дисциплинам, как теоретические основы электротехники и электрические машины и приводы. Методом исследования стал анализ источников по дисциплинам и аналитический расчет схем замещения трансформатора.

Результаты исследования

Известная Т-образная схема замещения трансформатора, приведенная на рис. 1, мало удобна для анализа из-за своей громоздкости. Ниже предложен ряд схем, обеспечивающих простоту и точность расчета токов, напряжений, КПД и других показателей работы трансформатора.

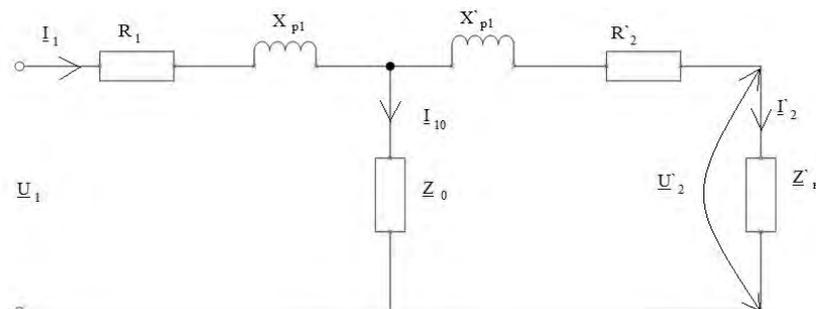


Рис. 1. Т-образная схема замещения трансформатора

Первая из них (рис. 2,а) представляет собой обычную схему замещения активного двухполюсника, которая получается для него при обращении соединенных сопротивлений: входного $Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}$ и приведенного нагрузочного $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$, включенных на зажимы источника с напряжением U_{20} (где индекс 0 указывает на принадлежность U_{20} к режиму х.х.). Возможность использования этой схемы обосновывается тем, что трансформатор всегда можно рассматривать как пример типичного двухполюсника [1, 2]. Применим предложенную схему для определения внешней характеристики трансформатора, под которой понимается зависимость напряжения на нагрузке U_2 в функции тока I_2 или подобная ей зависимость $U_2 = f(I_2)$. Для вывода аналитического выражения последней воспользуемся векторной диаграммой, приведенной на рис. 2,б. Опустим из конца вектора U_{20} перпендикуляр на направление U_2 . Тогда получим

$$U_2 = U_{20} \cos(\Psi_2 - \phi_2) - U_{\text{вх}} \cos(\phi_{\text{вх}} - \phi_2),$$

где

$$\Psi_2 = \arctg((X_{\text{вх}} + X_{\text{н}})/(R_{\text{вх}} + R_{\text{н}})); \phi_2 = \arctg(X_{\text{н}}/R_{\text{н}}); \phi_{\text{вх}} = \arctg(X_{\text{вх}}/R_{\text{вх}}).$$

В частном случае, когда $\Psi_2 = \phi_2 = \phi_{\text{вх}}$ исследуемая характеристика примет вид

$$U_2 = U_{20} - z_{\text{вх}} I_2,$$

т.е. будет представлять собой уравнение прямой линии.

Если ввести относительные параметры $\nu = U_2/U_{20}$ и $\beta = I_2/I_{2\text{кз}}$, то запись зависимости еще более упростится:

$$\nu = 1 - \beta.$$

Относительная форма удобна своей универсальностью. При ней внешняя характеристика трансформатора не зависит от его типового размера и может быть построена по двум точкам: $\nu = 1$ при $\beta = 0$ и $\beta = 1$ при $\nu = 0$ (рис. 2,в). Но в общем случае, когда $\Psi_2 \neq \phi_2 \neq \phi_{\text{вх}}$, внешнюю характеристику придется считать по соотношению

$$\nu = [1 - \beta(\cos(\phi_{\text{вх}} - \phi_2) / \cos(\Psi_2 - \phi_2))] \cos(\Psi_2 - \phi_2).$$

Здесь будет удобно ввести еще один относительный параметр

$$n = z_{\text{н}} / z_{\text{вх}};$$

тогда β и Ψ_2 можно найти по формулам

$$\beta = 1 / \sqrt{n^2 + 1 + 2n \cos(\phi_{\text{вх}} - \phi_2)};$$

$$\Psi_2 = \arctg((n \sin \phi_2 + \sin \phi_{\text{вх}}) / (n \cos \phi_2 + \cos \phi_{\text{вх}})).$$

Семейство внешних характеристик трансформатора при различном характере нагрузки и изменении $z_{\text{н}}$ от бесконечности до нуля приведено на рис. 2,в. Все они криволинейны, за исключением отмеченной выше прямой.

Более простую расчетную схему замещения (чем Т-образная) можно получить и для определения тока I_1 . Отметим, что схема рис. 1 аналогична схеме замещения пассивного четырехполюсника, а потому для нее справедливы основные уравнения [2]:

$$\underline{U}_1 = A \underline{U}_2 + B \underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = C \underline{U}_2 + D \underline{I}_2,$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника, связанные соотношением $AD - BC = 1$.

Если из второго уравнения найти U_2 и подставить в первое, то получим

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + (\underline{I}_2 / A).$$

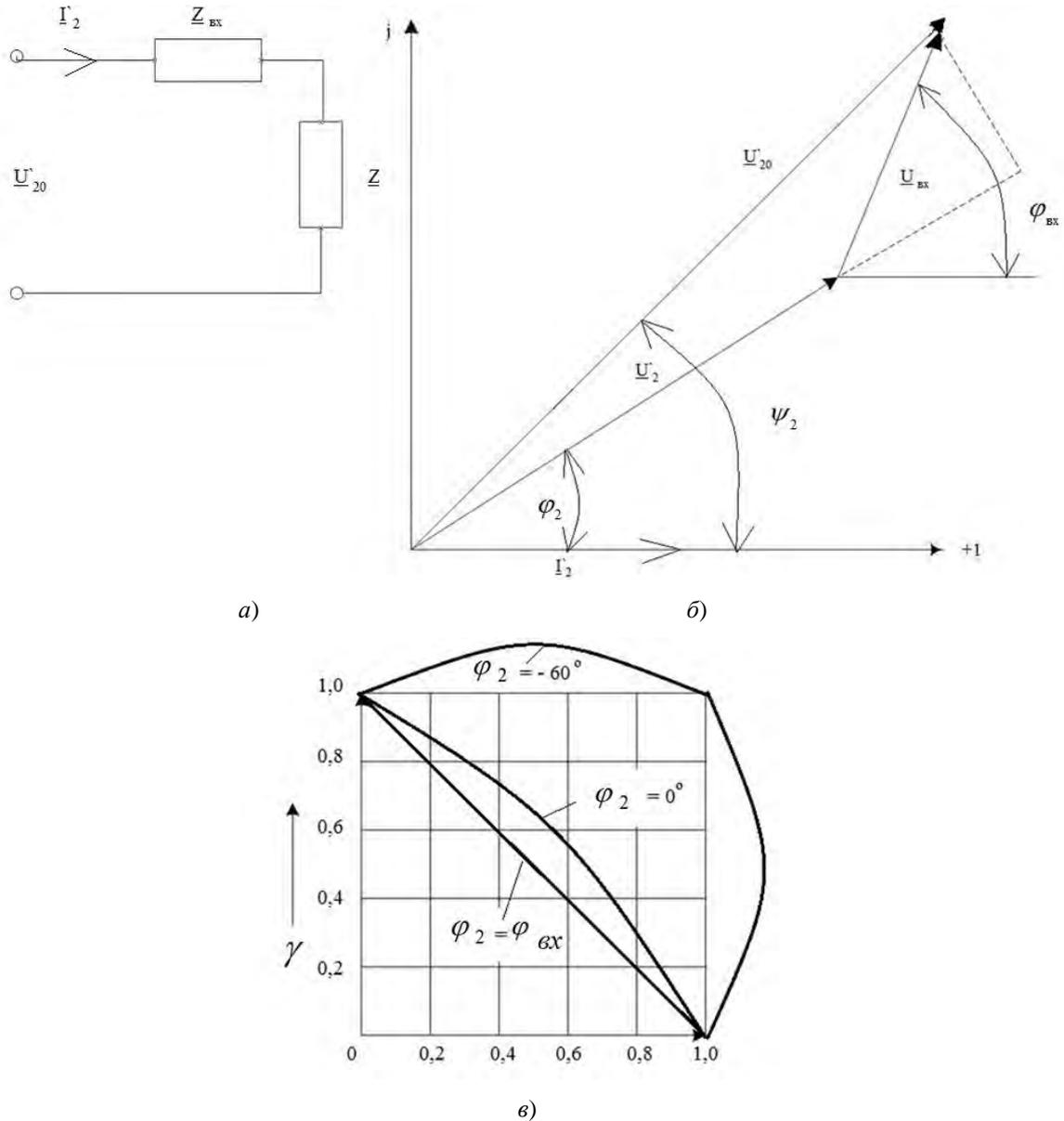


Рис. 2. Иллюстрации к определению внешней характеристики трансформатора

Этому уравнению соответствует схема, приведенная на рис. 3,а. В отличие от схемы рис. 2,а она имеет две ветви. По одной протекает ток холостого хода I_{10} , поэтому ее можно назвать ветвью холостого хода. Вторая же заслуживает названия рабочей. Она содержит увеличенные в A раз сопротивления $z_{\text{н}}$ и $z_{\text{вх}}$. Составляющие тока I_1 рассчитываются по соотношениям

$$I_{10} = U_{20} / z_0 ; I_2 / A = U_{20} (1 / A(z_{\text{вх}} + z_{\text{н}})) .$$

И, наконец, предложим еще одну схему, пригодную для решения энергетических вопросов, в том числе и для определения КПД трансформатора. Очевидно, что записанное выше уравнение токов справедливо и для сопряженных комплексов, т.е. [1, 3, 4]:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (\dot{I}_2 / A) .$$

Если же это равенство умножить справа и слева на \underline{U}_1 , то получим уравнение вида

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_{10} + ((\underline{U}_1 \dot{I}_2) / A) ,$$

где \bar{S}_1 , \bar{S}_{10} , $(U_1 \dot{I}_2) / A$ – полные комплексные мощности соответственно: поступающая в трансформатор от источника питания, ветвях холостого хода и рабочей.

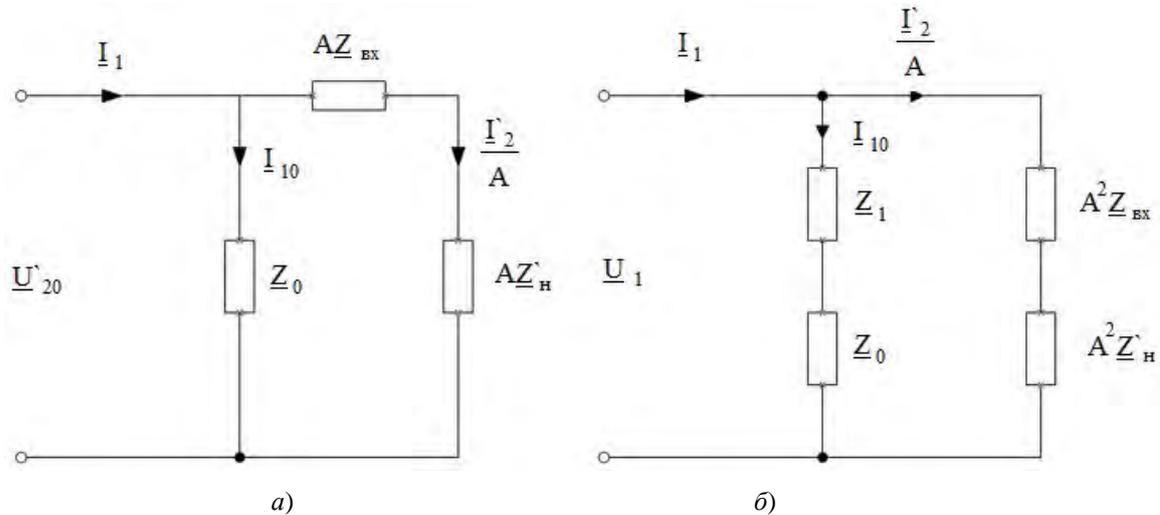


Рис. 3. Схемы замещения трансформатора:

a – для определения тока I_1 ; *б* – для исследования энергетических показателей

Уравнению мощностей соответствует схема замещения, приведенная на рис. 3,б. Используя ее, можно решить вопрос о второй основной характеристике трансформатора, под которой понимается зависимость КПД η в функции тока нагрузки или относительно параметра β [2, 4].

Действительно, в соответствии с предложенной схемой уравнение КПД примет вид

$$\eta = U_2 \dot{I}_2 \cos \phi_2 / (U_2 \dot{I}_2 \cos \phi_2 + U_{\text{вх}} \dot{I}_2 \cos \phi_{\text{вх}} + S_{10} \cos \phi_0).$$

Вновь рассмотрим частный случай, когда $\phi_2 = \phi_{\text{вх}} = \phi_0$, тогда формула КПД упростится:

$$\eta = ((U_{20} - z_{\text{вх}} \dot{I}_2) \dot{I}_2) / U_{20} \dot{I}_2 + S_{10}.$$

Если же использовать относительные параметры β и $\alpha = U_1 I_{10} / (U_{20} \dot{I}_2 + S_{10})$, то последнее уравнение переписывается в форме

$$\eta = (\beta - \beta^2) / (\alpha - \beta).$$

Исследование его на экстремум даст значение $\beta_{\text{опт}}$, соответствующее максимуму КПД:

$$\beta_{\text{опт}} = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \alpha},$$

сама же величина максимального КПД будет равна

$$\eta_{\text{max}} = (\sqrt{1 + \alpha} - \sqrt{\alpha})^2.$$

Семейство зависимостей $\eta = f(\beta)$, при различных α , приведено на рис. 4,а. Оно наглядно иллюстрирует, что по мере снижения α увеличивается крутизна характеристики, растет величина η_{max} и снижается $\beta_{\text{опт}}$. Следовательно, в предельном случае при $\alpha = 0$ характеристика КПД приобретает вертикально возрастающий фронт (при этом $\beta_{\text{опт}} = 0$ и $\eta_{\text{max}} = 1$) и далее при увеличении тока нагрузки будет меняться по линейному закону.

В свете изложенного, приводимая зависимость $\eta = f(\beta)$ активного двухполюсника только в виде падающей прямой (рис. 4,б) является некорректным изображением характеристики КПД, поскольку ведет к неверному, с физической точки зрения, выводу, что максимальный КПД наблюдается в х.х. режиме. КПД всегда равен нулю, но он скачком будет воз-

растать до максимума при любой бесконечно малой нагрузке, если потери в ветви х.х. равны нулю.

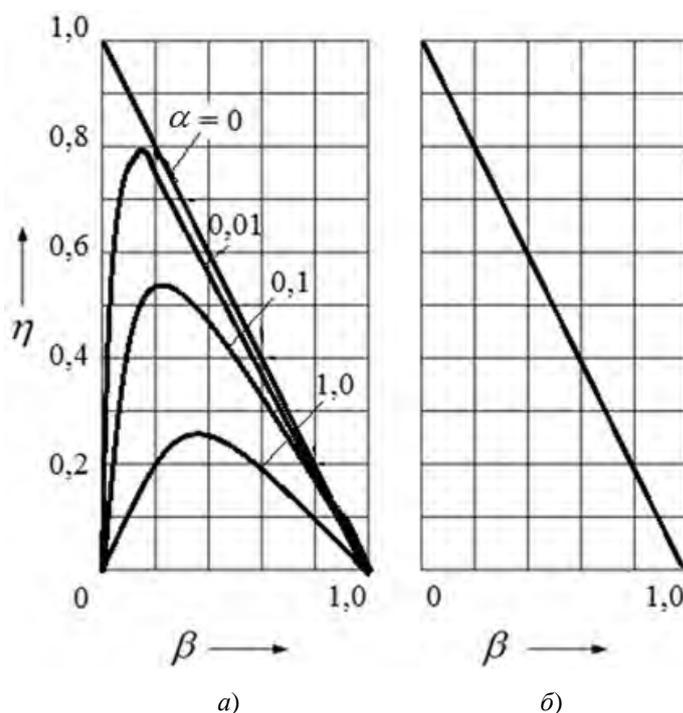


Рис. 4. Зависимости $\eta = f(\beta)$

Поскольку у мощных силовых трансформаторов $\alpha = 1$, $\beta_{\text{опт}}$ можно определить по соотношению [4, 5]

$$\beta_{\text{опт}}^2 \cong \alpha,$$

которое без труда переписывается в виде $z_{\text{вх}} I_2^2 = S_{10}$ или при оговоренных условиях равенства $\phi_{\text{вх}}$ и ϕ_0 : $R_1 I_2^2 = P_{10}$ (где P_{10} – активные потери в режиме х.х.). Отсюда следует вывод, что при η_{max} активные потери ветвей (рабочей и холостого хода) равны. Однако этот критерий не применим к микротрансформаторам, у которых α лежит в пределах от 0,01 до 0,1, и потому диапазон значений β^2 / α , соответственно, равен 0,9–0,23.

Выясним физическую суть сопротивления нагрузки, при котором КПД имеет максимальное значение. Для этого найдем α и $\beta_{\text{опт}}$ через коэффициенты четырехполюсника:

$$\alpha = BC ; \beta_{\text{опт}} = \sqrt{BC} (\sqrt{AD} - \sqrt{BC}).$$

Тогда искомое сопротивление определится соотношением

$$\hat{z}_{\text{н}} = \sqrt{BD / AC},$$

т.е. будет равно характеристическому сопротивлению четырехполюсника, при котором модуль полной мощности проходит с входа на выход с минимальным искажением.

Разумеется, что в общем случае при различии аргументов ϕ_2 , $\phi_{\text{вх}}$ и ϕ_0 будут наблюдаться те или иные отличия от найденных показателей оптимального режима.

Заключение

В итоге можно отметить, что предложенные схемы замещения трансформатора удобны при теоретическом анализе и в расчетной практике, поскольку позволяют получить искомые

соотношения проще, быстрее и не в ущерб точности. Причем логическая структура этих соотношений столь выразительна по своей сущности, что возможна коррекция известных критериев, а также формулировка новых. Следовательно, указанные схемы будут представлять интерес в производственно-конструкторских разработках, а также в учебно-методическом плане.

Список литературы

1. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л. : Энергия, 1972. 454 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М. : Высш. шк., 1978. 523 с.
3. Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И., Бояршинова А. Н. Электрические машины : учебник. СПб. : Лань, 2016. 352 с.
4. Токарев Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для вузов. М. : Альянс, 2015. 626 с.
5. Москаленко В. В., Кацман М. М. Электрические машины и приводы : учебник. М. : Academia, 2017. 24 с.

References

1. Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. *Elektricheskie mashiny = Electric machines*. Leningrad: Energiya, 1972:454. (In Russ.)
2. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki = Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow: Vyssh. shk., 1978:523. (In Russ.)
3. Shumilov R.N., Tolstova Yu.I., Boyarshinova A.N. *Elektricheskie mashiny: uchebnik = Electric machines : textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2016:352. (In Russ.)
4. Tokarev B.F. *Elektricheskie mashiny: ucheb. posobie dlya vuzov = Electric machines : textbook for universities*. Moscow: Al'yans, 2015:626. (In Russ.)
5. Moskalenko V.V., Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny i privody: uchebnik = Electric machines and drives : textbook*. Moscow: Academia, 2017:24. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Бордюг

кандидат технических наук,
доцент кафедры электрооборудования судов
и автоматизации производства,
заместитель декана морского факультета,
Керченский государственный
морской технологический университет,
(Россия, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 123)
E-mail: alexander.bordyug@mail.ru

Aleksandr S. Bordyug

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of electrical equipment of ships
and automation of production,
deputy dean of the faculty of marine,
Kerch State Marine Technological University
(123 Ordzhonikidze street, Kerch, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 21.01.2022

Принята к публикации/Accepted 20.02.2022

УДК 621.315.1
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА

И. В. Игнатенко¹, С. А. Власенко², Е. Ю. Тряпкин³, А. И. Пухова⁴

^{1,2,3,4} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия
¹ systel@festu.khv.ru, ² vsa_ens@mail.ru, ³ evgenmehanik@mail.ru, ⁴ pu.shoc@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается возможность использования автоматизации процесса сбора и обработки результатов процесса проведения экспериментальных исследований при нагреве проводов линии электропередачи. Целью работы является разработка технических средств измерений и программной среды, которая на основе получаемой информации от технических средств измерений позволит проводить обработку и систематизацию экспериментальных данных. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи применяемые датчики и средства сбора/обработки данных были прокалиброваны в соответствии с другими средствами измерений. *Результаты.* Предложена схема реализации проведения автоматического измерения температуры во время проведения нагрева проводов. *Выводы.* В ходе работы проведена разработка специальной системы проведения измерений температуры испытуемого провода и разработан алгоритм контроля.

Ключевые слова: линия электропередачи, температура, ток, датчик

Финансирование: договор с АО «ДРСК» НИР «Разработка методики для определения аварийно-допустимых токов для ВЛ 110 кВ» № 46/620/21 от 02.02.2021.

Для цитирования: Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Пухова А. И. Автоматизация измерений параметров режима работы проводов линий электропередачи при исследовании процесса нагрева // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 53–60. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

AUTOMATION OF MEASURING PARAMETERS OF THE OPERATING MODE OF POWER LINE WIRES WHEN STUDYING THE HEATING PROCESS

I.V. Ignatenko¹, S.A. Vlasenko², E.Yu. Tryapkin³, A.I. Pukhova⁴

^{1,2,3,4} Far Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk, Russia
¹ systel@festu.khv.ru, ² vsa_ens@mail.ru, ³ evgenmehanik@mail.ru, ⁴ pu.shoc@mail.ru

Abstract. *Background.* The work is devoted to the study of the possibility of using the automation of the process of collecting and processing the results of the process of conducting experimental research when heating the wires of the power transmission line. The aim of the work is to develop technical measuring instruments and a software environment, which, based on the information received from technical measuring instruments, will allow processing and systematization of experimental data. *Materials and methods.* To solve this problem, the used sensors and data collection / processing tools were calibrated in accordance with other measuring instruments. *Results.* A scheme for the implementation of automatic temperature measurement during the heating of wires is proposed. *Conclusions.* In the course of the work, a special system for measuring the temperature of the tested wire was developed and a control algorithm was developed.

Keywords: power line, temperature, current, sensor

Financing: contract with JSC "DRSK" R&D "Development of a methodology for determining emergency permissible currents for 110 kV overhead lines" No. 46/620/21 dated 02.02.2021.

For citation: Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Tryapkin E.Yu., Pukhova A.I. Automation of measuring parameters of the operating mode of power line wires when studying the heating process. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):53–60. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

Рост потребляемой электроэнергии во всем мире постоянно увеличивается. Увеличение размеров электроэнергетической системы связано с рядом технических ограничений, а строительство новых генераторных мощностей и линий электропередачи (ЛЭП) требует значительных капитальных вложений. Поэтому использование возможностей существующей инфраструктуры на период проведения ремонтных и аварийных работ является важным фактором в определении эффективности деятельности электроснабжающей организации.

Так, в АО «ДРСК» находится в эксплуатации оборудование с большим износом (более 40 %), хотя и ниже, чем в среднем по России. Увеличение износа каждый год будет только увеличиваться, поэтому возникает потребность в отслеживании нормальной работы существующих ЛЭП, определении режима работы, а также проверки нормативно-технической документации по объектам и формированию новых требований.

Основным элементом ЛЭП, передающим электрическую энергию на большие расстояния, является электрический провод, имеющий различные конструктивные исполнения, выполняемый из различных материалов. Определяющим в его работе является соблюдение температурного режима во время передачи мощности от генерации к потребителю. Однако существуют технологические сложности в определении всех составляющих в процессе его нагрева. Поэтому необходимо провести серию экспериментальных исследований для различных марок проводов, при этом объем проводимых измерений и получаемой информации требует значительных ресурсов для обработки.

В качестве измерительного устройства температуры провода используется датчик Далласа, установленный на внешнюю сторону кабеля. Сам процесс нагрева производится источником тока и трансформатором питания, ток от которых протекает по тросу к объекту нагрева, создавая при этом замкнутый контур. По мере нагрева необходимо поддерживать с помощью регулировки ручки ЛАТРа уровень заданного значения тока постоянным в течении всего процесса эксперимента.

Сама схема лабораторного стенда изображена на рис. 1.

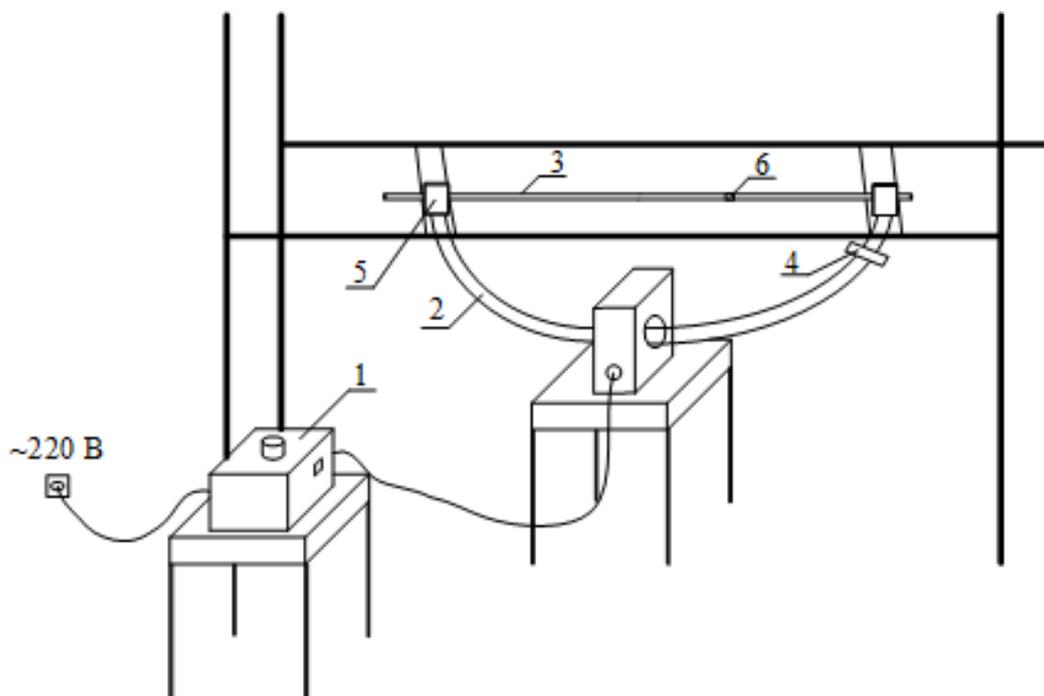


Рис. 1. Схема лабораторного стенда нагрева провода ЛЭП с возможностью регулировки по току:
 1 – источник тока; 2 – провод для создание замкнутого контура; 3 – сталеалюминевый провода ЛЭП;
 4 – токовые клещи для замеров; 5 – зажимы для соединения проводников; 6 – датчик температуры провода

Провод ЛЭП фиксируется с помощью зажимов. На контактах между проводами использовались медные кольца для лучшей проводимости.

ЛАТР и трансформатор питания поставляются в комплекте регулируемого источника тока РИТ-3000. Прибор предназначен для питания первичных цепей поверяемого и эталонного трансформаторов тока при проведении поверки.

Эксперимент проводился в два этапа.

На первом этапе производился нагрев испытуемого провода с последующим его охлаждением. Следует отметить, что, во-первых, провод ранее находился в эксплуатации, во-вторых, длина всего провода была 2 м, тогда как ток протекал только по одному метру, из-за этого в два раза увеличилась теплоемкость. Значение ток задавали равным 800, 900 и 1000 А. Время нагрева составляло 40 мин, охлаждение – 60 мин. Общее время замера составляло 100 мин.

Все эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$, ток поддерживался в процессе испытания неизменным с погрешностью 3–5 %. В процессе нагрева температура окружающего воздуха внутри помещения увеличивалась до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, что можно считать не влияющим фактором.

На втором этапе требовалось построить кривые зависимости температуры провода от времени в цикле «нагрев-охлаждение», проанализировать полученные кривые, сравнить их с математической моделью и произвести уточнение математической модели нагрева провода.

Полученные значения температур заносились в программный пакет Microsoft Excel, где строились зависимости температур от времени.

Для производства автоматизированного процесса контроля температурных и таковых параметров исследуемых проводов ЛЭП на стенде был составлен алгоритм работы программы в программном пакете National Instruments LabVIEW 19.0. производства контроля измеряемых параметров было использовано следующее оборудование: персональный компьютер (ПК) с предустановленной операционной системой Windows 7 и программным пакетом National Instruments LabVIEW 19.0; система сбора данных National Instruments cDAQ 9178; модуль сбора данных National Instruments 9205; контроллер National Instruments MYRIO 1900; маршрутизатор NETIS WF2409E; контроллер WEMOS D1 mini с источником питания; АКБ 12В; датчик тока LEM HOP 1000-SB; датчик температуры NTC 3950 100 К; датчик температуры DS18D20; термометр цифровой ТК-5; анализатор качества электрической энергии FLUKE 435.

Блок-диаграмма работы программы представлена на рис. 2.

В схеме блок диаграммы (рис. 2) программный код может быть поделен на блоки, имеющие цифровое обозначение (от 1 до 21).

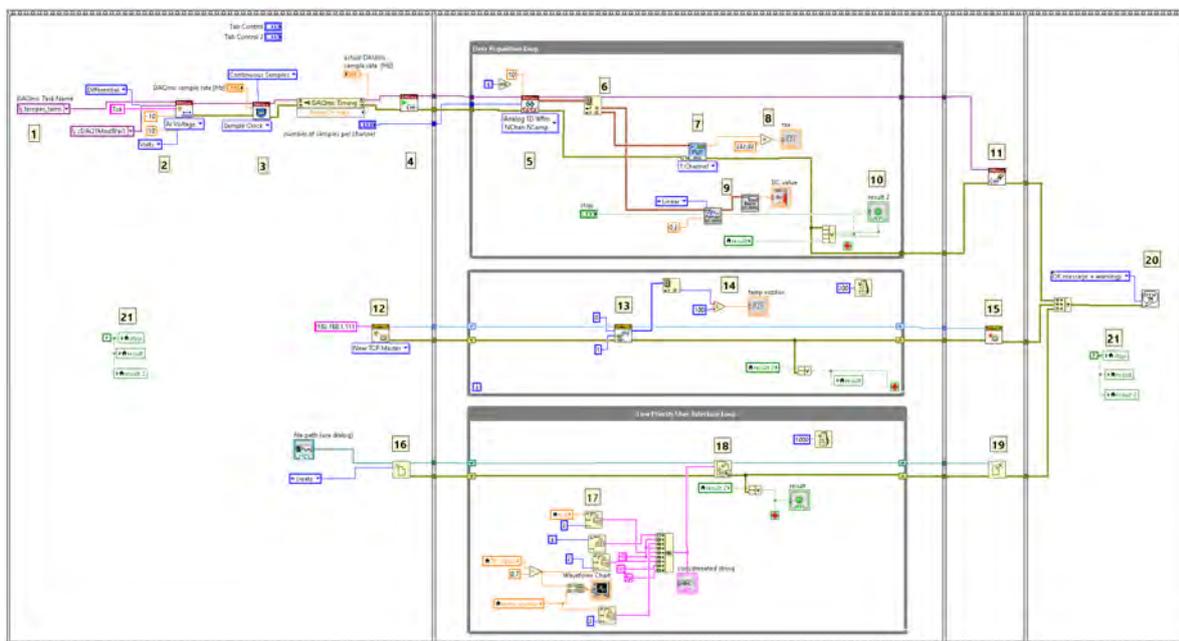


Рис. 2. Блок диаграмма работы программы автоматизированного контроля нагрева провода на испытательном стенде

В блоке 1 производится добавление в проект измерительного сигнала температуры. Температурный датчик выполнен на основе термистора NTC 3950 100 К. Диапазон измерений термистора $-50 \dots 260$ °С, значение сопротивления термистора при 25 °С 100 кОм. Схема подключения датчика температуры приведена на рис. 3.

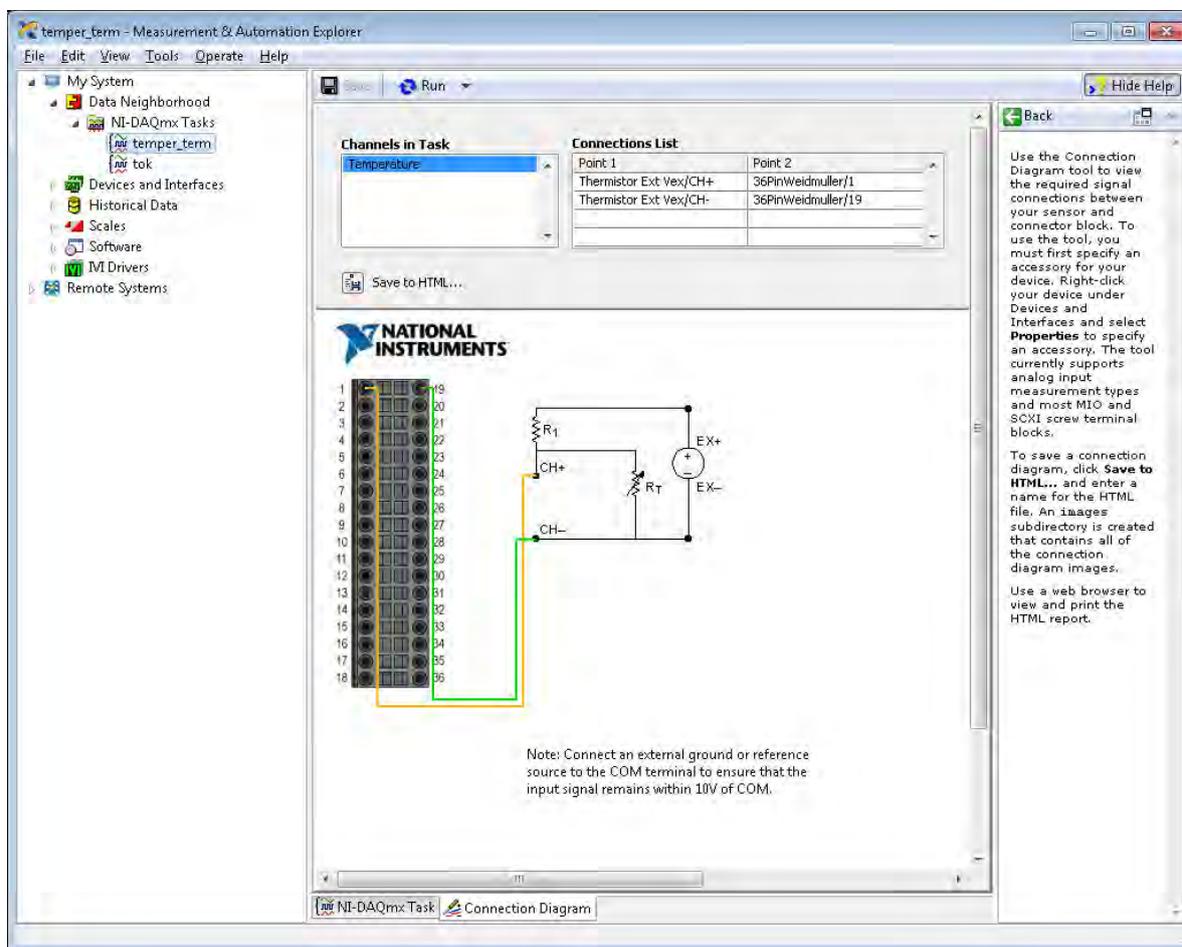


Рис. 3. Схема подключения термистора к измерительной системе

В качестве внешнего источника питания использован источник постоянного тока Tectronix PWS 4323. Для сопротивления R1 использован резистор МЛТ 4,7 кОм 0,5 Вт. Значение сопротивления резистора было измерено при температуре 25 °С и составило 4796 Ом.

Настройка измерений заключается в задании параметров элементов схемы измерения, а также кривой преобразования сопротивления термистора в температуру. Кривая задается на основании измерения его сопротивления при трех значениях температуры (взяты из паспортных значений термистора) и рассчитаны в виде коэффициентов A , B , C .

На рис. 4 отображены параметры настройки измерительной системы.

В блоке 2 приведены параметры настройки системы контроля значений тока. Ток измеряется модулем NI 9205.

Выставленные параметры: тип конфигурации входного тракта измерений – дифференциальный; диапазон измерений: $-10 \dots +10$ В; измеряемая величина – вольты. В качестве измерительного датчика тока использован датчик тока LEM HOP 1000-SB. Измерительный диапазон действующего значения тока – RMS 1000А. Измерительный диапазон мгновенного значения тока – ± 2000 А. Полная погрешность измерений при температуре -25 °С, напряжении питания $\pm 12 \dots 15$ В ≤ 2 %. Нелинейность ≤ 2 %. Выходной сигнал – ± 4 В.

В качестве источника питания ± 15 В применен контроллер NI MYRIO. Питание контроллера осуществлялось от АКБ 12В в целях уменьшения гальванически связанных цепей.

Схема подключения датчика тока приведена на рис. 5.

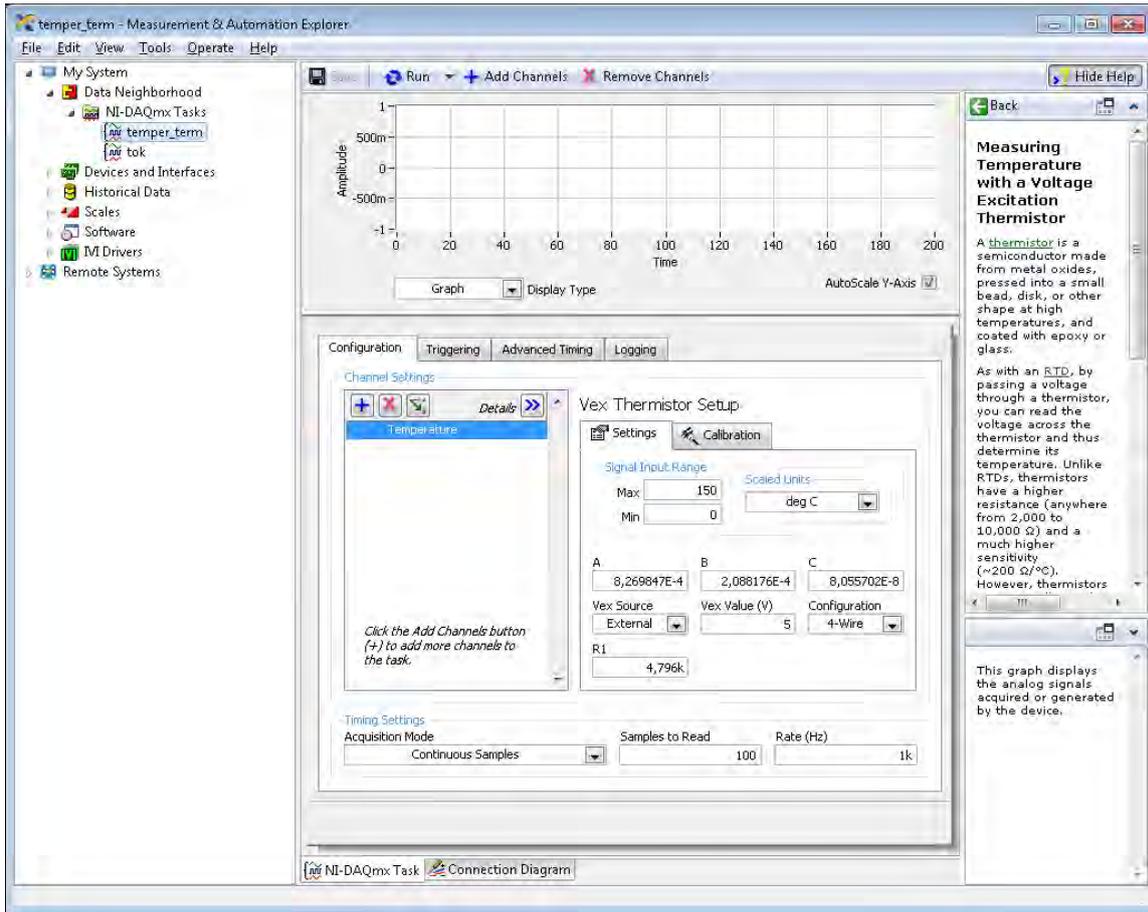


Рис. 4. Параметры настройки измерительной системы контроля температуры провода

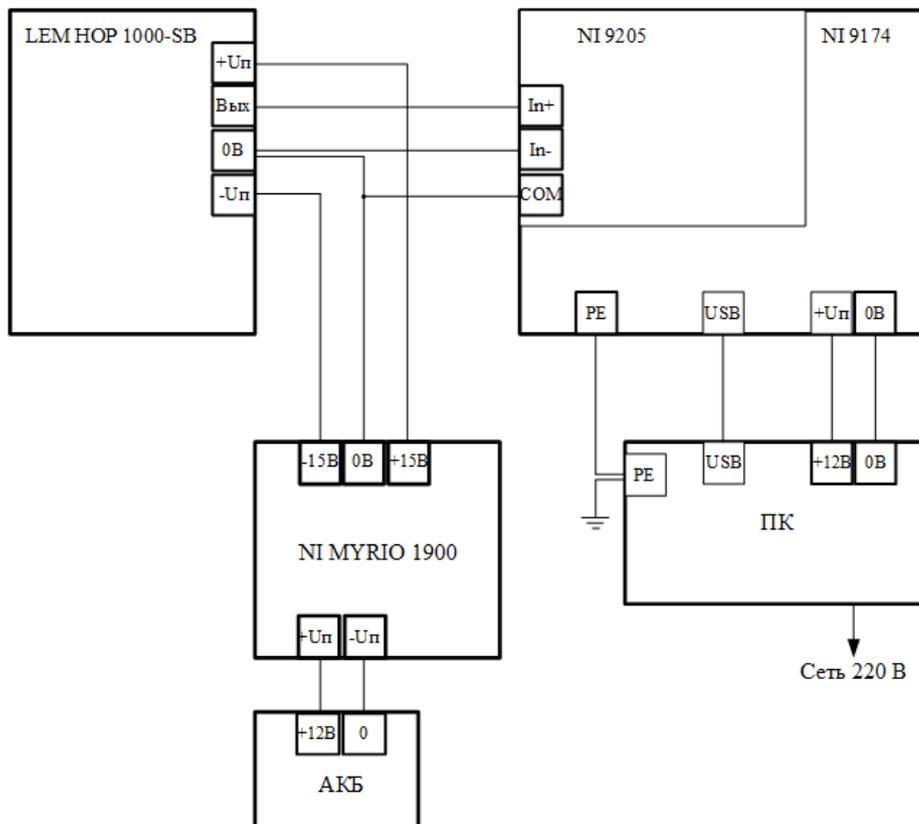


Рис. 5. Схема автоматизации контроля тока

В блоке 3 производится конфигурирование и настройка системы сбора данных. Частота считывания сигнала составила 50 000 слов/с на канал, что эквивалентно 1000 точек измерений на один период основной частоты измеряемого тока. В блоке 4 производится запуск устройства NI 9174. Количество точек в пакете для расчета сигнала равняется 10 000 на канал, что эквивалентно 0,2 с или 10 периодам основной частоты. В блоке 5 производится считывание измеряемых величин. В блоке 6 формируется в два массива измерения – массив данных температуры и массив данных тока. В блоке 7 производится расчет действующий величины значения тока за период 0,2 с.

Расчет производится стандартной библиотекой NI The Electrical Power Toolkit (EPT), процедура расчета библиотеки EPT соответствует следующим стандартам ГОСТ 30804.4.7-2013 и ГОСТ 30804.4.30-2013.

В блоке 8 производится масштабирование сигнала тока. Коэффициент масштабирования определялся в результате калибровки по значениям FLUKE 435 для токов 100 А, 200 А, 500 А, 1000 А. В результате расхождение приборов составляло не более 0,1 % от измеряемой величины в диапазоне токов 100–1000 А, и составляло менее 1 А во всем диапазоне подаваемых токов.

В блоке 9 производится расчет постоянной составляющей сигнала, вычисленный за время усреднения 0,2 с, соответствующее 10000 замерам. Последующий расчет объединяет полученные значения за период времени 1 с. Данные выводятся в виде столбчатого и цифрового индикаторов. Данные температуры соответствуют результатам периодических замеров ТК-5, расхождения не превышают 0,5 °С.

Блок 10 реализован для остановки процесса измерения от действий пользователя или при возникновении ошибки в работе программы.

Блок 11 останавливает работу измерительного оборудования в случае остановки цикла измерений.

Для контроля температуры окружающего воздуха реализована отдельная измерительная система, основанная на работе цифровых датчиков температуры Dallas DS18B20. Температурный диапазон измерений составляет $-55 +125$ °С. Напряжение питания 3,0–5,5 В. Погрешность 0,5 °С в диапазоне $-10 +85$ °С. Размещение датчика осуществлялось на высоте подвеса провода на расстоянии 0,5 м. Для приема/передачи результатов измерений был запрограммирован контроллер WEMOS D1 mini на базе процессора ESP 8266. Для исключения взаимного влияния гальванически связанных цепей передача данных от контроллера WEMOS D1 mini до ПК производилась посредством сети WIFI по протоколу MODBUS TCP. Связь осуществлялась через точку доступа NETIS WF2409E. Схема измерительной системы температуры воздуха показана на рис. 6.

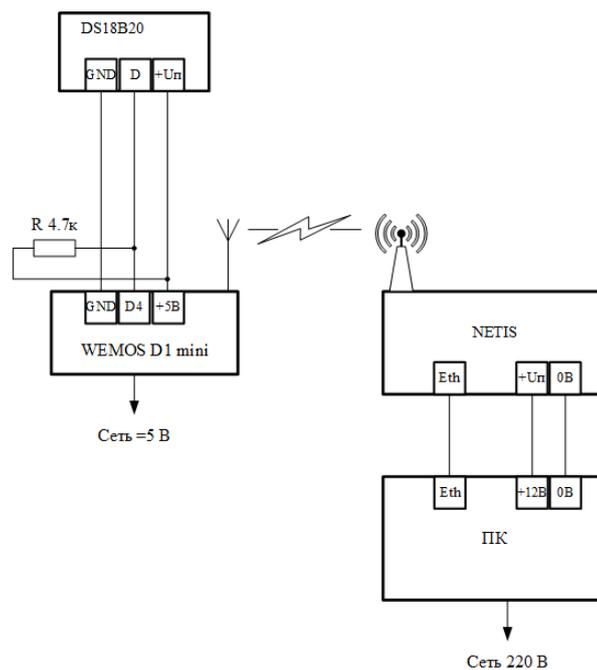


Рис. 6. Схема автоматизации измерения температуры окружающего воздуха

В блоке 12 производится конфигурирование программы опроса Master Modbus TCP. В блоке 13 производится опрос регистра хранения данных температуры. Так как переменные температуры имеют формат DBL (переменные с плавающей запятой), то в контроллере происходит их умножение на 100 (приведение к целочисленному виду) и передача в виде переменных Integer 16 бит. В блоке 14 происходит их обратное преобразование. Период обновления переменных составляет 0,2 с.

В блоке 15 происходит закрытие сессии MODBUS TCP после остановки работы программы.

В блоке 16 происходит открытие уникального файла в формате .txt для записи результатов эксперимента на жесткий диск ПК или съемный Flash-накопитель.

В блоке 17 происходит конфигурирование строки записи данных в формате таблицы, состоящей из параметров: порядковый номер замера, с; температура провода, °C; ток, А; температура воздуха, °C.

Непосредственно сама запись производится в блоке 19, период записи результатов измерений соответствует 1 с и регулируется блоком «Wait Until Next ms Multiple».

В блоке 19 производится окончание записи и обращения к записываемому файлу.

В блоке 20 реализован обработчик ошибок. В блоке 21 производится обнуление служебных переменных для синхронизации команд остановки циклов программы.

Реализованная программа позволяет автоматизировать процесс контроля измеряемых параметров, а также производить автоматическую запись результатов. Применяемые датчики и средства сбора/обработки данных были прокалиброваны в соответствии с другими средствами измерений и показали сходимость: для средств измерений тока $\pm 0,1\%$, для средств измерения температуры $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Использование разработанной системы позволит сократить объем выполняемых операций и получать структурированные экспериментальные данные о проведении нагрева проводов различных марок.

Список литературы

1. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Обеспечение работоспособности воздушных линий электропередачи путем сохранения габарита при пропуске токов повышенной величины // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4. С. 25–34.
2. Бигун А. Я. Анализ нестационарных тепловых режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена и климатических факторов // Омский научный вестник. 2018. № 1. 157 с.
3. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учетом сохранения их габарита // III Международный научно-образовательный форум «Хэйлунцзян-Приамурье»: сб. материалов Междунар. науч. конф. (Биробиджан, 3 октября 2019 г.) Биробиджан: Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, 2019. С. 663–672.
4. Шишкина А. С., Суторовский М. А., Пухова А. И., Игнатенко И. В. Особенности определения аварийно допустимых токов в линиях электропередачи // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 2021. Т. 2. С. 9–13.
5. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И. [и др.]. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях // Энергия единой сети. 2021. № 3. С. 44–53.
6. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A. Health assessment of the electrical contact-line connections in view of the operational traction load pattern of the electric rolling stock // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Novosibirsk, 22–27 мая 2020 г.). Novosibirsk, 2020. P. 012154. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012154

References

1. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pazenko N.P. [et al.]. Ensuring the operability of overhead power transmission lines by maintaining the size when passing currents of increased magnitude. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema = Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem*. 2019;(4):25–34. (In Russ.)
2. Bigun A.Ya. Analysis of non-stationary thermal modes of overhead power transmission lines taking into account the nonlinearity of heat exchange processes and climatic factors. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;(1):157. (In Russ.)

3. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pazenko N.P. [et al.]. Determination of the maximum current loads of overhead power transmission lines taking into account the preservation of their size. *III Mezhdunarodnyy nauchno-obrazovatel'nyy forum «Kheyluntszyan-Priamur'e»: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. (Birobidzhan, 3 oktyabrya 2019 g.) = III International Scientific and Educational Forum "Heilongjiang-Amur region" : collection of materials of the International Scientific Conference (Birobidzhan, October 3, 2019)*. Birobidzhan: Priamurskiy gosudarstvennyy universitet im. Sholom-Aleykhema, 2019:663–672. (In Russ.)
4. Shishkina A.S., Sugorovskiy M.A., Pukhova A.I., Ignatenko I.V. Features of determining the averagely permissible currents in power transmission lines. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. = Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century : tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* Khabarovsk, 2021;2:9–13. (In Russ.)
5. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pukhova A.I. [et al.]. Algorithm for monitoring currents in power lines under specified operating conditions. *Energiya edinoi seti = The energy of a single network*. 2021;(3):44–53. (In Russ.)
6. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A. Health assessment of the electrical contact-line connections in view of the operational traction load pattern of the electric rolling stock. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Novosibirsk, 22–27 May 2020)*. Novosibirsk, 2020:012154. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012154

Информация об авторах / Information about the authors

Иван Владимирович Игнатенко

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой систем электроснабжения,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)
E-mail: systel@festu.khv.ru

Ivan V. Ignatenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of power supply systems,
Far Eastern State Transport University
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

Сергей Анатольевич Власенко

кандидат технических наук, доцент кафедры
систем электроснабжения,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)
E-mail: vsa_ens@mail.ru

Sergey A. Vlasenko

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of power supply systems,
Far Eastern State Transport University
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

Евгений Юрьевич Тряпкин

старший преподаватель
кафедры систем электроснабжения,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)
E-mail: evgenmehanik@mail.ru

Evgeniy Yu. Tryapkin

Senior lecturer of the sub-department
of power supply systems,
Far Eastern State Transport University
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

Анастасия Игоревна Пухова

аспирант,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)
E-mail: pu.shoc@mail.ru

Anastasiya I. Pukhova

Postgraduate student,
Far Eastern State Transport University
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 10.01.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.02.2022

Принята к публикации/Accepted 17.03.2022

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ELECTROMECHANICS AND ELECTRICAL DEVICES

УДК 621.318.38

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА РУЛЕЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Э. Соловьев¹, А. В. Новаков²

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

¹ ivts.tulgu@rambler.ru, ² sanyatopor87@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является электромагнитный привод рулей малогабаритного летательного аппарата. Для проверки обеспечения необходимого качества управления рулями малогабаритного летательного аппарата в работе решена актуальная задача по составлению математической модели и моделированию электромагнитного привода рулей. Целью работы является получение математической модели, позволяющей определить его основные параметры на этапе эскизного проектирования. *Материалы и методы.* Описание процесса поведения электромагнитного привода базируется на методике, в основе которой лежит уравнение Лагранжа. В качестве обобщенных координат принято перемещение x и электрический заряд g . Для электромагнитно-механической системы составлен лагранжиан, с применением которого построено уравнение Лагранжа. *Результаты.* На основе предложенной методики показан принцип составления математической модели электромагнитного привода, состоящего из двух подпружиненных электромагнитов втяжного типа, связанных между собой жесткой механической связью. *Выводы.* Предлагаемая математическая модель процессов, протекающих в электромагнитном рулевом приводе, позволяет определить его основные параметры и может быть использована на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: электромагнит, рулевой привод, беспилотный летательный аппарат, математическая модель

Для цитирования: Соловьев А. Э., Новаков А. В. Моделирование электромагнитного привода рулей беспилотного летательного аппарата // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 61–68. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE RUDDERS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.E. Solovev¹, A.V. Novakov²

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

¹ ivts.tulgu@rambler.ru, ² sanyatopor87@gmail.com

Abstract. *Background.* The object of the study is the electromagnetic rudder drive of a small-sized aircraft. To verify the necessary quality of rudder control of a small-sized aircraft, the work solved the actual problem of compiling a mathematical model and modeling the electromagnetic rudder drive. The aim of the work is to obtain a mathematical model

to determine its main parameters at the stage of conceptual design. *Materials and methods.* The description of the electromagnetic drive behavior process is based on a technique based on the Lagrange equation. Displacement x and electric charge q are taken as generalized coordinates. For the electromagnetic-mechanical system, the Lagrangian is composed, with the application of which the Lagrange equation is constructed. *Results.* On the basis of the proposed methodology, the principle of compiling a mathematical model of an electromagnetic drive consisting of two spring-loaded electromagnets of the retractable type connected by a rigid mechanical linkage is shown. *Conclusions.* The proposed mathematical model of the processes occurring in the electromagnetic RP allows to determine its main parameters and can be used at the stage of conceptual design.

Keywords: electromagnet, steering gear, unmanned aerial vehicle, mathematical model

For citation: Solovov A.E., Novakov A.V. Simulation of the electromagnetic drive of the rudders of an unmanned aerial vehicle. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):61–68. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

На борту малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве привода рулей часто используют электромагниты втяжного типа. В этом случае рулевой привод (РП) состоит из двух электромагнитов, обеспечивающих возвратно-поступательное движение якоря [1, 2]. Угловое перемещение аэродинамического руля обеспечивается с помощью рычага, имеющего шарнирные соединения со штоками (якорями) электромагнитов (ЭМ) и осью вращения руля. Конструктивно-компоновочная схема такого РП приведена на рис. 1.

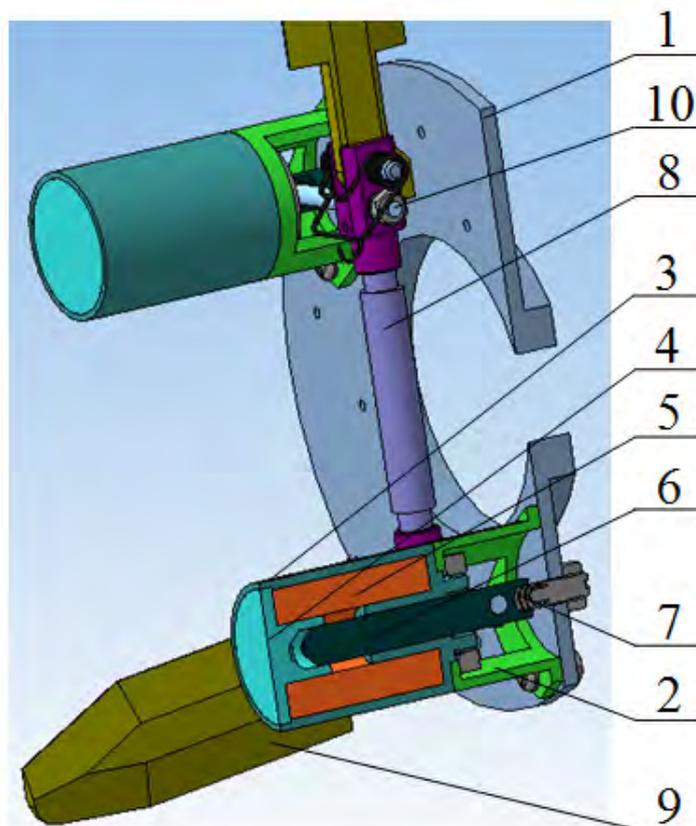


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема РП: 1 – корпус БПЛА; 2 – стойка; 3 – корпус ЭМ; 4 – стоп; 5 – обмотка; 6 – якорь; 7 – пружина; 8 – ось; 9 – руль; 10 – коромысло

На корпусе БПЛА 1 с помощью стоек 2 закреплена пара ЭМ, каждый из которых состоит из корпуса 3, стопа 4, обмотки 5 и якоря 6, соединенного с возвратной пружиной 7. Ось 8 пары рулей 9 соединена с якорями 6 с помощью коромысел 10. Расчетная схема РП приведена на рис. 2.

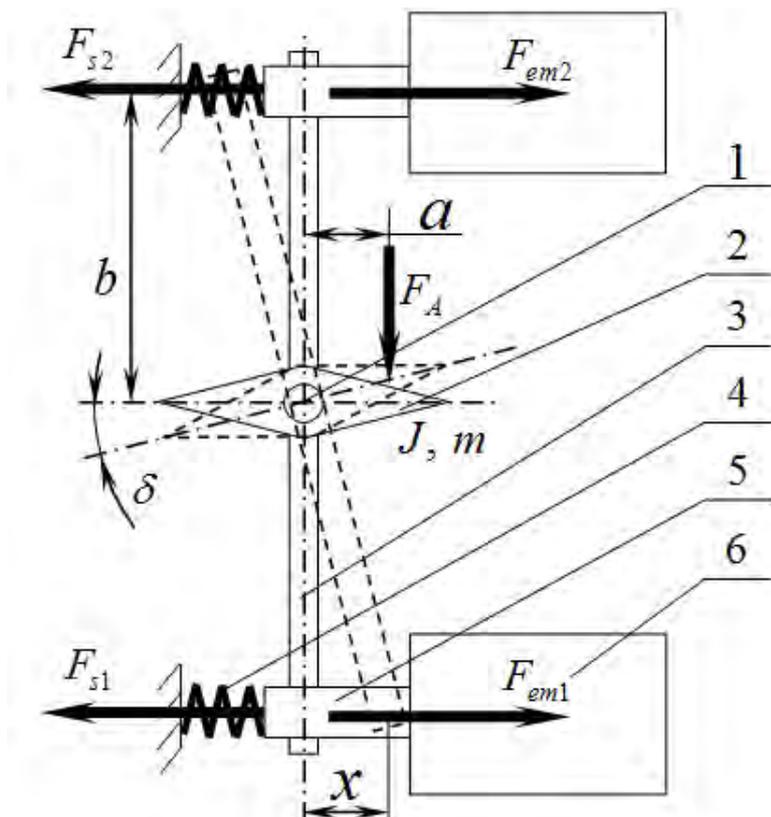


Рис. 2. Расчетная схема рулевого привода:

1 – ось руля; 2 – руль; 3 – коромысло; 4 – пружина; 5 – якорь; 6 – электромагнит

От набегающего воздушного потока на рули действует шарнирный момент, обусловленный аэродинамической силой F_A и плечом a . РП прикладывает к рулям момент, обусловленный: электромагнитной силой F_{em1} или F_{em2} одного из электромагнитов; силой упругости F_{s1} или F_{s2} одной из пружин, работающей на сжатие; и длиной коромысла b . Каждый из ЭМ обеспечивает линейное перемещение на величину x всех линейно движущихся элементов с суммарной массой m и поворот на угол δ всех вращающихся элементов с суммарным моментом инерции J . Таким образом, режимы работы ЭМ одинаковы и независимы друг от друга. Это позволяет на первом этапе ограничиться математическим описанием только одного ЭМ.

Учитывая разнородность протекающих в ЭМ физических процессов (электрических, магнитных, механических), каждый из которых описывается своей совокупностью уравнений, получение математической модели ЭМ целесообразно осуществить с помощью уравнения Лагранжа [3–7]. При этом будем считать, что геометрическая ось ЭМ совпадает с его магнитной осью и с осью приложения сил, а межвитковые емкости обмотки ЭМ пренебрежимо малы.

В этом случае в качестве обобщенных координат будут выступать перемещение x и электрический заряд g . В свою очередь лагранжиан системы Lg будет представлен в виде

$$Lg = T + W_{em} - P,$$

где $T = \frac{1}{2}(m\dot{x}^2 + J\dot{\delta}^2) = \frac{1}{2}\left(m + J\frac{1}{l^2}\right)\dot{x}^2 = \frac{1}{2}m_{pr}\dot{x}^2$ – кинетическая энергия всех подвижных частей

РП, обладающих приведенной массой m_{pr} ; $W_{em} = \frac{1}{2}(Li^2 + \Psi i)$ – электромагнитная энергия, которая запасается в обмотке ЭМ и в воздушном зазоре между якорем и стопом ЭМ (энергию, накапливаемую в прочих воздушных зазорах, будем считать пренебрежимо малой); $i = \frac{dg}{dt}$ – ток в обмотке ЭМ, являющийся, с точки зрения уравнения Лагранжа, обобщенной скоростью;

L , Ψ – индуктивность и потокосцепление обмотки ЭМ соответственно; $P = \frac{1}{2} k_s x^2$ – потенциальная энергия возвратной пружины, имеющий коэффициент упругости k_s .

С целью определения потокосцепления, величина которого меняется при изменении величины воздушного зазора x , необходимо рассмотреть картину магнитного поля, возникающего в этом зазоре. При инженерном подходе к решению указанной задачи для стопа, имеющего форму усеченного конуса (такая форма является универсальной и при необходимости легко может быть сведена к цилиндрической или конической), можно выделить четыре различных участка (рис. 3) [8].

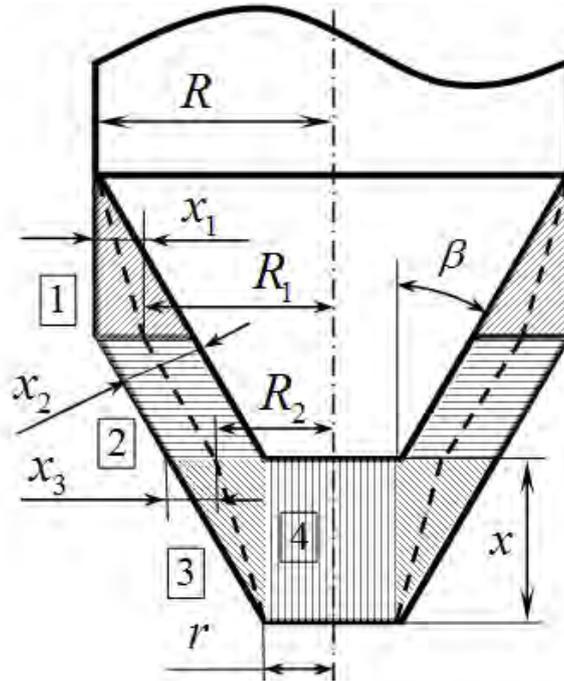


Рис. 3. Схема магнитного поля

Тогда схему замещения магнитной цепи ЭМ можно представить в виде (рис. 4), где W – количество витков обмотки ЭМ; U – напряжение на ней; l_j ($j=1..4$) – длина средней линии j -го участка магнитопровода.

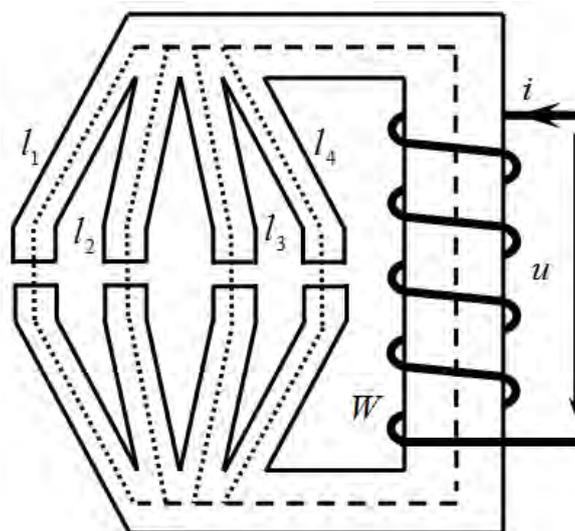


Рис. 4. Схема замещения магнитной цепи

Исходя из реальной конструкции электромагнита, длины средних линий l_j ($j=1...4$) всех для всех частей магнитопровода, определяемых различными участками магнитного поля в воздушном зазоре, будут практически одинаковы. Тогда можно получить следующую систему уравнений, описывающую магнитную цепь:

$$Hl_{mid} + H_j x_j = iW ,$$

$$\sum_{j=1}^4 \Phi_j = \Phi ,$$

где H – напряженность магнитного поля в магнитопроводе; l_{mid} – длина его средней линии; H_j , Φ_j , x_j ($j=1...4$) – напряженность магнитного поля, магнитный поток и длина участков воздушного зазора соответственно.

Разрешая эту систему относительно магнитного потока Φ , получим

$$\Phi = \mu_0 \left[(iW - Hl_{mid}) \sum_{j=1}^4 \left(\frac{S_j}{x_j} \right) \right],$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м магнитная проницаемость вакуума; S_j ($j=1...4$) площадь участков воздушного зазора.

С инженерной степенью точности эти площади целесообразно определять исходя из некой средней поверхности, показанной пунктиром на рис. 3. Тогда для каждого участка воздушного зазора получим

$$x_1 = \frac{1}{2} x \cdot \tan \beta, \quad S_1 = \pi \sqrt{x^2 + x_1^2} (2R - x_1);$$

$$x_2 = x \cdot \sin \beta, \quad S_2 = \pi \frac{R - r - 2x_1}{\sin \beta} (R + r);$$

$$x_3 = \frac{1}{2} x \cdot \tan \beta, \quad S_3 = \pi \sqrt{x^2 + x_3^2} (2r + x_3);$$

$$x_4 = x, \quad S_4 = \pi r^2.$$

С учетом соотношения $iW \gg Hl_{mid}$ выражение для потокосцепления запишется в виде

$$\Psi = \Phi W = \pi \mu_0 i W^2 \frac{\left[2 \sin \beta \sqrt{3 \cos^2 \beta + 1} - \tan \beta \right] x (R + r) + R^2 - r^2 \cos^2 \beta}{x \cdot \sin^2 \beta}.$$

Потери (рассеяние) механической и электрической энергий в РП можно записать в виде диссипативной функция Релея:

$$D = \frac{1}{2} (c \dot{x}^2 + R_{ob} i^2),$$

где c – коэффициент вязкого трения (демпфирования), определяемый прежде всего аэродинамическими процессами; R_{ob} – активное сопротивление обмотки ЭМ.

В качестве внешних сил Q_j , действующих на РП, будут выступать: приведенная аэродинамическая сила, зависящая от угла поворота руля, а значит, от перемещения x , и препятствующая этому перемещению – $F_{A_pr} = -F_A(x) \frac{a}{b}$; реакция опоры, т.е. воздействие со стороны стопа ЭМ на его якорь при ударе якоря о стоп:

$$F_r = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_{\max}, \\ k_r (|x| - x_{\max}) \operatorname{sign}(x) & \text{при } x \geq x_{\max}, \end{cases}$$

где x_{\max} – заданное максимально возможное перемещение якоря; k_r – коэффициент упругости стопа, точнее – специального немагнитного материала, тонкий слой которого наклеивается (наносится) на стоп; напряжения u_j ($j=1,2$) на обмотках каждого ЭМ.

Тогда, учитывая, что нагрузка на каждый из ЭМ одинакова, но перемещают они эту нагрузку в противоположных направлениях (т.е. $x_1 = x$ и $x_2 = -x$), проведя все необходимые вычисления в соответствии с уравнением Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial Lg}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial Lg}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j,$$

получим систему уравнений, описывающих процессы, протекающие в РП:

$$m_{pr} \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k_s x = F_r + F_{A_{pr}} - F_{em1},$$

$$m_{pr} \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} - k_s x = F_r + F_{A_{pr}} + F_{em2},$$

$$k_i \frac{di_1}{dt} + R_{ob1} i_1 + k_x \frac{dx}{dt} = u_1,$$

$$k_i \frac{di_2}{dt} + R_{ob2} i_2 - k_x \frac{dx}{dt} = u_2,$$

где $F_{emj} = \frac{1}{2} \pi \mu_0 i_j^2 W^2 \frac{r^2 \cos^2 \beta - R^2}{x^2 \cdot \sin^2 \beta}$, ($j=1,2$) – сила, развиваемая ЭМ;

$k_i = \pi \mu_0 W^2 \frac{[2 \sin \beta \sqrt{3 \cos^2 \beta + 1} - \tan \beta] x (R+r) + R^2 - r^2 \cos^2 \beta}{x \cdot \sin^2 \beta} + L$ – коэффициент, определяющий величину ЭДС в обмотке ЭМ, обусловленную изменением тока в ней;

– коэффициент, определяющий величину ЭДС в обмотке ЭМ, обусловленную скоростью движения якоря.

Результаты моделирования процессов, протекающих в РП, приведены на рис. 5. По оси ординат отложены относительные (отнесенные к максимальному значению) значения соответствующих величин.

Из результатов моделирования следует:

– электромагнитный РП является релейной системой, т.е. работающим по упорам. В момент соприкосновения якоря ЭМ с упором (немагнитной прокладкой, размещаемой на стопе) происходит удар и отскок штока, т.е. возникают биения. Биения руля (их амплитуда частота и время затухания) определяются величиной электромагнитной силы, скоростью перемещения якоря, а также материалами прокладки и якоря. Учет биений при проектировании РП необходим, так как они определяют дребезг руля, уменьшающий среднее значение угла отклонения руля при его нахождении на упоре;

– перемещение якоря «с упора на упор» сопряжено с протеканием двух процессов: первый «отлипание» якоря от первого упора – связано с нарастанием электромагнитной силы на том ЭМ, зазор которого в этот момент времени больше, чем на другом ЭМ; второй – движение руля до упора. Оба процесса обуславливают временную задержку в приводе. По результатам моделирования длительность процесса «отлипания» составляет менее 2 мс, а время переброса (движения) – 5 мс. Суммарное фазовое запаздывание на частоте функционирования (20 Гц) составит порядка 50°. Данная величина должна быть учтена в работе контура управления РП.

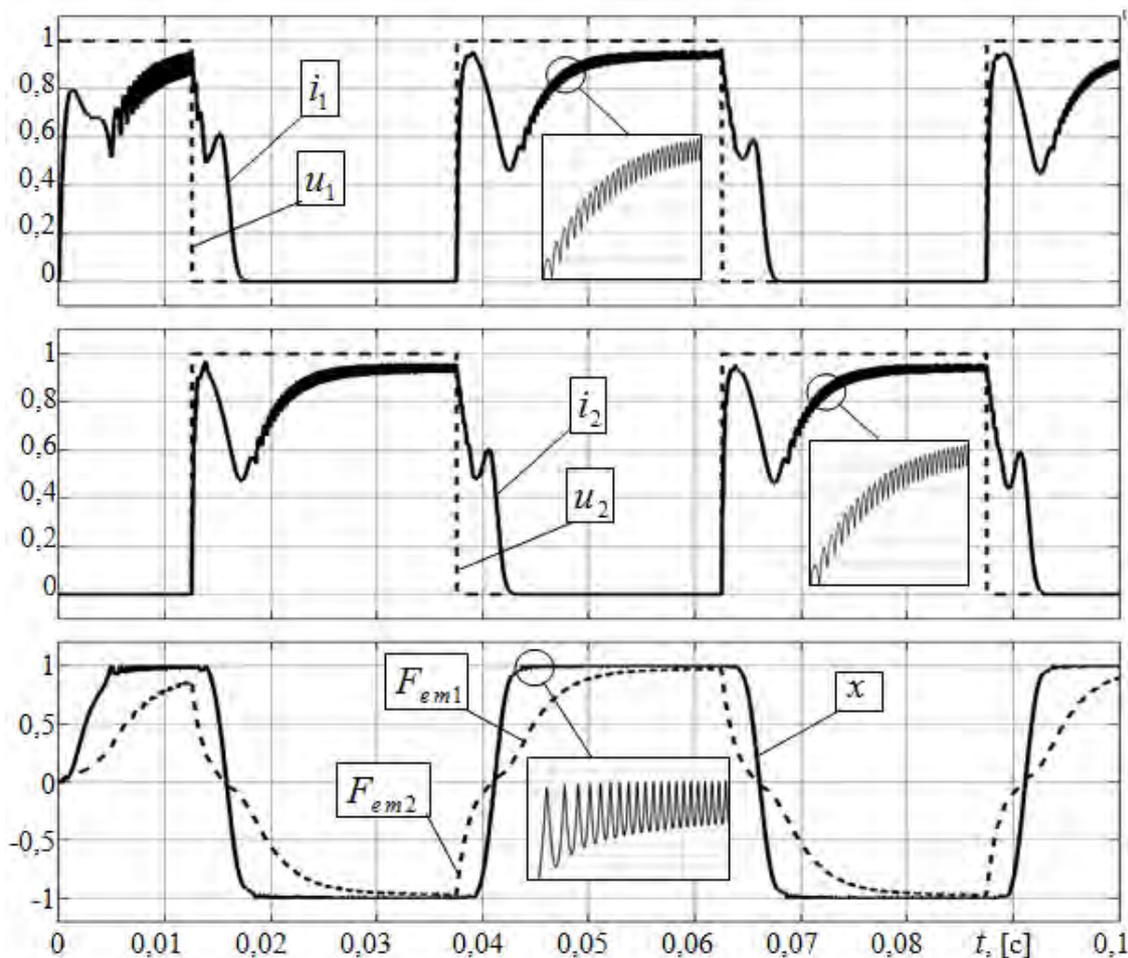


Рис. 5. Результаты моделирования процессов в РП

Таким образом, предлагаемая математическая модель процессов, протекающих в электромагнитном РП, позволяет определить его основные параметры и может быть использована на этапе эскизного проектирования.

Список литературы

1. Бушуев В. Н., Ганиев Ф. Н., Локтев Б. Е. [и др.]. Аэродинамическая компоновка и характеристики летательных аппаратов / под ред. М. Н. Нишга. М. : Машиностроение, 1991. 250 с.
2. Краснов Н. Ф. Основы прикладной аэродинамики. Т. 2. Обтекание тел вязкой жидкостью. Рулевые устройства. М. : Высш. шк., 1991. 620 с.
3. Миях А. Н., Барабанов В. А., Двойных В. В. Трехступенные электрические машины. Киев : Наукова думка, 1979. 312 с.
4. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М. ; Л. : Энергия, 1964. 528 с.
5. Соловьев А. Э., Сухинин Б. В., Сурков В. В., Козлова Е. С. Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин. Тула : Изд-во ТулГУ, 2007. 218 с.
6. Соловьев А.Э. Математические модели исполнительного двигателя с вращающимся статором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7, ч. 1. С. 153–162.
7. Соловьев А. Э., Теплова В. А. Особенности движения трехступенной электрической машины с радиально намагниченным ротором и дополнительными статорными обмотками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7, ч. 1. С. 175–183.
8. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. М. : Госэнергоиздат, 1960. 448 с.

References

1. Bushuev V.N., Ganiev F.N., Loktev B.E. [et al.]. *Aerodinamicheskaya komponovka i kharakteristiki letatel'nykh apparatov = Aerodynamic layout and characteristics of aircraft*. Moscow: Mashinostroenie, 1991:250. (In Russ.)

2. Krasnov N.F. *Osnovy prikladnoy aerodinamiki. T. 2. Obtekanie tel vyazkoy zhidkost'yu. Rulevye ustroystva = Fundamentals of applied aerodynamics. Vol. 2. Flow of bodies with a viscous liquid. Steering devices.* Moscow: Vyssh. shk., 1991:620. (In Russ.)
3. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. *Trekhstepennye elektricheskie mashiny = Three-stage electric machines.* Kiev: Naukova dumka, 1979:312.
4. Uayt D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii = Electromechanical energy conversion.* Moscow; Leningrad: Energiya, 1964:528. (In Russ.)
5. Solov'ev A.E., Sukhinin B.V., Surkov V.V., Kozlova E.S. *Giroskopicheskie privody na baze trekhstepennykh elektricheskikh mashin = Gyroscopic drives based on three-power electric machines.* Tula: Izd-vo TulGU, 2007:218. (In Russ.)
6. Solov'ev A.E. Mathematical models of an executive motor with a rotating stator. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = From the bulletin of Tula State University. Technical sciences.* 2016;7(pt.1):153–162. (In Russ.)
7. Solov'ev A.E., Teplova V.A. Features of the movement of a three-stage electric machine with a radially magnetized rotor and additional stator windings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences.* 2016;7(pt.1):175–183. (In Russ.)
8. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka = DC electromagnets.* Moscow: Gosenergoizdat, 1960:448. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Эдуардович Соловьев

доктор технических наук, доцент,
заместитель директора института,
заведующий кафедрой электротехники
и электрооборудования,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: ivts.tulgu@rambler.ru

Aleksandr E. Solov'ev

Doctor of technical sciences, associate professor,
deputy director of the institute,
head of the sub-department of electrical engineering
and electrical equipment,
Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Александр Викторович Новаков

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: sanyatorpor87@gmail.com

Aleksandr V. Novakov

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

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

Поступила в редакцию/Received 09.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 11.03.2022

Принята к публикации/Accepted 15.04.2022

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.391.31

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

3D ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕДНЫХ ТРАСС НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ И ПОЛУЧЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ В СРЕДЕ HYPERLYNX

П. А. Максимов

Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия
rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современных цифровых устройствах важным становится вопрос комплексной оценки линий передачи, представляющих собой медные трассы на печатной плате и связанные с ними конструктивные элементы. Прогнозирование их состояния, оценка создаваемых распространяющимися в них полезными и паразитными сигналами электромагнитных волн и их взаимное влияние друг на друга посредством моделирования играет существенную роль при оценке работоспособности изделия. *Материалы и методы.* Параметры используемых препрегов и ядер, проводящих элементов стека печатной платы, геометрические параметры медных трасс, характеристики выводов размещаемых на плате электронных компонентов, математический аппарат программы HyperLynx. *Результаты.* Установлено, что в условиях производства современных электронных устройств и печатных плат для них, в том числе работающих в высокочастотных диапазонах, на качество их работы могут влиять самые различные факторы: стек печатной платы и параметры используемых материалов, электромагнитное излучение, формируемое мощными элементами схемы, внешнее излучение, геометрия проводников, их совместное расположение на слоях печатной платы, другие параметры. В работе показано, что с целью максимального снижения возможных рисков, связанных с различными физическими явлениями и возникающими паразитными параметрами, необходимо проведение моделирования работы печатной платы, комплексно учитывающее взаимные параметры ее элементов, и их влияния как минимум на самые критичные участки. Определены S-параметры выделенного участка печатной платы, в частности параметр S_{11} , который является основным при оценке возможных переотражений в группе медных трасс в полосе до 10 ГГц. *Вывод.* Выполненные исследования позволяют по итогам моделирования снизить влияние факторов, вызванных неудачной геометрией медных трасс и расположением электронных компонентов, негативным образом сказывающихся на параметрах передаваемых сигналов.

Ключевые слова: медная трасса, печатная плата, 3D электромагнитное моделирование, надежность, HyperLynx

Для цитирования: Максимов П. А. 3D электромагнитное моделирование медных трасс на печатной плате и получение s-параметров в среде HyperLynx // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 69–74. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

3D ELECTROMAGNETIC MODELING OF COPPER TRACKS ON PRINTEC CIRCUIT BOARD AND EXTRACTION OF S-PARAMETERS IN HYPERLYNX

P.A. Maksimov

Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia
rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* In modern digital devices, the issue of a comprehensive assessment of transmission lines, which are copper tracks on a printed circuit board and associated structural elements, becomes more and more important. Predicting their behavior, assessing the electromagnetic waves generated by useful and parasitic signals propagating in them and their mutual influence on each other through modeling plays an essential role in assessing the performance of a product. *Materials and methods.* Geometric parameters of copper tracks, characteristics of electronic components placed on the board and the density of their mounting with a constant increase in operating frequencies and a decrease in supply voltages can significantly affect the electromagnetic environment, the parameters of transmitted pulses and the operation of internal microcircuit nodes, leading to instant or delayed, periodic in time failures different types of criticality. *Results.* The paper shows that in order to minimize possible risks associated with various physical phenomena and the resulting parasitic parameters of the printed circuit board materials, it is necessary to simulate its operation, taking into account the possible parameters of the materials used and their effect on at least the most critical areas – printed wiring, places installation of microcircuits and other radioelements. The S-parameters of the selected section of the printed circuit board are determined, in particular, the S_{11} parameter, which is the main parameter when assessing possible multiple reflections in a group of copper paths in the band up to 10 GHz. *Conclusions.* The performed studies allow us to exclude, based on the results of modeling, the factors caused by the unsuccessful geometry of copper routes and the location of electronic components that negatively affect the parameters of the transmitted signals.

Keywords: copper tracks, Printed circuit board, 3D electromagnetic modelling, reliability, HyperLynx

For citation: Maksimov P.A. 3D electromagnetic modeling of copper tracks on printed circuit board and extraction of s-parameters in HyperLynx. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):69–74. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

Введение

Современные печатные платы являются сложными устройствами, при изготовлении которых необходимо учитывать множество различных эффектов и параметров используемых материалов, их взаимной структуры в пределах печатного узла¹ [1–3], что в свою очередь подразумевает ряд возможных дефектов, влияющих на их надежность [4].

С увеличением плотности монтажа, увеличением рабочих частот и уменьшением используемых напряжений электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость различных элементов печатной платы становится важным условием, в ряде случаев определяющим применение тех или иных элементов либо конструктивных решений, от которых в конечном счете зависит целостность сигналов в линиях передачи на печатной плате и надежная работа всех электронных элементов.

Сложные устройства могут состоять из десятка крупных микросхем – мощных вычислительных устройств и источников, преобразователей питания, соединенных между собой множеством линий передач, представленных в виде медных трасс и соединяющих их на разных слоях переходных отверстий, а также полигонами питания и земли, которые могут как занимать площадь всего отдельно взятого слоя, так и представлять из себя некоторую геометрию, параметры которой были заложены разработчиком исходя из необходимых требований к решению задачи [5–7].

В современной практике оценка электромагнитных параметров печатной платы производится после ее изготовления путем проведения испытаний, а также связанного ряда измерений, направленных на выявление отклонений в формах сигналов и определения уровня оказывающего негативное влияние электромагнитного фона, формирующегося непосредственно от различных элементов печатной платы. Такой подход не позволяет своевременно выявить ошибки на этапе проектирования, что при условии невозможности просчитать все особенности разработанной печатной платы, влечет за собой редкие и периодические сбои в работе части электронных узлов печатной платы.

Современное программное обеспечение позволяет проводить моделирование печатной платы и отдельных элементов ее топологии, производя анализ различных ее параметров. Несмотря на то, что ни один вид моделирования не позволяет достичь абсолютно достоверных результатов, тем не менее оно позволяет быстро, без готового изделия и измерительного оборудования провести анализ печатной платы и сделать соответствующие перерасчеты элементов – их замены, изменения в топологии и конструкции печатной платы.

¹ ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.

Описание свойств и функционала моделируемого объекта

Посредством моделирования можно провести общую оценку влияния некоторых параметров материалов [8, 9], геометрии ее элементов [10, 11], на параметры функционирования печатной платы до этапа изготовления опытного образца с целью прогнозирования их влияния на работу изделия.

Для проведения моделирования с учетом электромагнитного излучения была выбрана разработанная ячейка защиты информации, видоизменяющая проходящие через нее данные, тем самым скрывая их истинное значение от предполагаемого противника (рис. 1).

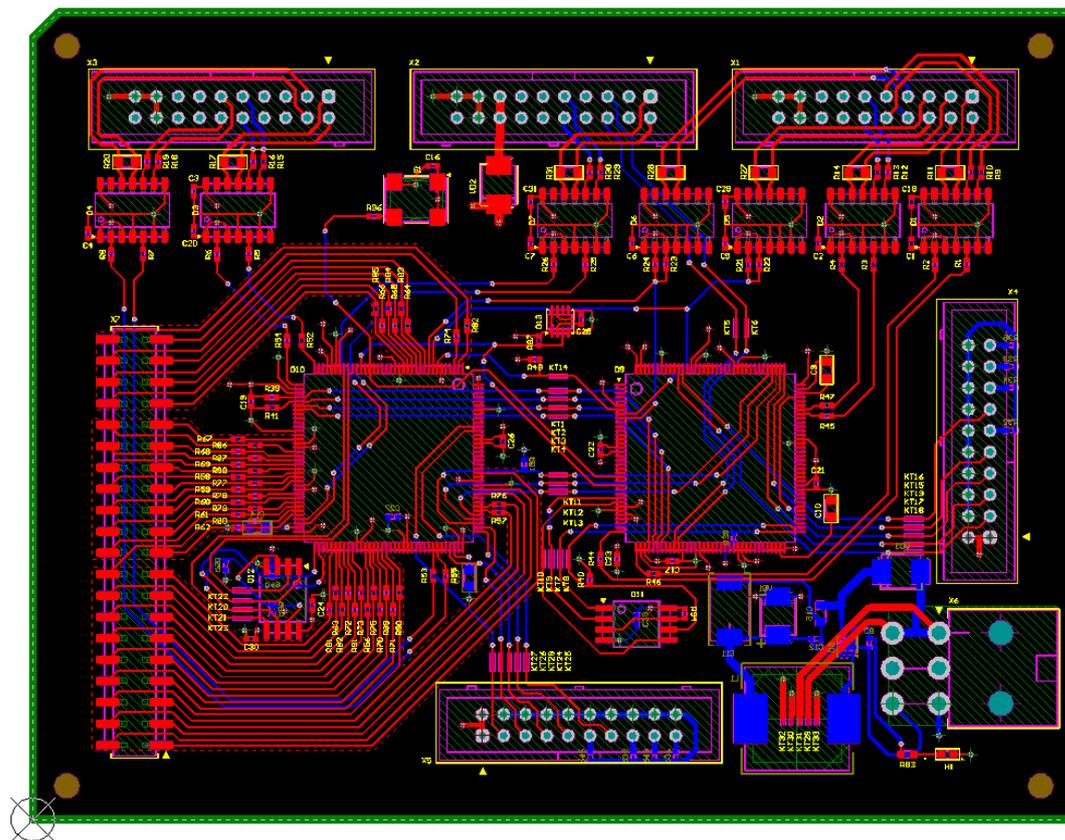


Рис. 1. Внешний вид печатной платы ячейки защиты информации, используемой для моделирования

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

Методика проведения моделирования

Полное трехмерное электромагнитное моделирование, основанное на разбиении всех элементов проекта на примитивы с последующим решением сложных электромагнитных уравнений, определяющих искомые величины, является наиболее точным и вместе с тем весьма затратным средством, позволяющим получить перечень параметров, предельно точно описывающих разрабатываемое устройство.

Имеющаяся модель печатной платы загружается в программу HyperLynx, где происходит последовательная настройка параметров стека в соответствии с типичными для применяемых

классов материалов, а также выбор моделей объектов и установка других необходимых настроек. По итогам выполненного моделирования производится оценка полученных результатов.

Моделирование топологии ячейки

Несмотря на то, что непреобразованные данные не выходят из ячейки посредством линий передачи, их высокочастотные составляющие могут излучаться за пределы линий передачи на печатной плате в виде электромагнитных волн и приниматься антеннами, выдавая первичные сигналы и нивелируя функциональное назначение ячейки.

Для проведения моделирования в качестве линий, по которым распространяются «первичные данные», были выбраны линии интерфейса FSMC, идущие от соединителя «X2» до микроконтроллера «D10».

Для экономии времени моделирования была использована введенная в HyperLynx функция экспортирования в пакет 3D Full Wave Solver только части исходного проекта, наиболее интересная с точки зрения поставленных задач. На рис. 2 можно видеть полученный после четырех часов работы программы выбранный для моделирования участок печатной платы в виде набора из четырех слоев, проводящих дорожек и переходных отверстий, смонтированных элементов и их составных частей.

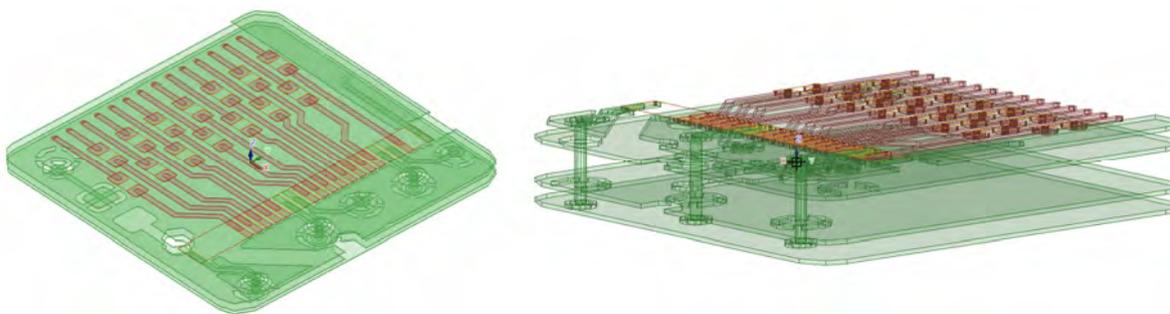


Рис. 2. Внешний вид участка печатной платы после завершения 3D электромагнитного моделирования

На полученных в пакете 3D Full Wave Solver графиках параметра (рис. 3, 4) S_{11} (мощность и фаза отраженного сигнала) можно отметить, что в выбранных линиях и связанных с ними проводящих структурах происходит отражение волн на частотах примерно в 4 и 6 ГГц, что относительно сигнала частотой в 100 МГц говорит об излучениях, проявляющих себя преимущественно на фронтах импульсов, в которых сосредоточены верхние гармоники спектра сигнала.

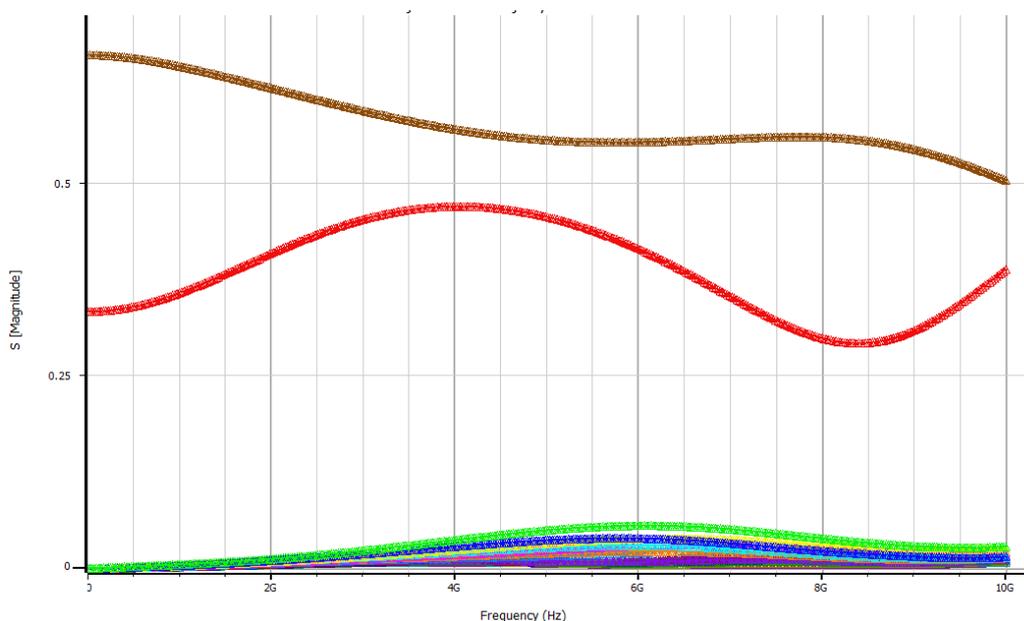


Рис. 3. Графики амплитуд параметра S_{11} (коэффициент отражения) по итогам моделирования

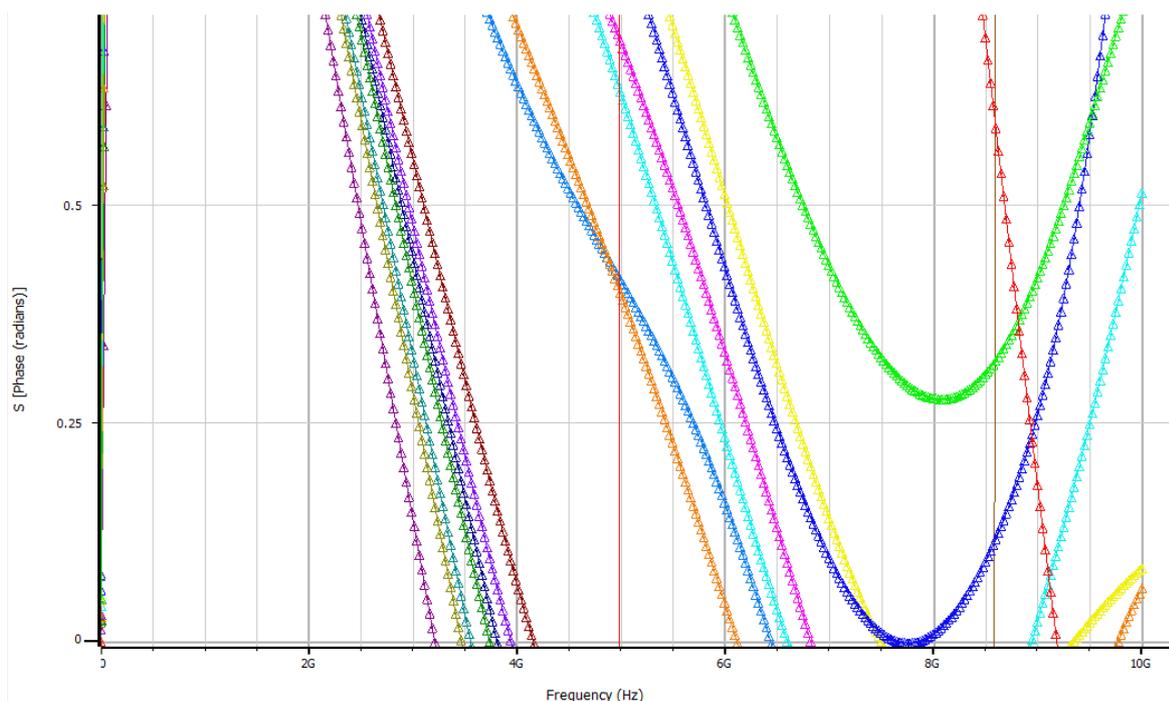


Рис. 4. Графики фаз параметра S_{11} (коэффициент отражения) по итогам моделирования

Наличие графических интерпретаций мощности и фазы отраженных волн позволяет судить об обстановке вокруг выбранного участка схемы, а также о предполагаемой форме искажений импульсов и их значимости с точки зрения оценки надежности разработанного устройства.

Заключение

Проведено моделирование печатной платы ячейки защиты информации в программе HyperLynx с учетом влияния электромагнитного излучения. Получены S -параметры выделенных линий передачи в полосе до 10 ГГц, учитывающие как сами линии, контактные площадки элементов подключения, переходные отверстия, так и параметры диэлектрика слоев стека печатной платы и параметры свободного пространства. Приведены изображения полученного набора слоев печатной платы в пакете 3D Full Wave Solver и графики распределения по частоте значений параметра S_{11} , определяющего мощности и фазы возникающих в линиях отражений. Произведен анализ результатов по итогам моделирования.

Список литературы

1. Юрков Н. К. Технология производства электронных средств. СПб. : Лань, 2021.
2. Жигалов А. Т., Котов Е. П., Шихаев К. Н., Хохлов Б. А. Конструирование и технология печатных плат : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1973.
3. Гриднев В. Н. [и др.]. Анализ проектирования многослойных печатных плат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018.
4. Данилова Е. А. Классификация дефектов печатных плат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013.
5. Johnson H. W., Graham M. High-Speed Digital Design. PTR Prentice Hall, 1993.
6. Трундов А. В. Практические рекомендации по проектированию высокоскоростных печатных плат. Сохранение целостности электрических сигналов и электропитания. М., 2020.
7. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. NJ : Prentice Hall PTR, 2003.
8. Yu Zheng. Secrets of Signal Integrity [M]. Beijing : Mechanical Industry Press, 2013.
9. Ni Tao. Signal Integrity Analysis and Simulation of High-Speed Digital Circuits [D]. Xi'an : Xidian University, 2010.
10. Zhang Haifeng. HyperLynx Simulation and PCB Design [M]. Beijing : Mechanical Industry Press, 2005.
11. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx // Electronic Devices. 2009. Vol. 32. P. 445–451.

References

1. Yurkov N.K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv = Technology of electronic means production*. Saint Petersburg: Lan', 2021. (In Russ.)
2. Zhigalov A.T., Kotov E.P., Shikhaev K.N., Khokhlov B.A. *Konstruirovaniye i tekhnologiya pechatnykh plat: ucheb. posobie = Design and technology of printed circuit boards : textbook*. Moscow: Vyssh. shk., 1973. (In Russ.)
3. Gridnev V.N. [et al.]. Analysis of the design of multilayer printed circuit boards. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018. (In Russ.)
4. Danilova E.A. Classification of PCB defects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013. (In Russ.)
5. Johnson H.W., Graham M. *High-Speed Digital Design*. PTR Prentice Hall, 1993.
6. Trundov A.V. *Prakticheskie rekomendatsii po proektirovaniyu vysokoskorostnykh pechatnykh plat. Sokhraneniye tselostnosti elektricheskikh signalov i elektropitaniya = Practical recommendations for the design of high-speed printed circuit boards. Preserving the integrity of electrical signals and power supply*. Moscow, 2020. (In Russ.)
7. Brooks D. *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2003.
8. Yu Zheng. *Secrets of Signal Integrity [M]*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
9. Ni Tao. *Signal Integrity Analysis and Simulation of High-Speed Digital Circuits [D]*. Xi'an: Xidian University, 2010.
10. Zhang Haifeng. *HyperLynx Simulation and PCB Design [M]*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.
11. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx. *Electronic Devices*. 2009;32:445–451.

Информация об авторах / Information about the authors**Павел Андреевич Максимов**

инженер-программист,

Пензенский научно-исследовательский

электротехнический институт

(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: agdvs8880@gmail.com

Pavel A. Maksimov

Software engineer,

Penza Research Electrotechnical Institute

(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**The authors declare no conflicts of interests.****Поступила в редакцию/Received 28.12.2021****Поступила после рецензирования/Revised 26.01.2022****Принята к публикации/Accepted 3.03.2022**

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

УДК 004.934

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-10

СПОСОБ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

**А. К. Алимуратов¹, А. Ю. Тычков², П. П. Чураков³,
А. В. Баранова⁴, Д. С. Дудников⁵**

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov.pp@gmail.com,
⁴anastasiyabar@mail.ru, ⁵dmitriy.s.gmpf@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выбор и обоснование оптимального набора информативных параметров речевых сигналов зависит от используемых методов обработки и корректного анализа полученных результатов. Целью работы является повышение эффективности обработки речевых сигналов за счет расширения пространства информативно-значимых амплитудных, временных, частотных и энергетических характеристик речи посредством применения адаптивных методов частотно-временного анализа. *Материалы и методы.* В работе использовалась уникальная технология разложения нестационарных данных на частотные составляющие, не требующая априорной информации об анализируемом сигнале – декомпозиция на эмпирические моды. Программная реализация способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). *Результаты.* Разработан способ обработки речевых сигналов на основе метода декомпозиции на эмпирические моды. Суть способа заключается в равномерном делении исходного речевого сигнала на фрагменты, декомпозиции фрагментов на эмпирические моды и формировании модовых речевых сигналов. Проведены исследование способа и анализ полученных результатов: количества эмпирических мод, разности между исходным и реконструированным сигналами, времени формирования модовых речевых сигналов. *Выводы.* В соответствии с полученными результатами исследования выявлено, что разработанный способ в действительности обеспечивает расширение пространства информативно-значимых характеристик за счет формирования набора новых модовых речевых сигналов с минимальной ошибкой. Обеспечено необходимое и достаточное значение разности между исходным и реконструированным сигналами – не более 0,001 В. Разработанный способ может успешно использоваться при формировании оптимального набора параметров речи для обнаружения и классификации естественно выраженных психоэмоциональных состояний человека.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, декомпозиция на эмпирические моды, психоэмоциональное состояние человека, эмоции

Для цитирования: Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Баранова А. В., Дудников Д. С. Способ обработки речевых сигналов на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 75–89. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-10

EMD-BASED TECHNIQUE FOR SPEECH SIGNAL PROCESSING

**A.K. Alimuradov¹, A.Yu. Tychkov², P.P. Churakov³,
A.V. Baranova⁴, D.S. Dudnikov⁵**

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia
¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov.pp@gmail.com,
⁴anastasiyabar@mail.ru, ⁵dmitriy.s.gmpf@gmail.com

Abstract. *Background.* Being selected and validated, the optimal set of speech signal informative parameters depends on the used processing methods and accurate evaluation of the results obtained. The purpose of the work is to enhance the efficiency of speech signal processing by expanding the space for informatively significant amplitude, time, frequency, and energy speech characteristics via the use of adaptive time-frequency analysis methods. *Materials and methods.* A unique technology for decomposing non-stationary data into frequency components, namely, empirical mode decomposition, when no a priori information regarding the analyzed signal is needed, has been used. The software implementation of the method has been performed in ©MATLAB (The MathWorks, Inc.) mathematical modeling environment. *Results.* A technique for speech signal processing based on the empirical mode decomposition has been developed. The proposed technique is based on the uniform splitting of the original speech signal into fragments, the empirical mode decomposition of the fragments, and the formation of mode speech signals. The technique has been investigated, and the following obtained results have been analyzed: the number of empirical modes, the difference between the original and reconstructed signals, and the time duration of mode speech signal formation. *Conclusions.* Based on the obtained research results, it has been revealed that the developed technique actually provides an expansion of the space for informatively significant characteristics due to the formation of a set of new mode speech signals with a minimum error. The necessary and sufficient difference between the original and reconstructed signals of less than 0.001 V has been provided. The developed technique can be efficiently used in the formation of an optimal set of speech parameters for detecting and classifying naturally expressed human psycho-emotional states.

Keywords: speech signal processing, empirical mode decomposition, human psycho-emotional state, emotions

For citation: Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Baranova A.V., Dudnikov D.S. EMD-based technique for speech signal processing. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):75–89. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-10

Введение

Речь представляет собой сложный акустический сигнал, образуемый речевым аппаратом человека с целью языкового общения [1]. Цифровая обработка речевых сигналов – это область современной науки, в рамках которой решаются следующие задачи: изменение формы представления информации из звуковой в электрическую, фильтрация (линейная и адаптивная) шума, усиление, сегментация на информативные участки, извлечение информативных параметров, кодирование, сжатие, восстановление и др. [2]. Каждая задача может быть решена с применением различных способов и подходов, которые в зависимости от области обработки следует разделить на временные, частотные и частотно-временные [3].

Обработка во временной области основана на анализе только характерных дискретных отсчетов речевого сигнала, в качестве которых могут использоваться максимумы и минимумы функции речевого сигнала, а также моменты пересечения функции с нулевой осью во времени. Обработка в частотной области основана на анализе абсолютно всех дискретных отсчетов, зарегистрированных в речевом сигнале. К основным недостаткам обработки во временной области относятся зависимость от уровня шума в речевом сигнале и смещения нулевого уровня, что приводит к неоднозначности выделения характерных анализируемых дискретных отсчетов. К основным недостаткам обработки в частотной области относятся большие вычислительные затраты и низкая адаптивность к локальным свойствам функции речевого сигнала (низкое спектральное разрешение). Частотно-временная обработка включает в себя все преимущества временной и частотной обработки речевых сигналов с минимальными проявлениями их недостатков.

На сегодняшний день наибольшую популярность в решениях задач по обработке речевых сигналов получили частотно-временные способы и подходы, основанные на преобразовании Фурье и вейвлет преобразовании [4]. Преимуществом данных решений является возможность разложения исследуемых речевых сигналов на составляющие для последующего детализированного анализа.

Физический смысл преобразования Фурье заключается в представлении исходного анализируемого сигнала в виде суммы гармонических колебаний с разными частотами [5]. Параметры каждой гармонической составляющей вычисляются прямым преобразованием, а сумма гармонических составляющих – обратным преобразованием. В области цифровой обработки речевых сигналов преобразование Фурье широко используются для преобразования функции сигнала из временной области в частотную с разложением его на частотные составляющие.

Физический смысл вейвлет-преобразования заключается в разложении исходного анализируемого сигнала на масштабированные и сдвинутые по оси времени версии функции вейвлета [6]. В результате получаемый набор коэффициентов отражает, насколько поведение исходного сигнала в данный момент времени похоже на поведение функции вейвлета на данном масштабе. Таким образом, вейвлет-коэффициенты отражают близость исходного сигнала к вейвлету данного масштаба. Чем ближе вид анализируемого сигнала в окрестности данного момента времени к виду вейвлета, тем большее абсолютное значение имеет соответствующий коэффициент.

В области цифровой обработки речевых сигналов вейвлет-преобразование обладает существенными преимуществами по сравнению с преобразованием Фурье. Это следует из возможности анализировать кратковременные локальные особенности сигналов, например, короткие всплески или провалы, разрывы и ступеньки функции и т.д. Недостатком вейвлет-преобразования является необходимость априорных сведений об анализируемом сигнале для корректного подбора функции вейвлета.

В последнее время широкое практическое применение в решениях задач по обработке речевых сигналов получило преобразование Гильберта – Хуанга [7], в основе которого заложен метод декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) [8]. ДЭМ – это уникальная технология разложения на частотные составляющие, не требующая априорной информации об анализируемом сигнале. Метод ДЭМ и ее модификации широко используются в различных областях, связанных с обработкой и анализом нестационарных и нелинейных сигналов: природные явления [9–11], биотехнологии [12–14], медицина [15–17], анализ данных и машинное обучение [18, 19] и др. Методы ДЭМ активно применяются в приложениях по обработке речевых и акустических сигналов:

- определение высоты звука [20];
- идентификация диктора по голосу [21];
- акустический анализ [22];
- обработка и подавление шума в речи [23] и др.

В данной статье представлен способ обработки речевых сигналов, в котором используется метод ДЭМ. Предлагаемый способ основан на равномерном делении исходного речевого сигнала на фрагменты, декомпозиции фрагментов на эмпирические моды (ЭМ) и формировании модовых речевых сигналов. Суть формирования модовых речевых сигналов заключается в расширении пространства информативно-значимых амплитудных, временных, частотных и энергетических характеристик исходного сигнала, необходимых для дальнейшей обработки.

Статья является результатом научной работы коллектива авторов [24, 25], посвященной исследованию и поиску скрытых особенностей речевых сигналов, формированию оптимального набора параметров, релевантных естественно выраженным эмоциям человека посредством применения новых адаптивных методов частотно-временного анализа. Научные исследования выполняются при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ, проект «Исследование скрытых паттернов речевых сигналов и разработка способов обнаружения и классификации естественно выраженных психоэмоциональных состояний человека», № МД-1066.2022.4.

Статья состоит из шести разделов. Во втором представлено краткое описание разновидностей методов ДЭМ, их преимущества и недостатки. Третий и четвертые разделы посвящены описанию и исследованию предлагаемого способа. Последние два раздела посвящены анализу результатов исследования, выводам и перспективам.

Декомпозиция на эмпирические моды

Эффективность поиска и формирования оптимального набора параметров речевых сигналов, релевантных естественно выраженным эмоциям человека зависит от адаптивности и возможностей применяемых методов частотно-временного анализа. Применение метода ДЭМ и ее модификаций в исследованиях эмоциональной речи началось сравнительно недавно, учитывая, что ДЭМ была разработана в 1998 г. [26–29]. Большинство авторов не проводят исследований по расширению пространства информативно-значимых характеристик речи и анализируют только исходные сигналы, содержащие естественно выраженные эмоции. В настоя-

щее время наблюдается недостаточное количество научных работ, в которых прослеживается полный цикл: расширение пространства информативно-значимых характеристик речи с помощью методов ДЭМ и поисковые исследования релевантного набора амплитудных, временных, частотных и энергетических параметров естественно выраженных эмоций.

В результате разложения методом ДЭМ исходный сигнал представляет собой набор внутренних функций, называемых модами или ЭМ. Отличительной особенностью процесса разложения методом ДЭМ является то, что базисные функции, используемые при разложении, извлекаются непосредственно из исходного сигнала. Таким образом, математическая модель ЭМ не задается заранее, а вычисляется в процессе отсеивания. Такой способ разложения обеспечивает адаптивность базисным функциям, позволяющую учитывать локальные особенности (экстремумы и нули функции сигнала) и особенности внутренней структуры исходного сигнала (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.).

Подробный анализ известных методов ДЭМ, применяемых для анализа сигналов естественной природы, выявил, что наиболее адаптивными к нестационарной речи являются: множественная ДЭМ (МДЭМ) [30] и улучшенная полная МДЭМ с адаптивным шумом (ПМДЭМАШ) [31]. С точки зрения отсеивания ЭМ методы МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ аналогичны. Добавление контролируемого шума малой амплитуды на каждом этапе отсеивания (для создания новых экстремумов) позволяет избежать известных недостатков декомпозиции (смешивание мод, неполнота декомпозиции, остаточный шум, неинформативные «паразитные» моды):

$$x_j(n) = x(n) + w(n), \quad (1)$$

где $x_j(n)$ – зашумленные сигналы; $w_j(n)$ – белый шум малой амплитуды;

$$x_j(n) = \sum_{i=1}^I IMF_{ji}(n) + r_{ji}(n), \quad (2)$$

$$IMF_i(n) = \sum_{j=1}^J \frac{IMF_{ji}(n)}{J}, \quad (3)$$

$$r_i(n) = \sum_{j=1}^J \frac{r_{ji}(n)}{J}, \quad (4)$$

где $IMF(n)$ – ЭМ; $r(n)$ – конечный неделимый остаток; $i = 1, 2, \dots, I$ – количество ЭМ.

Важными параметрами настройки методов МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ, влияющими на результат разложения, являются: $Nstd$ – стандартное отклонение амплитуды добавляемого белого шума (в процентном отношении от исходного сигнала), NR – количество реализаций (для дальнейшего усреднения), $MaxIter$ – количество итераций отсеивания ЭМ, $SNRFlag$ – отношение сигнал/шум для каждого этапа разложения (только для метода улучшенной ПМДЭМАШ).

На рис. 1 представлен результат разложения вокализованного участка речи длительностью 100 мс. Разложение осуществлено посредством метода улучшенной ПМДЭМАШ ($Nstd = 20\%$, $NR = 500$, $MaxIter = 1000$, $SNRFlag = 2$ – отношение сигнал/шум одинаковое на всех этапах разложения). Для удобства визуализации значения горизонтальных (дискретные отсчеты времени) и вертикальных осей (амплитуда, В) осциллограмм в правом столбце автоматически масштабированы и не обозначены. В левом столбце значения горизонтальных (частота, Гц) и вертикальных осей (магнитуда, дБ) спектральных плотностей мощности также не обозначены и масштабированы автоматически.

В соответствии с рис. 1 в результате разложения вокализованного участка речи получено восемь мод (ЭМ1–ЭМ8). Каждой ЭМ соответствует определенный частотный диапазон. Исходя из этого, можно сделать вывод, что метод улучшенной ПМДЭМАШ функционирует как набор фильтров, осуществляя фильтрацию от высокочастотного к низкочастотному диапазону.

Из полученных мод можно выделить информативные (ЭМ1–ЭМ5) и компенсирующие (ЭМ6–ЭМ8). Первые относятся к полезной информации сигнала и характеризуются большей энергией. Вторые являются результатом неточности математического аппарата декомпозиции и характеризуются незначительной энергией (не более 5 % от общей энергии исходного сигнала).

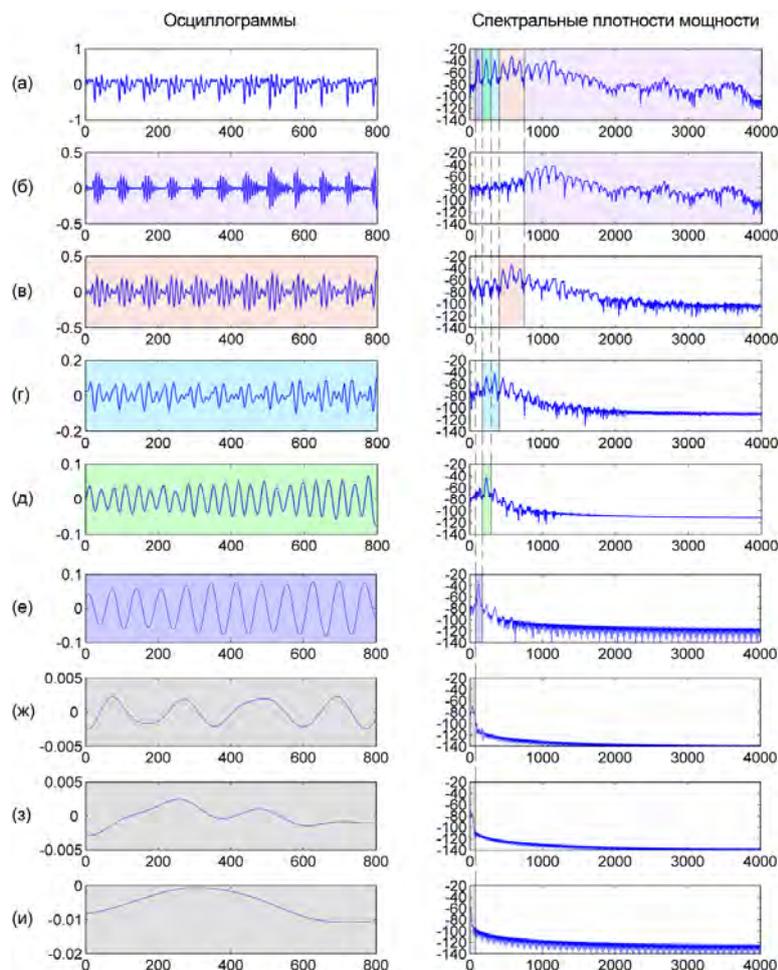


Рис. 1. Результат разложения участка вокализованной речи с помощью метода улучшенной ПМДЭМАШ

На рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий полноту разложения и последующую реконструкцию исходного сигнала по информативным модам (ЭМ1–ЭМ5). Максимальная разность между исходным и реконструированным сигналам составляет 0,0149 В, что является незначительным.

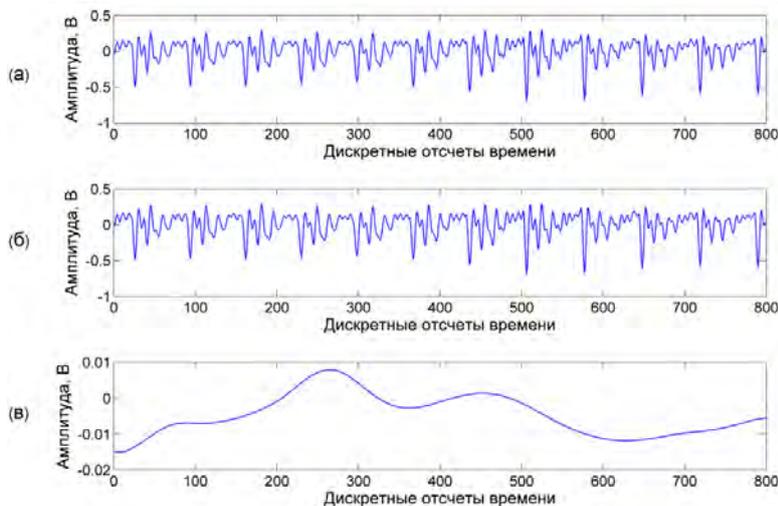


Рис. 2. Обеспечение полноты разложения и реконструкция сигнала по информативным ЭМ:
a – исходный речевой сигнал; *б* – реконструированный сигнал;
в – разность между исходным и реконструированными сигналами

Основным недостатком, ограничивающим широкое практическое применение методов ДЭМ в реальном времени, является продолжительность процедуры декомпозиции. Продолжительность процедуры и результат декомпозиции напрямую зависят от длительности анализируемого сигнала. Чем длительнее анализируемый сигнал, тем продолжительнее процедура декомпозиции, и наоборот. Также длительность анализируемого сигнала влияет на полноту разложения, то есть частотно-избирательные свойства – количество и качество получаемых информативных и компенсирующих ЭМ.

Описание способа обработки

Предлагаемый способ основан на равномерном делении исходного речевого сигнала на фрагменты, декомпозиции фрагментов на ЭМ и формировании модовых речевых сигналов. Рассмотрим подробнее этапы способа обработки речевых сигналов.

Фрагментирование представляет собой процесс линейного разделения исходного речевого сигнала $x(n)$ на отрезки одинаковой длительности, которые записываются в отдельные переменные $x_s(n)$. Далее каждый фрагмент исходного сигнала обрабатывается как отдельный кратковременный речевой сигнал. Линейное разделение речевого сигнала на фрагменты осуществляется по следующим формулам:

$$S = \frac{x(n)}{L}, \quad (5)$$

где S – количество фрагментов в исходном речевом сигнале; L – количество дискретных отсчетов времени в одном фрагменте;

$$x_{s+1}(n) = x[(sL) + 1 : (s+1)L], \quad (6)$$

где $s = 0, 1, 2, \dots, S$ – номер фрагмента.

Для экономии вычислительных ресурсов и повышения скорости обработки в предлагаемом способе фрагментирование осуществляется без перекрытия [3].

Исследование влияния длительности анализируемых фрагментов речи на частотно-избирательные свойства методов ДЭМ представлено в работе [32]. В соответствии с результатами исследования сделан вывод, что для корректного частотно-временного анализа кратковременных речевых сигналов на основе методов ДЭМ длительность анализируемых фрагментов речи должна быть не менее 30 мс. Оптимальной же длительностью, при которой частотно-избирательные свойства декомпозиции обеспечивают необходимую и достаточную полноту разложения, является 50 мс и выше. В предлагаемом способе реализована возможность изменения длительности фрагментов в диапазоне от 10 до 1000 мс.

Как отмечалось ранее, наиболее адаптивными к нестационарной речи являются методы МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ. Отличительной особенностью метода улучшенной ПМДЭМАШ является возможность локального разложения белого шума на шумовые ЭМ параллельно с разложением исходного сигнала. Использование шумовых мод в качестве добавляемого контролируемого белого шума на каждом этапе декомпозиции обеспечивает полноту разложения.

В предлагаемом способе реализована возможность выбора методов ДЭМ, МДЭМ и улучшенная ПМДЭМАШ, в том числе возможность изменения параметров настройки декомпозиции: Nstd, NR, MaxIter и SNRFlag.

Суть формирования модовых речевых сигналов заключается в расширении пространства информативно-значимых амплитудных, временных, частотных и энергетических характеристик исходного сигнала. Расширение информативного пространства обеспечивается за счет формирования новых модовых речевых сигналов. Каждый модовый сигнал содержит в себе особенности внутренней структуры исходного речевого сигнала (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.).

В соответствии с результатом декомпозиции каждый фрагмент исходного речевого сигнала представлен набором ЭМ. Формирование модовых сигналов представляет собой процесс объединения ЭМ фрагментов исходного речевого сигнала:

$$xmode_i(n) = \sum_{s=1}^S IMF_{s,i}[(sL) + 1 : (s+1)L], \quad (7)$$

где $xmode_i(n)$ – модовый речевой сигнал; $i = 1, 2, \dots, I$ – количество ЭМ для каждого фрагмента.

Количество сформированных модовых речевых сигналов зависит от количества используемых информативных ЭМ, полученных для каждого фрагмента. На рис. 3 представлен пример процесса формирования четырех модовых речевых сигналов.

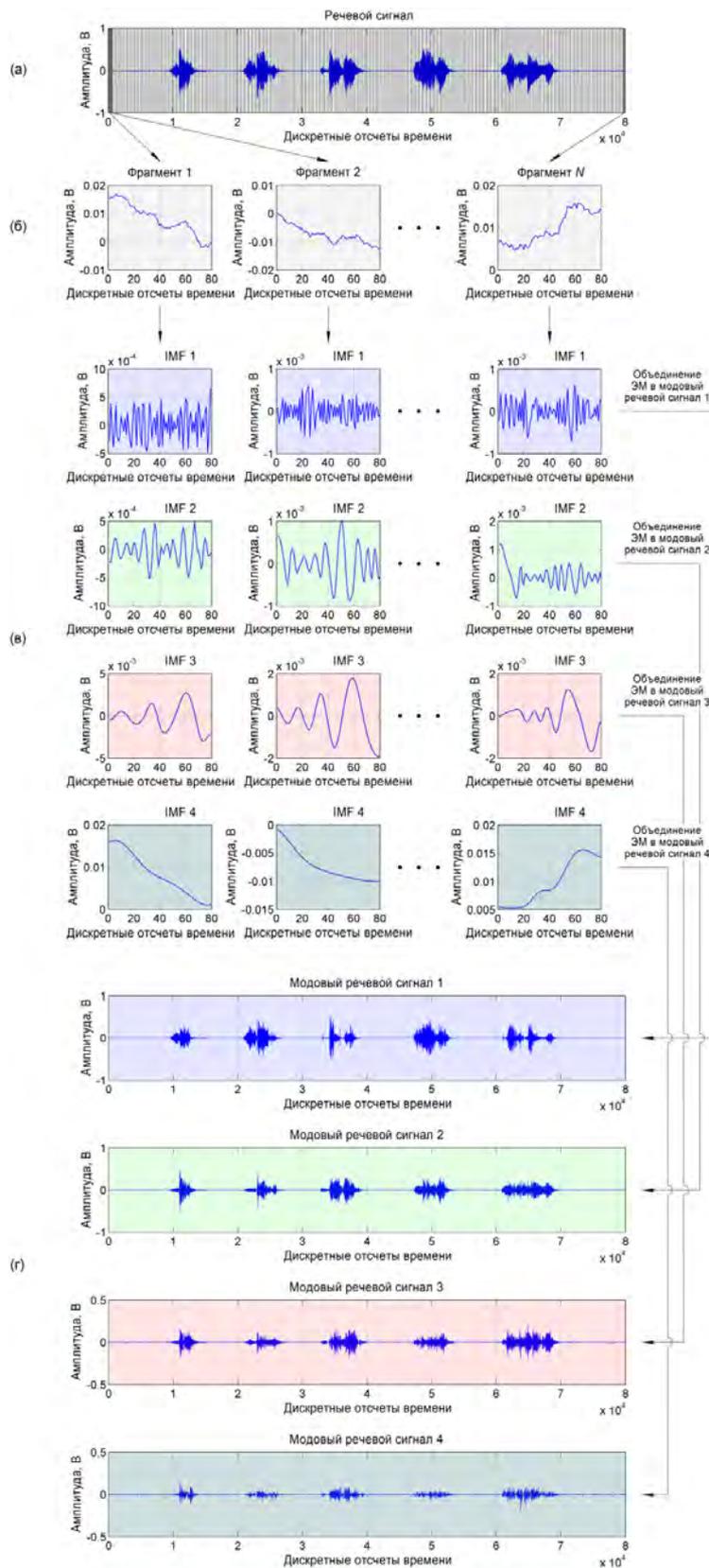


Рис. 3. Процесс формирования четырех модовых речевых сигналов: *a* – исходный речевой сигнал; *б* – фрагменты речевого сигнала; *в* – информативные ЭМ фрагментов; *г* – модовые речевые сигналы

Исследование способа обработки

В табл. 1 представлены настраиваемые и исследуемые параметры способа обработки речевых сигналов на основе методов ДЭМ.

Таблица 1

Настраиваемые и исследуемые параметры способа обработки речевых сигналов на основе методов ДЭМ

Настраиваемые параметры	Исследуемые параметры
Длительность анализируемых фрагментов (мс): 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500, 1000, 2000	Среднее значение количества ЭМ
Метод декомпозиции: ДЭМ, МДЭМ, улучшенная ПМДЭМАШ	Разность между исходным и реконструированным сигналами (В)
Параметры МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ: NR (в размах) – 5, 50; MaxIter (в размах) – 10, 100	Время формирования набора модовых речевых сигналов (сек)

Для исследования сформирована речевая база данных. Речевые сигналы длительностью не более 10 с были зарегистрированы посредством специализированных методики и технических средств. Подготовленные дикторы в количестве 20 человек воспроизводили речь на русском языке, содержащую публицистический текст (30 записей), текст из литературного произведения (30 записей) и счет чисел от 0 до 100 (10 записей).

Для разложения исходного сигнала методами МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ в рамках исследования изменялись следующие параметры: NR = 5 и 50, MaxIter = 10 и 100. Параметры Nstd = 20 % и SNRFlag = 2 оставались неизменными. Реализация методов ДЭМ в программе Matlab была заимствована из работы [33].

В табл. 2–4 и на рис. 4–6 представлены усредненные результаты исследования способа обработки сигналов сформированной речевой базы данных.

Таблица 2

Среднее значение количества ЭМ

Метод декомпозиции	Длительность анализируемых фрагментов, мс								
	10	30	50	100	200	300	500	1000	2000
ДЭМ	4,55	5,92	6,67	7,69	8,90	9,67	10,45	11,50	13,80
МДЭМ (NR = 50, MaxIter = 100)	4,70	6,37	7,21	8,37	9,62	10,55	11,45	13,10	14,80
МДЭМ (NR = 5, MaxIter = 10)	4,57	5,98	6,72	7,74	8,84	9,45	10,30	11,80	13,00
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 50, MaxIter = 100)	4,55	5,97	6,67	7,70	8,88	9,55	10,70	11,70	13,60
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 5, MaxIter = 10)	4,50	5,84	6,53	7,54	8,54	9,24	9,90	11,00	12,20

Таблица 3

Разность между исходным и реконструированным сигналами

Метод декомпозиции	Длительность анализируемых фрагментов, мс								
	10	30	50	100	200	300	500	1000	2000
ДЭМ	0,0041731	0,0036321	0,0025682	0,001734	0,0013033	0,0010556	0,00055186	0,00030492	0,0002728
МДЭМ (NR = 50, MaxIter = 100)	0,00397	0,0014323	0,00086711	0,00032802	0,00027326	0,00013162	0,000064407	0,000014068	0,000037316
МДЭМ (NR = 5, MaxIter = 10)	0,0038898	0,0033819	0,0018001	0,0015028	0,00095801	0,00049735	0,00027791	0,0002972	0,00024455
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 50, MaxIter = 100)	0,0040564	0,0037643	0,0025106	0,0016722	0,0012479	0,00081638	0,00061309	0,00037565	0,0002948
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 5, MaxIter = 10)	0,0040455	0,0034429	0,0018636	0,0014704	0,0012904	0,00075916	0,00089567	0,00035437	0,00028948

Таблица 4

Время формирования набора модовых речевых сигналов

Метод декомпозиции	Длительность анализируемых фрагментов, мс								
	10	30	50	100	200	300	500	1000	2000
ДЭМ	68,99	33,43	25,41	19,03	14,89	13,38	15,48	18,26	27,45
МДЭМ (NR = 50, MaxIter = 100)	2879,84	1636,91	1237,90	897,68	737,65	665,91	696,42	918,02	1345,55
МДЭМ (NR = 5, MaxIter = 10)	261,97	125,29	96,11	70,58	49,99	43,20	35,28	30,13	30,65
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 50, MaxIter = 100)	6261,58	3412,03	2562,38	1789,33	1469,13	1325,50	1387,61	1623,22	2402,96
Улучшенная ПМДЭМАШ (NR = 5, MaxIter = 10)	622,73	326,28	249,22	168,75	123,62	110,99	117,86	100,44	124,19

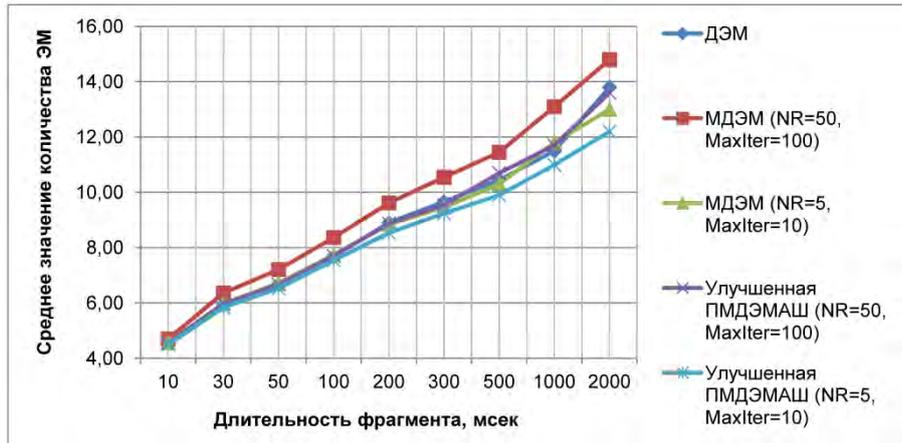


Рис. 4. Среднее значение количества ЭМ

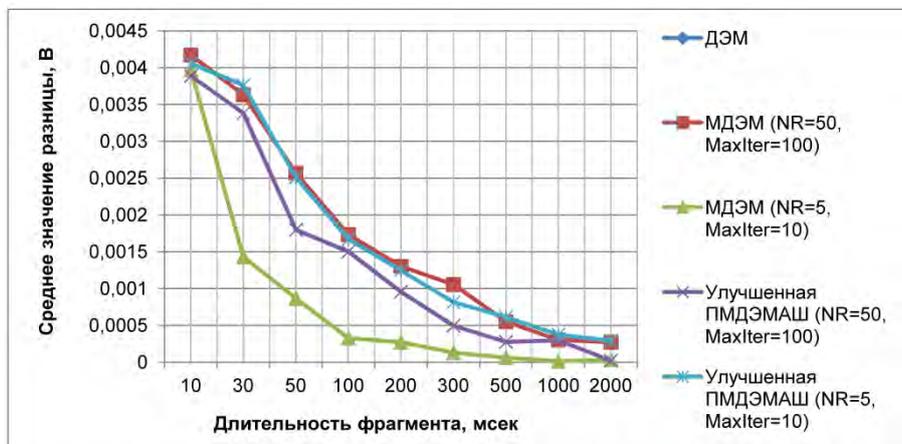


Рис. 5. Разность между исходным и реконструированным сигналами

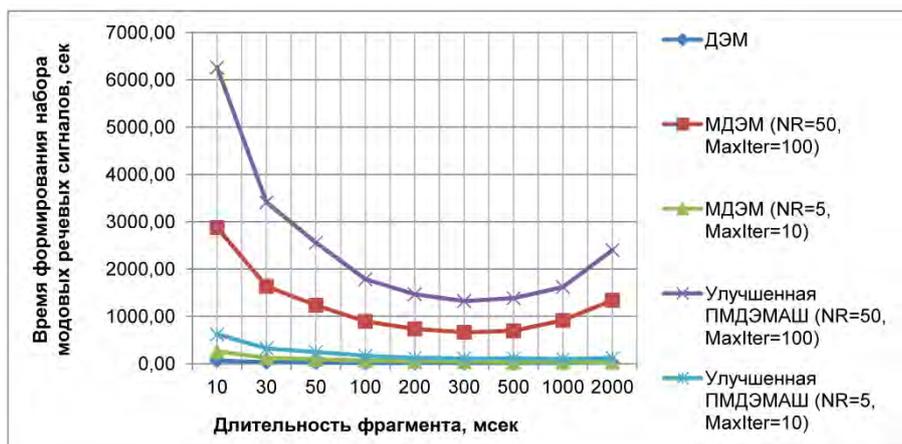


Рис. 6. Время формирования набора модовых речевых сигналов

Анализ результатов исследования

Для корректной оценки результатов исследования необходим совокупный анализ полученных значений среднего количества ЭМ, разности между исходным и реконструированным сигналами и времени формирования набора модовых речевых сигналов. Данная необходимость объясняется тем, что каждый настраиваемый и исследуемый параметры оказывают непосредственное влияние друг на друга. Например, метод и параметры декомпозиции, а также длительность анализируемых фрагментов влияют на количество получаемых ЭМ, которые

в свою очередь влияют на процесс формирования модовых сигналов и разность между исходным и реконструированным сигналами. Каждый настраиваемый параметр также влияет на итоговое время, необходимое для формирования набора модовых речевых сигналов.

В соответствии с условиями совокупного анализа и полученными результатами, представленными в табл. 2–4 на рис. 4–6, определены следующие оптимальные значения параметров:

1) длительность анализируемого фрагмента – 300 мс. В этом случае необходимо минимальное время для формирования набора модовых речевых сигналов (табл. 4, рис. 6);

2) количество ЭМ – от 8 до 10. В этом случае обеспечивается необходимая и достаточная полнота разложения (табл. 2, рис. 4);

3) разность между исходным и реконструированным сигналами – не более 0,001 В (т.е. не более 0,1 %). В этом случае обеспечивается минимальная ошибка при формировании набора модовых речевых сигналов (табл. 3, рис. 5).

Учитывая, что способ основан на методах ДЭМ, целесообразным является анализ влияния метода и параметров декомпозиции на результат формирования набора модовых речевых сигналов. Необходимая и достаточная полнота разложения (оптимальное количество ЭМ с округлением в большую сторону) обеспечивается всеми методами ДЭМ при анализе фрагментов длительностью от 50 до 500 мс. Однако, учитывая значения разности между исходным и реконструированным сигналами (0,00049735 В) и времени формирования набора модовых речевых сигналов (43,20 сек), оптимальным (но не самым быстрым) является метод МДЭМ (NR = 5, MaxIter = 10). Минимальная ошибка при формировании набора модовых речевых сигналов (оптимальное значение разности между исходным и реконструированным сигналами) обеспечивается всеми методами декомпозиции при анализе фрагментов длительностью от 500 мс. Минимальное время для формирования набора модовых речевых сигналов обеспечивается методом ДЭМ.

Сравнивая значения времени формирования набора модовых речевых сигналов, можно сделать следующие однозначные выводы:

1) для обработки речевых сигналов в реальном времени способ должен быть основан на методе ДЭМ;

2) для постобработки речевых сигналов способ может быть основан на методах МДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ (декомпозиции с добавлением контролируемого шума малой амплитуды);

3) для постобработки речевых сигналов, предпочтительно использовать метод улучшенной ПМДЭМАШ с оптимальными значениями NR = 50, MaxIter = 100.

Заключение

Подводя итоги анализа результатов исследований, можно сделать следующие выводы:

1) предлагаемый способ обработки речевых сигналов на основе методов ДЭМ в действительности обеспечивает расширение пространства информативно-значимых амплитудных, временных, частотных и энергетических характеристик. Это обеспечивается за счет формирования с минимальной ошибкой набора новых модовых речевых сигналов, содержащих в себе особенности внутренней структуры исходного речевого сигнала (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.);

2) способ за счет расширения пространства информативно-значимых характеристик исходных речевых сигналов может успешно использоваться при формировании оптимального набора параметров речи, релевантных естественно выраженным эмоциям человека.

В перспективе коллективом авторов планируется провести дополнительное исследование влияния смешивания ЭМ, неполноты декомпозиции, остаточного шума и неинформативных «паразитных» ЭМ на формирование набора модовых речевых сигналов.

Список литературы

1. Фант Г. К. Акустическая теория речеобразования : пер. с англ. Л. А. Варшавского, В. И. Медведева ; науч. ред. В. С. Григорьева. М. : Наука, 1964. 284 с.
2. Михайлов В. Г., Златоусова Л. В. Измерение параметров речи / под ред. М. А. Сапожникова. М. : Радио и связь, 1987. 168 с.
3. Алимуратов А. К., Чураков П. П. Обзор и классификация методов обработки речевых сигналов в системах распознавания речи // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 2. С. 27–35.

4. Huang X., Acero A., Hon H.-W. Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development. New Jersey : Prentice Hall, 2001. 980 p.
5. Ли У. А., Нейбург Э. П., Мартин Т. Б. [и др.] Методы автоматического распознавания речи : в 2 кн. ; пер. с англ. / под ред. У. Ли. М. : Мир, 1983. Кн. 1. 328 с.
6. Клетт Д. Х., Барнет Дж. А., Бернштейн М. И. [и др.] Методы автоматического распознавания речи : в 2 кн. ; пер. с англ. / под ред. У. Ли. М. : Мир, 1983. Кн. 2. 392 с.
7. Huang E. Huang, Samuel S.P. Shen. Hilbert-Huang Transform and its application. Interdisciplinary mathematical sciences // Interdisciplinary Mathematical Sciences. World Scientific Publishing Company. 2005. Book 5. 324 p.
8. Huang N. E., Zheng Sh., Steven R. L. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society of London. 1998. Vol. 454. P. 903–995.
9. Mi X., Liu H., Li Y. Wind speed prediction model using singular spectrum analysis, empirical mode decomposition and convolutional support vector machine // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 80. P. 196–205.
10. Wu Z., Schneider E., Hu Z., Cao L. The impact of global warming on ENSO variability in climate records // Tech. report, Cent. Ocean. Stud. 2001. Vol. 110. 25 p.
11. Lee T., Ouara D. B. M. J. Multivariate Nonstationary Oscillation Simulation of Climate Indices With Empirical Mode Decomposition // Water Resources Research. 2019. Vol. 55, № 6. P. 5033–5052.
12. Labate D., Foresta F. La, Occhiuto G. [et al.]. Empirical mode decomposition vs. wavelet decomposition for the extraction of respiratory signal from single-channel ECG: A comparison // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13, № 7. P. 2666–2674.
13. Zhang Y., Gao Y., Wang L. [et al.]. The removal of wall components in doppler ultrasound signals by using the empirical mode decomposition algorithm // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2007. Vol. 54, № 9. P. 1631–1642.
14. Andrade A. O., Nasuto S., Kyberd P. [et al.]. EMG signal filtering based on Empirical Mode Decomposition // Biomedical Signal Processing and Control. 2006. Vol. 1, № 1. P. 44–55.
15. Schlotthauer G., Torres M. E., Rufiner H. L. A new algorithm for instantaneous F0 speech extraction based on ensemble empirical mode decomposition // 17th European Signal Processing Conference (Aug. 24–28, 2009). UK, Glasgow, 2009. P. 2347–2351.
16. Bouzid A., Ellouze N. Empirical mode decomposition of voiced speech signal // First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing (March 21–24, 2004). Tunisia, Hammamet, 2004. P. 603–606.
17. Sethu V., Ambikairajah E., Epps J. Empirical mode decomposition based weighted frequency feature for speech-based emotion classification // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (31 March – 4 April, 2008). Las Vegas, NV, USA, 2008. P. 5017–5020.
18. Ali M., Prasad R. Significant wave height forecasting via an extreme learning machine model integrated with improved complete ensemble empirical mode decomposition // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 104. P. 281–295.
19. Prasad R., Ali M., Kwan P., Khan H. Designing a multi-stage multivariate empirical mode decomposition coupled with ant colony optimization and random forest model to forecast monthly solar radiation // Applied Energy. 2019. Vol. 236. P. 778–792.
20. Huang H., Pan J. Speech pitch determination based on Hilbert-Huang transform // Signal Processing. 2006. Vol. 86, № 4. P. 792–803.
21. Wu J. D., Tsai Y. J. Speaker identification system using empirical mode decomposition and an artificial neural network // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38, № 5. P. 6112–6117.
22. Huang N. E. Empirical mode decomposition for analyzing acoustical signals. US patent No. 6,862,558 B2, 01.03.2005.
23. Hasan T., Hasan M. K. Suppression of residual noise from speech signals using empirical mode decomposition // IEEE Signal Processing Letters. 2009. Vol. 16, № 1. P. 2–5.
24. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. [и др.]. Алгоритм сегментации речь/пауза на основе декомпозиции на эмпирические моды и одномерного расстояния Махаланобиса // Труды МФТИ. 2021. Т. 13, № 3. С. 4–22.
25. Алимуратов А. К. Помехоустойчивый способ сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2021. № 2. С. 40–66.
26. Chu Y. Y., Xiong W. H., Chen W. Speech Emotion Recognition Based on EMD in Noisy Environments // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 831. P. 460–466.
27. Kerkeni L., Serrestou Y., Raouf K. Kerkeni L. [et al.]. Automatic speech emotion recognition using an optimal combination of features based on EMD-TKEO // Speech Communication. 2019. Vol. 114. P. 22–35.

28. Shahnaz C., Sultana S., Fattah S.A. [et al.]. Emotion recognition based on EMD-Wavelet analysis of speech signals // IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP) (July 21–24, 2015). Singapore, 2015. P. 307–310.
29. Li X., Li Xin, Zheng X., Zhang D. EMD-TEO Based Speech Emotion Recognition // Life System Modeling and Intelligent Computing. 2010. P. 180–189.
30. Zhaohua W., Huang N. E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method // Advances in Adaptive Data Analysis. 2009. № 1. P. 1–41.
31. Colominasa M. A., Schlotthauera G., Torres M. E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing // Biomed. Signal Proces. 2014. Vol. 14. P. 19–29.
32. Алимуратов А. К., Фокина Е. А., Журина А. Е. Исследование влияния длительности анализируемых речевых сигналов на частотно-избирательные свойства декомпозиции на эмпирические моды // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 27–29 ноября 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 201–205.
33. National University of Entre Ríos. The Laboratory of Signals and Nonlinear Dynamics, Faculty of Engineering. URL: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/ldnllys> (дата обращения: 01.05.2021).

References

1. Fant G.K. *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya = Acoustic theory of speech formation*. Transl. from Engl. by L.A. Varshavskiy, V.I. Medvedev. Moscow: Nauka, 1964:284. (In Russ.)
2. Mikhaylov V.G., Zlatousova L.V. *Izmerenie parametrov rechi = Measurement of speech parameters*. Moscow: Radio i svyaz', 1987:168. (In Russ.)
3. Alimuradov A.K., Churakov P.P. Review and classification of speech signal processing methods in speech recognition systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2015;(2):27–35. (In Russ.)
4. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development*. New Jersey: Prentice Hall, 2001:980.
5. Li U.A., Neyburg E.P., Martin T.B. [et al.]. *Metody avtomaticheskogo raspoznavaniya rechi: v 2 kn.; per. s angl. =*. Moscow: Mir, 1983;(bk.1):328. (In Russ.)
6. Klett D.Kh., Barnet Dzh.A., Bernsteyn M.I. [et al.]. *Metody avtomaticheskogo raspoznavaniya rechi: v 2 kn.; per. s angl. = Methods of automatic speech recognition : in 2 books. ; translated from English*. Moscow: Mir, 1983;(bk.2):392. (In Russ.)
7. Huang E. Huang, Samuel S.P. Shen. Hilbert-Huang Transform and its application. Interdisciplinary mathematical sciences. *Interdisciplinary Mathematical Sciences*. World Scientific Publishing Company. 2005;(bk.5):324.
8. Huang N.E., Zheng Sh., Steven R.L. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1998;454:903–995.
9. Mi X., Liu H., Li Y. Wind speed prediction model using singular spectrum analysis, empirical mode decomposition and convolutional support vector machine. *Energy Conversion and Management*. 2019;80:196–205.
10. Wu Z., Schneider E., Hu Z., Cao L. The impact of global warming on ENSO variability in climate records. *Tech. report, Cent. Ocean. Stud.* 2001;110:25.
11. Lee T., Ouarda T.B.M.J. Multivariate Nonstationary Oscillation Simulation of Climate Indices With Empirical Mode Decomposition. *Water Resources Research*. 2019;55(6):5033–5052.
12. Labate D., Foresta F.La, Occhiuto G. [et al.]. Empirical mode decomposition vs. wavelet decomposition for the extraction of respiratory signal from single-channel ECG: A comparison. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(7):2666–2674.
13. Zhang Y., Gao Y., Wang L. [et al.]. The removal of wall components in doppler ultrasound signals by using the empirical mode decomposition algorithm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2007;54(9):1631–1642.
14. Andrade A.O., Nasuto S., Kyberd P. [et al.]. EMG signal filtering based on Empirical Mode Decomposition. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2006;1(1):44–55.
15. Schlotthauer G., Torres M.E., Rufiner H.L. A new algorithm for instantaneous F0 speech extraction based on ensemble empirical mode decomposition. *17th European Signal Processing Conference (Aug. 24–28, 2009)*. UK, Glasgow, 2009:2347–2351.
16. Bouzid A., Ellouze N. Empirical mode decomposition of voiced speech signal. *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing (March 21–24, 2004)*. Tunisia, Hammamet, 2004:603–606.
17. Sethu V., Ambikairajah E., Epps J. Empirical mode decomposition based weighted frequency feature for speech-based emotion classification. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (31 March – 4 April, 2008)*. Las Vegas, NV, USA, 2008:5017–5020.

18. Ali M., Prasad R. Significant wave height forecasting via an extreme learning machine model integrated with improved complete ensemble empirical mode decomposition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;104:281–295.
19. Prasad R., Ali M., Kwan P., Khan H. Designing a multi-stage multivariate empirical mode decomposition coupled with ant colony optimization and random forest model to forecast monthly solar radiation. *Applied Energy*. 2019;236:778–792.
20. Huang H., Pan J. Speech pitch determination based on Hilbert-Huang transform. *Signal Processing*. 2006;86(4):792–803.
21. Wu J.D., Tsai Y.J. Speaker identification system using empirical mode decomposition and an artificial neural network. *Expert Systems with Applications*. 2011;38(5):6112–6117.
22. Huang N.E. *Empirical mode decomposition for analyzing acoustical signals*. US patent No. 6,862,558 B2, 01.03.2005.
23. Hasan T., Hasan M.K. Suppression of residual noise from speech signals using empirical mode decomposition. *IEEE Signal Processing Letters*. 2009;16(1):2–5.
24. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. [et al.]. Speech/pause segmentation algorithm based on decomposition into empirical modes and one-dimensional Mahalanobis distance. *Trudy MFTI = Proceedings of MIPT*. 2021;13(3):4–22. (In Russ.)
25. Alimuradov A.K. Noise-resistant method of segmentation speech/pause based on the method of decomposition into empirical modes. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2021;(2):40–66. (In Russ.)
26. Chu Y.Y., Xiong W.H., Chen W. Speech Emotion Recognition Based on EMD in Noisy Environments. *Advanced Materials Research*. 2013;831:460–466.
27. Kerkeni L., Serrestou Y., Raoof K. Kerkeni L. [et al.]. Automatic speech emotion recognition using an optimal combination of features based on EMD-TKEO. *Speech Communication*. 2019;114:22–35.
28. Shahnaz C., Sultana S., Fattah S.A. [et al.]. Emotion recognition based on EMD-Wavelet analysis of speech signals. *IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP) (July 21–24, 2015)*. Singapore, 2015:307–310.
29. Li X., Li Xin, Zheng X., Zhang D. EMD-TEO Based Speech Emotion Recognition. *Life System Modeling and Intelligent Computing*. 2010:180–189.
30. Zhaohua W., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2009;(1):1–41.
31. Colominasa M.A., Schlotthauera G., Torres M.E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing. *Biomed. Signal Proces.* 2014;14:19–29.
32. Alimuradov A.K., Fokina E.A., Zhurina A.E. Investigation of the influence of the duration of the analyzed speech signals on the frequency-selective properties of decomposition on empirical modes. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sb. nauch. st. XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 27–29 noyabrya 2019 g.) = New information technologies and systems : collection of scientific Articles XVI International Scientific-technical. conf. (Penza, November 27-29, 2019)*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:201–205. (In Russ.)
33. *National University of Entre Ríos. The Laboratory of Signals and Nonlinear Dynamics, Faculty of Engineering*. Available at: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/ldnlys> (accessed 01.05.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Алан Казанферович Алимуратов

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

Alan K. Alimuradov

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

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Alexander Yu. Tychkov

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

Петр Павлович Чураков

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

Petr P. Churakov

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

Анастасия Валерьевна Баранова

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

Anastasiya V. Baranova

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

Дмитрий Сергеевич Дудников

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

Dmitriy S. Dudnikov

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 5.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 9.03.2022

Принята к публикации/Accepted 10.04.2022

УДК 615.47:681.782.473
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-11

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХВОЛНОВОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЛЬСОКСИМЕТРА

Р. Н. Хизбуллин

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
Robert.Khizbullin@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время имеется ряд нерешенных фундаментальных научных проблем, связанных с получением достоверной информации при мониторинге лечения различных заболеваний. Особенно актуальна проблема, касаемая диагностического медицинского оборудования при использовании оптических методов исследования. Из этого вытекает цель исследования – определение системных связей и закономерностей взаимодействия между техническими системами со сложными биологическими системами (кровеносное русло) в процессе оценки их состояния и на этой основе обоснование принципа построения лазерного пульсоксиметра повышенного разрешения с высокими точностными характеристиками. *Материалы и методы.* Оптические методы исследования, связанные с глубиной проникновения оптического следа и ее адекватное восприятие системой сравнения для получения достоверных сигналов. *Результаты.* Предложен принцип построения трехволнового двухканального лазерного пульсоксиметра с использованием третьей длины волны ($\lambda = 805 \pm 0,75$ нм). Длина волны излучения 804,25... 805,75 нм является «изобестической точкой», на этой длине волны спектральные характеристики гемоглобина и оксигемоглобина совпадают. *Выводы.* Предложен трехволновой двухканальный лазерный пульсоксиметр с улучшенными точностными характеристиками, погрешность измерения которого удалось снизить до 5 %, по сравнению с другими аналогами, где погрешность составляет до 30 %.

Ключевые слова: трехволновой лазерный пульсоксиметр, фотоплетизмограмма, изобестическая точка, сатурация, гемоглобин, оксигемоглобин, лазерный датчик, акселерометр

Для цитирования: Хизбуллин Р. Н. Принципы построения трехволнового двухканального лазерного пульсоксиметра // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 90–100. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-11

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF A THREE-WAVE TWO-CHANNEL LASER PULSE OXIMETER

R.N. Khizbullin

Kazan State Energy University, Kazan, Russia
Robert.Khizbullin@mail.ru

Abstract. *Background.* Currently, there are a number of unsolved fundamental scientific problems related to obtaining reliable information when monitoring the treatment of various diseases. The problem of diagnostic medical equipment using optical research methods is particularly relevant. This implies the purpose of the study: to determine the system connections and patterns of interaction between technical systems with complex biological systems (bloodstream) in the process of assessing their condition, and on this basis substantiate the principle of constructing a high-resolution laser pulse oximeter with high accuracy characteristics. *Materials and methods.* Optical research methods related to the depth of penetration of the optical trace and its adequate perception by the comparison system to obtain reliable signals. *Results.* The principle of constructing a three-wave two-channel laser pulse oximeter using the third wavelength ($\lambda = 805 \pm 0.75$ nm) is proposed. The radiation wavelength of 804.25... 805.75 nm is an "isobestic point", at this wavelength the spectral characteristics of hemoglobin and oxyhemoglobin coincide. *Conclusions.* A three-wave two-channel laser pulse oximeter with improved accuracy characteristics has been proposed, the measurement error of which has been reduced to 5 %, %, compared with other analogues, where the error is up to 30 %.

Keywords: three-wave laser pulse oximeter, photoplethysmogram, isobestic point, saturation, hemoglobin, oxyhemoglobin, laser sensor, accelerometer

For citation: Khizbullin R.N. Principles of construction of a three-wave two-channel laser pulse oximeter. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):90–100. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-11

*Актуальные медико-технические предпосылки
для создания трехволнового двухканального пульсоксиметра*

На момент работы над данным исследованием имелись публикации по фотоплетизмографии [1] и применению двухволновой одноканальной пальцевой светодиодной ($\lambda_1 = 940 \pm \pm 20$ нм; $\lambda_2 = 640 \pm 20$ нм) пульсоксиметрии [2]. Применение датчиков на светодиодах (СД) неизбежно приводит к «физиологической помехе» при регистрации фотоплетизмографического (ФПГ) сигнала за счет разного количества поглощения света основными информативными составляющими кровотока – гемоглобином и оксигемоглобином. Следовательно, получить необходимую точность, повторяемость и адекватность ФПГ сигнала невозможно. Перед автором стояла актуальная задача по разработке лазерного трехволнового двухканального пульсоксиметра (ПСО) с использованием третьей длины волны ($\lambda = 805 \pm 0,75$ нм). Длина волны излучения 804,25... 805,75 нм является «изобестической точкой», т.е. это та длина волны, на которой спектральные характеристики гемоглобина и оксигемоглобина совпадают. Одной из основных задач данного исследования является устранение «физиологической помехи» при получении фотоплетизмограммы, что позволяет построить пульсоксиметры с более высокими точностными характеристиками.

Применение монохроматических источников излучения разных длин волн в прикладной медицине основывается на идеи, реализованной в спектрофотометрии. С помощью оптического излучения можно неинвазивно определять *сатурацию* (наполнение) крови кислородом, где сложный белок *гемоглобин* (Hb) с молекулярной массой 68000 является основным веществом в переносе кислорода. Функциональное назначение гемоглобина – составление молекулярной основы дыхательной функции крови, т.е. транспортировка различных газов (или лигандов) – O_2 , CO, CO_2 [1–4].

Материалы и методы

Регистрация информативного светового сигнала. Если через биоткань последовательно пропускать монохроматическое излучение (рис. 1), находящееся в разных областях спектра, и оценить значения сигналов, получаемых при этом с фотоприемника, то по его изменениям можно оценить сатурацию (насыщение крови) кислородом [1, 5].

На рис. 1. видно: «в точке 805 нм» данные кривые пересекаются, и она называется «изобестической точкой». Ее используют как калибровочную точку для уменьшения погрешности измерений.

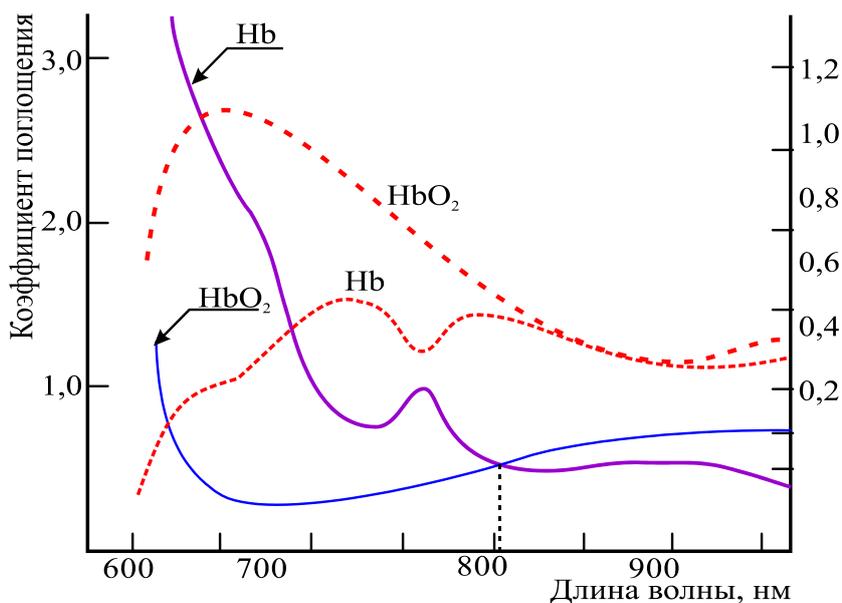


Рис. 1. Зависимость поглощения света от длины волны излучения для различных форм гемоглобина: 1 – оксигемоглобин (HbO₂); 2 – гемоглобин (Hb). Пунктирной линией представлены графики коэффициента отражения для данных форм гемоглобина [1–4, 6–9]

Световой сигнал, попадающий на приемник, имеет несколько составляющих, зависящих от постоянного поглощения и рассеивания света кожным покровом и пульсовым кровенаполнением артериальных сосудов. При этом постоянная составляющая не будет нести никакой информативной части, а исследование характеристик будет проводиться только по переменной. В связи с чем точность прибора будет в большей степени зависеть от точности определения переменной составляющей.

При использовании данного метода сможем одновременно определять частоту сердечных сокращений (ЧСС), характеризующую насыщенность крови кислородом, и пульс.

Формирование фотоплетизмограммы происходит следующим образом: при повышении давления крови происходит расширение сосудов, возрастает амплитуда ФПГ, и амплитуда падает при снижении давления и сужении сосудов.

На выходе пульсоксиметра в процессе снятия показаний мы получаем график фотоплетизмограммы, как и в случае с фотоплетизмографом, по которой мы можем определить ЧСС, т.е. пульс. Определить сатурацию крови кислородом SO_2 можно несколькими способами. Стандартное определение данного параметра записывается следующим выражением (1):

$$SO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где C_{HbO_2} – концентрация оксигемоглобина в крови; C_{Hb} – концентрация гемоглобина.

Поскольку точное определение концентраций гемоглобина и оксигемоглобина в крови неинвазивным способом не представляется возможным, то поэтому используют полученную фотоплетизмограмму. Для этого сначала определяют некий параметр спектральных пульсаций R для выбранных длин волн выражением

$$R = \frac{U_{a_{660}} / U_{d_{660}}}{U_{a_{940}} / U_{d_{940}}}, \quad (2)$$

где U_a и U_d – переменная и постоянная составляющие напряжений с фотоприемников по выбранному спектральному каналу, указанному цифрами.

Показатель $R = 0,4$ при стопроцентной сатурации крови и $R = 3,4$ при нулевой (0 %) сатурации. Отношение $R = 1$ соответствует 85 % сатурации (рис. 2).

Значение R , в основном, определяется соотношением между гемоглобином и оксигемоглобином и мало зависит от свойств кожного покрова и других фрагментов биологической ткани.

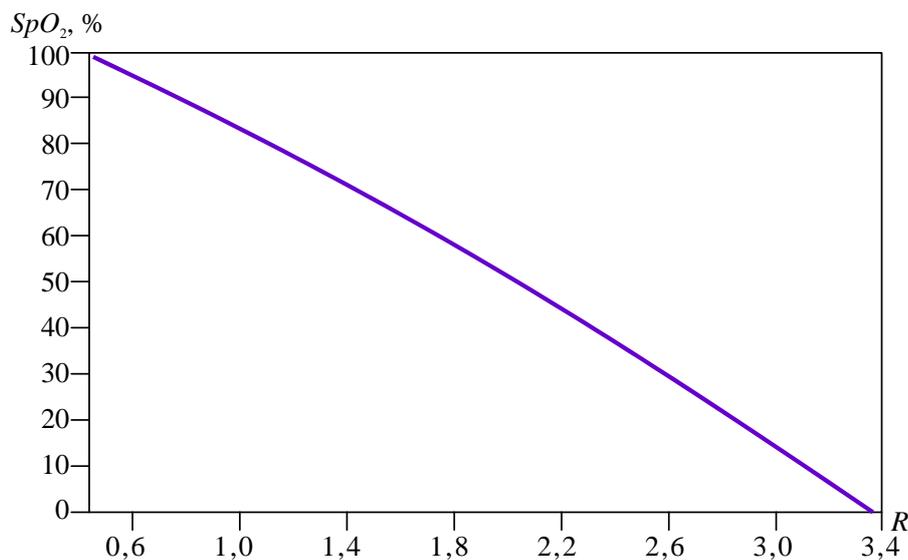


Рис. 2. Калибровочная характеристика пульсоксиметра [8–10]

Результаты исследования

Принципы построения трехволнового двухканального лазерного пульсоксиметра и его реализация. Основываясь на методе регистрации переменной составляющей, зависящей от пульсового кровенаполнения артериальных сосудов, попадающей на фотоприемник, предлагается следующая структурная схема оптического оксиметра, представленная в виде нескольких составных частей (рис. 3). Внешний вид показан на рис. 4 [2]. В качестве источника излучения используются лазерные диоды (ЛД).

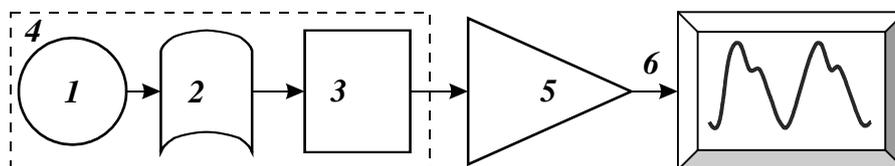


Рис. 3. Структурная схема построения трехволнового лазерного пульсоксиметра: 1 – ЛД; 2 – биологическая ткань; 3 – приемник излучения, 1–3 вместе представляют собой оптическую часть; 4, 5 – электронная часть; 6 – экран [7–9]



Рис. 4. Внешний вид трехволнового лазерного пульсоксиметра (в том числе показан конструктив основной платы и датчика)

На современном рынке пульсоксиметров, наибольшей популярностью пользуются светодиодные (СД) датчики в связи с их небольшой стоимостью по сравнению с лазерами. Поэтому их широко применяют в ПСО с низким классом точности. Но такие ПСО не подходят для точных медицинских исследований состояния пациента в процессе лечения [2].

Основной недостаток СД – невозможность реализовать узкий спектральный пучок с минимальным разбросом длин волн (± 20 нм) [2, 10–13]. С этой проблемой лучше справляются лазеры.

Метод оптической плетизмографии разделен на две группы в зависимости от условий регистрации плетизмограммы: регистрация светового сигнала на просвет и на обратное рассеяние. При регистрации сигнала на просвет основной вклад в изменение коэффициента пропускания биологического объекта вносит коэффициент поглощения. При регистрации рассеянного света вклады коэффициента поглощения, коэффициента рассеяния и коэффициента отражения в коэффициент пропускания становятся соизмеримыми [2, 14].

Основным недостатком зондов пропускания является то, что применение датчика ограничивается периферийной частью тела, например, кончиками пальцев, ног, ушей и носа. Зонды обратного рассеяния могут быть размещены на теле практически на любом месте.

Погрешность пульсоксиметра и методы ее устранения. В современных пульсоксиметрах большинство причин погрешности прибора решены. Для этого используются следующие методы [2]:

- экранирование датчика и кабелей аппарата для устранения засветки приемника или влияния близко расположенных электромагнитных приборов;
- усреднение индикации параметров;
- повышение чувствительности сенсоров;
- увеличение отношения «сигнал/шум» фотоприемника и т.д.

Однако самой серьезной причиной вносимых погрешностей является наличие такого артефакта, как движение части тела человека, на которую прикреплен датчик [2]. Это приводит к венозному искажению получаемой фотоплетизмограммы. Данный артефакт вносит серьезные погрешности и для устранения его было разработано несколько способов: наличие пульсации световых сигналов окружающих тканей и, соответственно, изменение базовых сигналов.

Предлагаемый трехволновый двухканальный ПСО (в дальнейшем ПСО3-2КЛ) состоит из нескольких блоков (рис. 5).

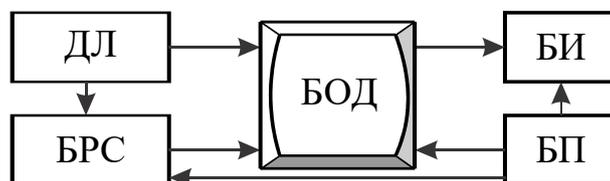


Рис. 5. Блок-схема пульсоксиметра ПСО3-2КЛ: ДЛ – лазерные датчики; БРС – блок регистрации сигнала лазерных датчиков; БОД – блок обработки данных; БИ – блок индикации зарегистрированного сигнала; БП – блок питания

Выбор длины волны и типов лазерных диодов (ЛД). При регистрации фотоплетизмограммы возможны флуктуации сигнала [12], связанные с изменением соотношения гемоглобина и оксигемоглобина (Hb и HbO_2 соответственно), поскольку спектры поглощения и рассеяния оптического излучения этих двух веществ различны (см. рис. 1). Изменение данного соотношения связано с изменением потребления кислорода. При регистрации фотоплетизмограммы информативной составляющей сигнала является изменение кровенаполнения (модуляция рассеянного излучения), поэтому изменение содержания кислорода в крови, приводящее к изменению сигнала фотоплетизмограммы, является «физиологической помехой». Спектральные характеристики обоих типов гемоглобина пересекаются в так называемой «изобестической точке», на длине волны 805 нм, где поглощение излучения одинаково для различных форм гемоглобина. Применение лазера, работающего на данной длине волны, позволило исключить возможность возникновения подобной «физиологической помехи» (рис. 6) по отношению к оптопарам СД-ФД [1].

Кроме $\lambda = 805$ нм, используются также две другие длины волны (рабочие). Они также выбираются исходя из оптических характеристик исследуемых форм гемоглобина. Как правило, это $\lambda_1 = 640$ нм и $\lambda_2 = 940$ нм, так как для этих длин волн рассматриваемые характеристики для HbO_2 и Hb существенно различны и не будут существенно влиять друг на друга (табл. 1).

Таблица 1

Параметры лазерных диодов

Параметры	ЛД1-S6430MG	ЛД2-IDL-805-50S	ЛД3-RLT940-GS
Длина волны, нм	640	805	940
Мощность излучения, мВт	1	0,75	1
Расходимость пучка, мрад	3	3	3
Ширина спектральной линии, нм	3	1,5	3

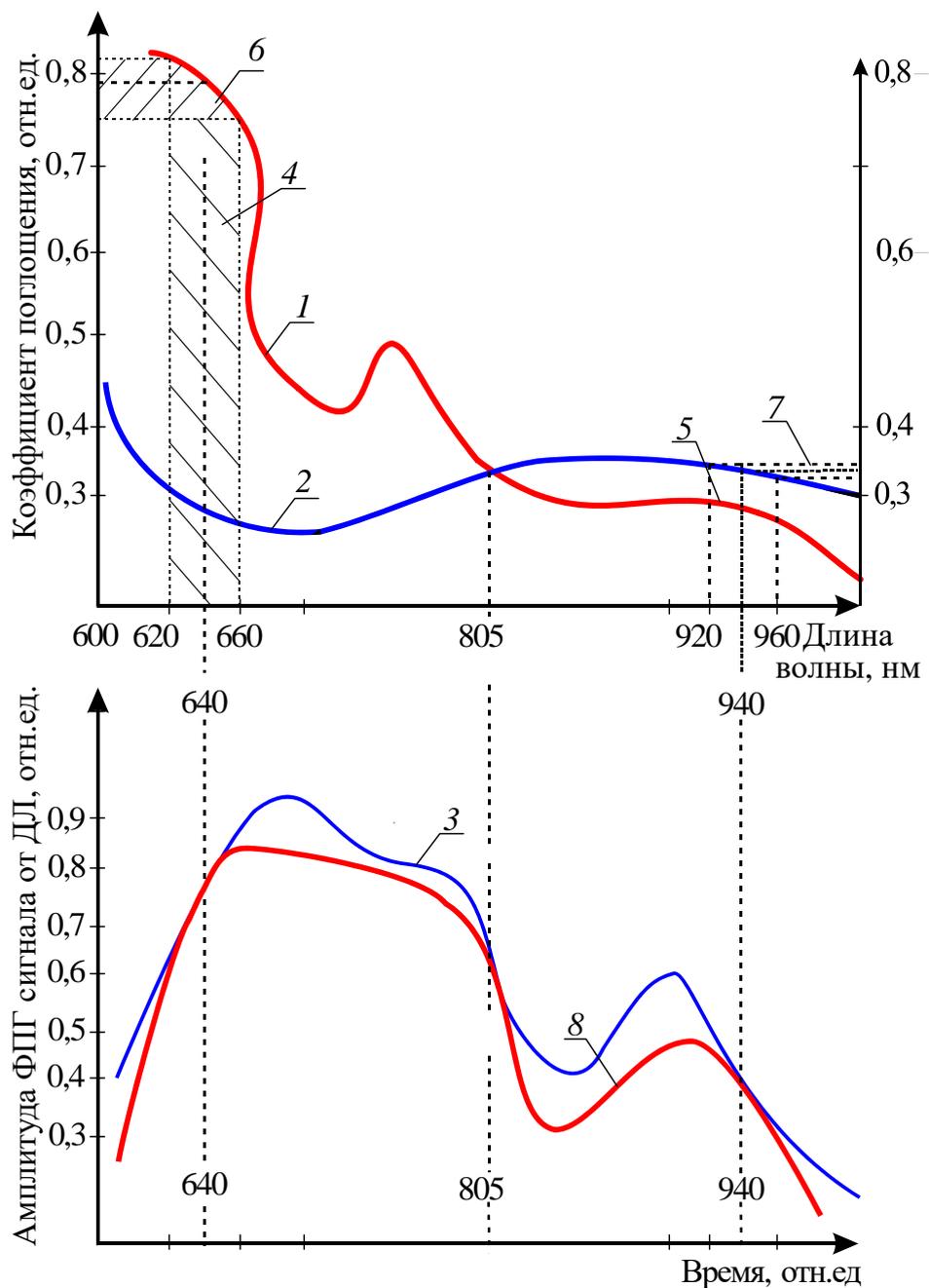


Рис. 6. Сравнительная спектральная зависимость поглощения света ЛД и СД:
 1 – гемоглобином, 2 – оксигемоглобином, 3 – фотоплетизмограмма от лазерного датчика «ЛД-ФД» у ПСОЗ-2КЛ; 4 – ширина полосы генерации СД 640 нм... 40 нм; 5 – ширина полосы генерации СД 940... 40 нм; 640, 805, 940 – линии генерации ЛД, 1-1.5 нм; ЛД 805 нм (калибровочный) – «изобестическая точка»; 6 – заштрихованная красная область – «физиологическая помеха» от СД 640 нм; 7 – заштрихованная синяя область – «физиологическая помеха» от СД 940 нм; 8 – фотоплетизмограмма от датчика «СД-ФД»; суммарная погрешность регистрации ФПГ от «СД-ФД» – 30... 35 %, у ПСОЗ-2КЛ (ЛД-ФД) – не более 2,5 %

Конструкция ПСОЗ-2КЛ состоит из трех основных элементов: корпуса самого прибора и двух лазерных датчиков [12, 15]. Такое разделение необходимо для того, чтобы пользователь мог свободно, без участия технического персонала, подсоединять и отсоединять лазерные датчики с целью подбора наиболее удобного датчика для пациента, замены датчика, а также для осуществления процедуры дезинфекции датчика.

Функционально-алгоритмическая схема построения пульсоксиметра [13, 15, 16]. Лазерный датчик. Состоит из двух диодов лазерных полупроводниковых (ЛД), одного фото-

диола (ФД), фотоприемного устройства (ФПУ), одного акселерометра (АКС) для регистрации механических движений датчика пациента, одного температурного сенсора (ТС), микроконтроллера (МК), кабеля соединительного с разъемом (КС) (рис. 7).

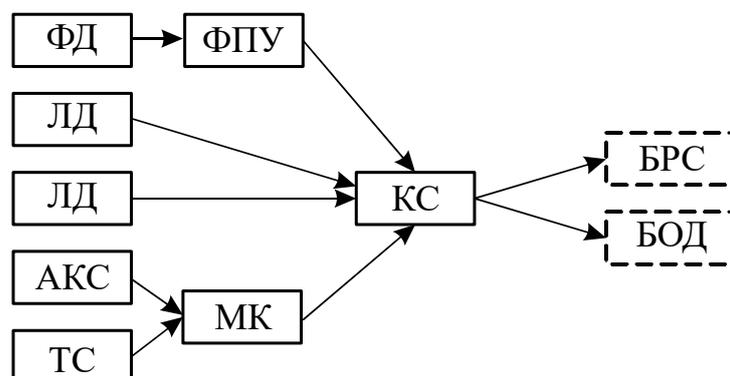


Рис. 7. Структурная схема датчика лазерного (ДЛ)

В конструкцию ДЛ добавлен микроконтроллер, который предназначен для:

- регистрации сигнала с акселерометра, буферизации сигнала и передаче сигнала в цифровом виде по интерфейсу *UART* (универсальный асинхронный приемопередатчик – *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) в БОД;
- регистрации сигнала с температурного сенсора (ТС), буферизации сигнала и передаче сигнала в цифровом виде по интерфейсу *UART* в БОД;
- передачи по интерфейсу *UART* в БОД информации о типе датчика с наличием температурного контроля и максимальном токе засветки оптического источника с целью осуществления автоматического детектирования типа подключаемого датчика.

Температурный сенсор. В конструкцию ДЛ добавлен *температурный сенсор* для регистрации температуры кожи пациента в области съема физиологического сигнала.

Чувствительным элементом температурного сенсора является термистор сопротивлением 2252 Ом. Это специализированный термистор для применения в медицинской технике. Он обладает максимальной чувствительностью в диапазоне температур от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$ и приемлемой точностью для нелинейного элемента $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Термистор подключается к специальному аналого-цифровому преобразователю (АЦП) *ADS1100AxIDBV*, который преобразует аналоговый сигнал в цифровой. АЦП *ADS1100AxIDBV* соединен с микроконтроллером.

В энергонезависимой памяти микроконтроллера записана кривая пересчета цифровых сигналов с АЦП в величину температуры в градусах Цельсия. Кривую пересчета предоставляет производитель термистора. Шаг изменения температуры в кривой составляет $0,1^{\circ}\text{C}$, диапазон от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$.

Апробация и обсуждение

Снятие фотоплетизмографического сигнала и его регистрация. Основываясь на проведенных выше исследованиях и методе получения информативного светового сигнала, можно получить фотоплетизмограмму, снимаемую с фотоприемника в импульсном режиме (рис. 8). Сначала включается первый ЛД, регистрируется сигнал с фотодиода, затем он выключается и выдерживается пауза, после чего включается второй ЛД, опять регистрируется сигнал с фотодиода и ЛД выключается. Процесс повторяется.

На рис. 8 показано: 1 – фронт сигнала тока через ЛД, 2 – интервал усреднения фотоплетизмограммы, 3 – интервал усреднения фоновой засветки, I_{L1} – ток через первый ЛД, I_{L2} – ток через второй ЛД, I_{PHD} – ток фотодиода, T_S – период дискретизации плетизмограммы, равен 125 мкс, T_P – длительность импульса засветки, равна 25 мкс, T_D – длительность пятой части импульса засветки, равна 5 мкс.

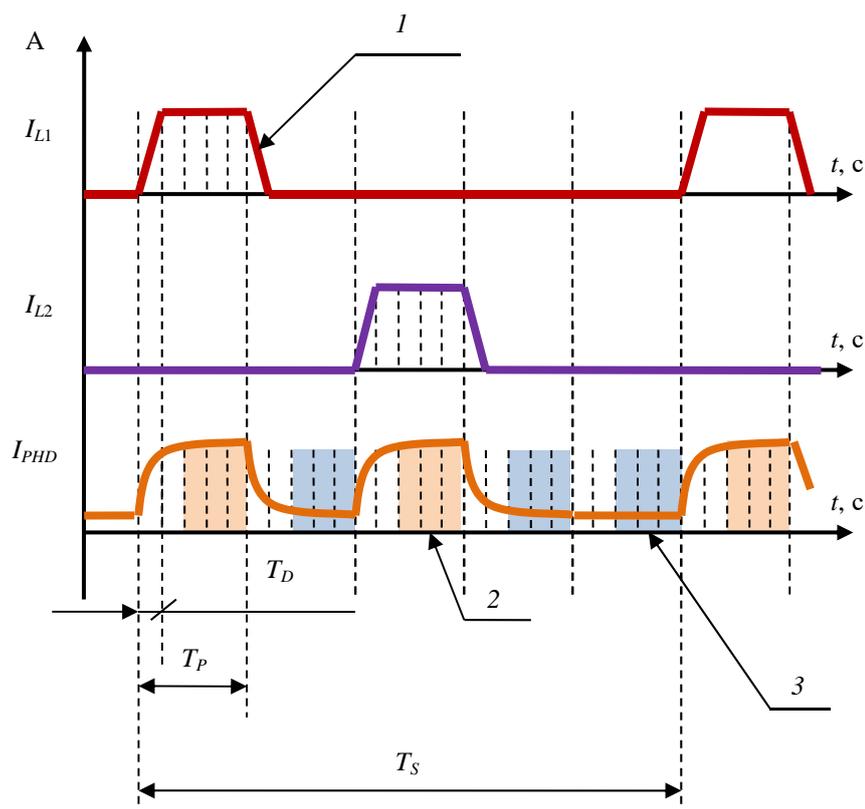


Рис. 8. Эпюры сигналов лазерных диодов (I1 и I2) и тока фотоприемника I_{PHD}

Последовательность регистрации фотоплетизмограммы. Первый ЛД излучает оптический импульс шириной 25 мкс. Оптическое излучение проходит через биологический объект и регистрируется фотодиодом. ЛД управляется источником тока, который имеет ограниченную аналоговую полосу, в результате чего образуются фронты, схематично изображенные на рис. 8, поз. 1. Длительность этих фронтов не превышает 5 мкс и за это время ИТ должен стабилизировать величину тока через ЛД на уровне 99,9 % от номинального значения.

Оптическое излучение от первого ЛД регистрируется фотодиодом и преобразуется в ФПУ в электрическую величину напряжения. Интенсивность оптического излучения плавно повышается пропорционально увеличению тока через ЛД, а с учетом еще и ограниченного быстродействия ФПУ время от начала формирования импульса тока, необходимое для достижения требуемого значения фототока, составляет 10 мкс. Так как длительность импульса тока равна 25 мкс, из которых первые 10 мкс занимает переходной процесс, то время измерения аналого-цифровым преобразователем сигнала плетизмограммы составляет 15 мкс.

Переходной процесс длительностью 10 мкс также связан с аналого-цифровым преобразователем. Преобразователь не может измерять часто и точно быстроизменяющиеся сигналы, так как для этого требуется быстрая настройка встроенного цифрового фильтра, поэтому за время переходного процесса стабилизируется цифровой фильтр преобразователя, что исключает искажения зарегистрированного сигнала вследствие ограничения полосы пропускания.

После излучения первым ЛД оптического импульса длительностью 25 мкс следует пауза длительностью 25 мкс, в течение которой завершается переходной процесс выключения источника тока первого ЛД, а также снижения выходного сигнала напряжения с выхода ФПУ по причине ограничения аналоговой полосы входного сигнала.

Длительность переходного процесса не превышает 10 мкс, поэтому за оставшиеся 15 мкс осуществляется регистрация уровня фоновой засветки фотоприемника (рис. 8, поз. 3).

Второй ЛД излучает оптический импульс длительностью 25 мкс сразу же после окончания паузы длительностью также 25 мкс. Процесс регистрации интенсивности оптического излучения, прошедшего от второго ЛД до фотодиода лазерного датчика, аналогичен описанному выше для первого ЛД.

После окончания второй паузы после излучения оптического импульса вторым ЛД начинается третья пауза длительностью 25 мкс. Эта пауза предназначена для уменьшения скважности импульсов излучения ЛД с целью уменьшения тепловыделения на кристалле ЛД, уменьшения нагрева тканей биологического организма вследствие поглощения оптического излучения, увеличению срока службы ЛД.

На рис. 9 показана положительная клиническая апробация ПСОЗ-2КЛ.

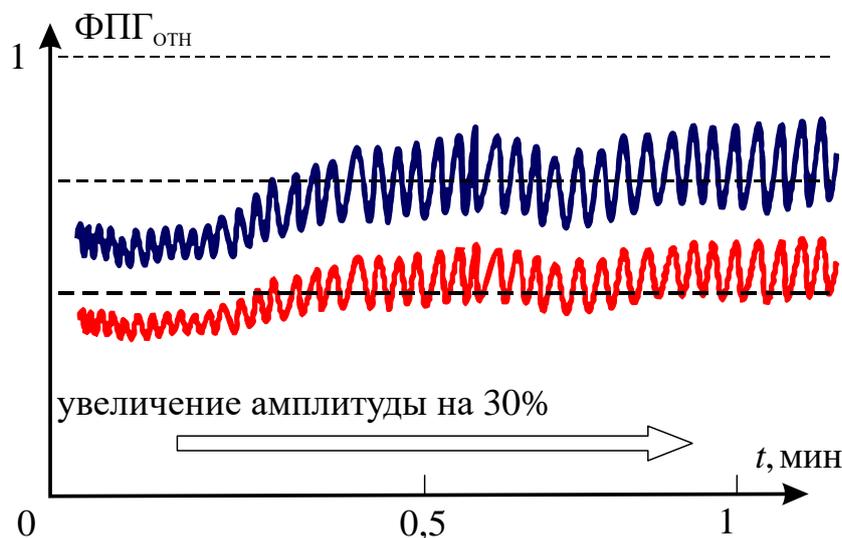


Рис. 9. Клиническая апробация ПСОЗ-2КЛ: «было-стало» схематично

Измеренные значения уровней фоновой засветки за время 15 мкс усредняются и сохраняются (рис. 9).

Сохраненные усредненные значения уровней фоновой засветки используются для интерполяции значений фоновой засветки в моменты регистрации оптических импульсов от ЛД, которые в дальнейшем вычитаются из величины зарегистрированного сигнала. *Описанный механизм является цифровой компенсацией фоновых засветок.*

Получение сигнала фотоплетизмограммы на основе импульсных сигналов показано на рис. 9. Импульсный сигнал, получаемый на фотоприемном устройстве (процесс получения описан ранее), необходимо преобразовать таким образом, чтобы учесть участки, на которых происходят переходные процессы, а затем выделить полезный сигнал (амплитуда – фон).

Величина полезного сигнала будет изменяться прямо пропорционально количеству рассеиваемого излучения, а значит, количеству гемоглобина и оксигемоглобина в крови, изменение которых происходит под воздействием пульсовых волн. Суммарное построение получаемых импульсов на экране и дает нам исследуемую фотоплетизмограмму, из которой можно выделить пульсовую волну (вычисление ЧСС).

Заключение

Создание трехволнового двухканального лазерного пульсоксиметра (ПСОЗ-2КЛ) обусловлено медицинскими требованиями, связанными с использованием связи терапевтических параметров с фотоплетизмограммой и дальнейшей оценкой состояния пациента по проценту содержания кислорода в крови и пульса.

Пульсоксиметры имеют функции фотоплетизмографа. Сигнал для фотоплетизмографа происходит от тех же сигналов, используемых для расчета SpO_2 . Пульсоксиметр может быть использован в клинических условиях в том же порядке, как плетизмограф. Тем не менее точность фотоплетизмографа страдает от артефактов, и пациент должен иметь адекватную перфузию крови возле размещения зонда пульсоксиметра. Так же, как с обычными плетизмограммами, обработав сигналы, можно получить частоту сердечных сокращений от сигнала фотоплетизмограммы.

Автором предложен принцип построения трехволнового двухканального лазерного пульсоксиметра с улучшенными точностными характеристиками, погрешность измерения

удалось снизилась до 5 % по сравнению с другими аналогами, где погрешность составляет до 30 %. На основе рассмотренных конструкций зондов пульсоксиметров была выбрана оптимальная для поставленной задачи конструкция лазерного датчика, а именно, был выбран поверхностный датчик регистрации светового сигнала, работающий в обратно рассеянном свете и использующий три длины волны лазерного излучения (рабочие – $\lambda = 640$ нм, $\lambda = 940$ нм; калибровочная – $\lambda = 805$ нм);

Выявлена необходимость использования трехосевого акселерометра для устранения артефакта движения пациента как основной помехи регистрации сигнала, а также включение термистора в электрическую схему прибора с целью предотвращения перегрева поверхности кожи под датчиком и дополнительной защиты от тепловых помех.

Как видно, методы оптической оксиметрии могут быть достаточно информативны и перспективны в современной доказательной медицине. Они хорошо обоснованы, имеют прочный физико-математический фундамент и базируются на методах физических измерений, т.е. являются полноправным разделом современной медицинской физики. Однако для методов тканевой оксиметрии, бесспорно, остается еще много нерешенных вопросов по точности и воспроизводимости результатов таких измерений, по методике проведения измерений, по данным в норме и при различных патологиях [18, 19].

Многие эти вопросы являются предметом исследований сегодня в крупных научных центрах, так что это диагностическое направление в полном смысле этого слова является развивающимся научным направлением и лежит сегодня в основе создания новой медицинской техники.

Список литература

1. Новиков В. А. Оптико-электронные приборы, методы и информационное обеспечение контроля реакций биообъекта на лазерное воздействие : дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 126 с.
2. Хизбуллин Р. Н. Оптический двухканальный пульсоксиметр на основе лазерных датчиков для решения актуальных задач в медицинской практике // Фотоника. 2017. № 1. С. 144–157.
3. Иржак Л. И. Гемоглобины и их свойства. М. : Медицина, 1975. 327 с.
4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М. : Логос, 1993. 480 с.
5. Ларюшин А. И., Галкин М. А., Хизбуллин Р. Н., Новиков В. А. Двухканальный лазерный фотоплетизмограф // Мир измерений. 2010. № 7. С. 22–28.
6. Hertzman A. B. The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph // Am J Physiol. 1939. № 124. P. 328–340.
7. Gordy E., Drabkin D. Determination of the oxygen saturation of blood by a simplified technique applicable to standard equipment // J. Biol. Chem. 1957. Vol. 227, № 7. P. 285–299.
8. Rogatkin D. A., Lapaeva L. G., Petritskaya E. N. [et al.]. Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and metrological provisions for that // Proc. SPIE. 2009. P. 73681Y.
9. Webster J. G. Design of pulse oximeters // Medical science series. IOP Publishing Ltd., 1997. P. 258.
10. Афанасьев А. И., Рогаткин Д. А., Сергиенко А. А., Шумский В. И. Методики и аппаратура неинвазивной оптической тканевой оксиметрии // Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии / под ред. А. Н. Малова. Иркутск : Папирус2, 2008. С. 505–513.
11. Патент 2398232 РФ. Устройство для калибровки медицинских диагностических спектрофотометрических приборов / Рогаткин Д. А., Лапаева Л. Г., Сидоров В. В. ; № 2008145998/14 ; от 21.08.2008 ; опубл. 27.08.2010. Бюлл. № 24.
12. Jacques S. L. Origins of tissue optical properties in UVA, visible and NIR.
13. Ларюшин А. И., Хизбуллин Р. Н., Хизбуллин Рад. Н. Применение сверхярких светодиодов в миниатюрных устройствах для физиотерапии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 1999. № 1. С. 68–72.
14. Рогаткин Д. А. Физические основы оптической оксиметрии // Медицинская физика. 2012. № 2. С. 97–114.
15. Галкин М. А., Невзоров В. П., Хизбуллин Р. Н. Оценка эффективности мануального воздействия с использованием лазерной плетизмографии высокого разрешения // Мануальная терапия. 2012. Т. 2, № 42. С. 42–48.
16. Millasseau S. C., Guigui F. G., Kelly R. P. [et al.]. Noninvasive assessment of the digital volume pulse. Comparison with the peripheral pressure pulse // Hypertension 2000. Vol. 36. P. 952–956.
17. Ларюшин А. И., Хизбуллин Р. Н. Оптико-электронные приборы и биодозиметрический контроль в медицине : монография. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. 248 с.
18. Finch C. A., Lenfant C. Oxygen transport in man // New Eng. J. Med. 1972. Vol. 286. P. 407–415.

19. Хизбуллин Р. Н., Ларюшин А. И. Автоматизированный медицинский аппаратный комплекс для предсменного осмотра персонала энергетических предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 1-2. С. 125–133.

References

- Novikov V.A. Optoelectronic devices, methods and information support for monitoring the reactions of a biological object to laser exposure. PhD dissertation. Moscow, 2011:126. (In Russ.)
- Khizbullin R.N. Optical two-channel pulse oximeter based on laser sensors for solving urgent problems in medical practice. *Fotonika = Photonics*. 2017;(1):144–157. (In Russ.)
- Irzhak L.I. *Gemoglobiny i ikh svoystva = Hemoglobins and their properties*. Moscow: Meditsina, 1975:327. (In Russ.)
- Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov = Theory and calculation of optoelectronic devices*. Moscow: Logos, 1993:480. (In Russ.)
- Laryushin A.I., Galkin M.A., Khizbullin R.N., Novikov V.A. Two-channel laser photoplethysmograph. *Mir izmereniy = The world of dimensions*. 2010;(7):22–28. (In Russ.)
- Hertzman A.B. The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph. *Am J Physiol*. 1939;(124):328–340.
- Gordy E., Drabkin D. Determination of the oxygen saturation of blood by a simplified technique applicable to standard equipment. *J. Biol. Chem*. 1957;227(7):285–299.
- Rogatkin D.A., Lapaeva L.G., Petritskaya E. N. [et al.]. Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and metrological provisions for that. *Proc. SPIE*. 2009:73681Y.
- Webster J.G. Design of pulse oximeters. *Medical science series*. IOP Publishing Ltd., 1997:258.
- Afanas'ev A.I., Rogatkin D.A., Sergienko A.A., Shumskiy V.I. Methods and equipment of noninvasive optical tissue oximetry. *Materialy XXVI shkoly po kogerentnoy optike i golografii = Materials of the XXVI School of coherent Optics and holography*. Irkutsk: Papirus2, 2008:505–513. (In Russ.)
- Patent 2398232 RF. Device for calibration of medical diagnostic spectrophotometric devices. Rogatkin D.A., Lapaeva L.G., Sidorov V.V.; No. 2008145998/14; ot 21.08.2008; publ. 27.08.2010. bull. № 24. (In Russ.)
- Jacques S.L. *Origins of tissue optical properties in UVA, visible and NIR*.
- Laryushin A.I., Khizbullin R.N., Khizbullin Rad.N. The use of ultra-bright LEDs in miniature devices for physiotherapy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 1999;(1):68–72. (In Russ.)
- Rogatkin D.A. Physical foundations of optical oximetry. *Meditsinskaya fizika = Medical physics*. 2012;(2):97–114. (In Russ.)
- Galkin M.A., Nevzorov V.P., Khizbullin R.N. Evaluation of the effectiveness of manual exposure using high-resolution laser plethysmography. *Manual'naya terapiya = Manual therapy*. 2012;2(42):42–48. (In Russ.)
- Millasseau S.C., Guigui F.G., Kelly R.P. [et al.]. Noninvasive assessment of the digital volume pulse. Comparison with the peripheral pressure pulse. *Hypertension*. 2000;36:952–956.
- Laryushin A.I., Khizbullin R.N. *Optiko-elektronnye pribory i biodozimetricheskyy kontrol' v meditsine: monografiya = Optoelectronic devices and biosimetric control in medicine: monograph*. Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2018:248. (In Russ.)
- Finch C.A., Lenfant C. Oxygen transport in man. *New Eng. J. Med*. 1972;286:407–415.
- Khizbullin R.N., Laryushin A.I. Automated medical hardware complex for pre-shift inspection of personnel of energy enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = News of higher educational institutions. Energy problems*. 2014;(1-2):125–133. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роберт Накибович Хизбуллин

доцент кафедры электротехнические комплексы и системы,
Казанский государственный энергетический университет
(Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51)
E-mail: Robert.Khizbullin@mail.ru

Robert N. Khizbullin

Associate professor of the sub-department of electrical complexes and systems,
Kazan State Power Energy University
(51 Krasnoselskaya street, Kazan, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.04.2022

Принята к публикации/Accepted 7.05.2022

УДК 615.47:681.782.473
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-12

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛАЗЕРНОГО ПУЛЬСОКСИМЕТРА ПСО3-2КЛ

Р. Н. Хизбуллин

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
Robert.Khizbullin@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Значительная часть работ отечественных и зарубежных исследователей посвящена приборам с пальчиковыми датчиками, работающими в проходящем свете, основываясь на законе Бугера – Ламберта – Бера. Подобные конструкции популярны за счет применения более дешевых светодиодных датчиков, но в то же время они имеют и ряд недостатков, главная из них – невысокая точность измерений. В связи с этим автор данной статьи считает актуальным разработку пульсоксиметра с датчиком обратного рассеяния (поверхностным датчиком), работа которого основана на использовании закона Ламберта. Цель работы – найти решение к важной медицинской проблеме повышения точности измерений и получения расширенной достоверной информации в пульсоксиметрии за счет применения новых технических решений в конструкции оптической части лазерного датчика пульсоксиметра. *Материалы и методы.* Применена методика нахождения оптимального положения лазерных диодов и фотодиодов относительно друг друга и кожного покрова, а также конструкция и положение заградительных элементов, которыми служат прорезы в оптической пластине. *Результаты.* На основании приведенных оптических расчетов предложена конструкция датчика, работающего в обратно рассеянном свете. *Выводы.* Объединение трех лазеров с необходимыми длинами волн и фотодатчика в одном малогабаритном поверхностном датчике позволит избавиться от существенных погрешностей измерения по сравнению с пальцевыми датчиками, в которых могут возникать сдавливание, защемление и даже разрыв кровеносных сосудов.

Ключевые слова: датчик лазерный, трехволновый лазерный пульсоксиметр, спектральная зависимость коэффициента поглощения, зависимость поглощения света от длины волны излучения, гемоглобин, зависимость излучения от расстояния до источника, фотоплетизмографический сигнал, фотоприемное устройство

Для цитирования: Хизбуллин Р. Н. Научно-практическое обоснование конструкции и расчет оптической части лазерного пульсоксиметра ПСО3-2КЛ // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 101–113. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-12

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JUSTIFICATION OF DESIGN AND CALCULATION OF OPTICAL PART OF LASER PULSOXIMETER PSO3-2KL

R.N. Khizbullin

Kazan State Energy University, Kazan, Russia
Robert.Khizbullin@mail.ru

Abstract. *Background.* A significant part of the work of domestic and foreign researchers is devoted to devices with finger sensors operating in transmitted light, based on the Booger – Lambert – Behr law. Such designs are popular due to the use of cheaper LED sensors, but at the same time they also have a number of disadvantages, the main one being low measurement accuracy. In this regard, the author of this article considers it relevant to develop a pulse oximeter with a backscattering sensor (surface sensor), whose work is based on the use of Lambert's law. The purpose of the work: to find a solution to an important medical problem of increasing the accuracy of measurements and obtaining extended reliable information in pulse oximetry through the use of new technical solutions in the design of the optical part of the laser pulse oximeter sensor. *Materials and methods.* The technique of finding the optimal position of laser diodes and photodiodes relative to each other and the skin, as well as the design and position of the barrier elements, which serve as slots in the optical plate, is applied. *Results.* Based on the above optical calculations, a design of a sensor operating in backscattered light is proposed. *Conclusions.* Combining three lasers with the necessary wavelengths and a photodetec-

tor (PD) in one small-sized surface sensor will allow you to get rid of significant measurement errors, compared with finger sensors, in which compression, pinching and even rupture of blood vessels can occur.

Keywords: laser sensor, three-wave laser pulse oximeter, spectral dependence of the absorption coefficient, dependence of light absorption on the wavelength of radiation, hemoglobin, dependence of radiation on the distance to the source, photoplethysmographic signal, photodetector

For citation: Khizbullin R.N. Scientific and practical justification of design and calculation of optical part of laser pulsoximeter PSO3-2KL. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):101–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-12

Введение

Актуальность работы и постановка задачи. Биологические ткани являются оптически неоднородными поглощающими средами со средним показателем преломления, бóльшим, чем у воздуха, поэтому от поверхности биообъекта часть излучения отражается (френелевское отражение), а остальная часть проникает в биоткань.

При взаимодействии электромагнитного излучения с веществом (в нашем случае тканью) может происходить множество процессов. Как правило, возникают три основных эффекта, способные помешать свободному распространению света: отражение и преломление, поглощение, рассеяние. Вопрос, связанный с регистрацией информативного оптического отклика от биологической ткани, до сих пор является актуальной задачей [1–4].

На рис. 1 показаны типичные процессы поглощения и рассеяния, происходящие при падении пучка света на биоткань [5].

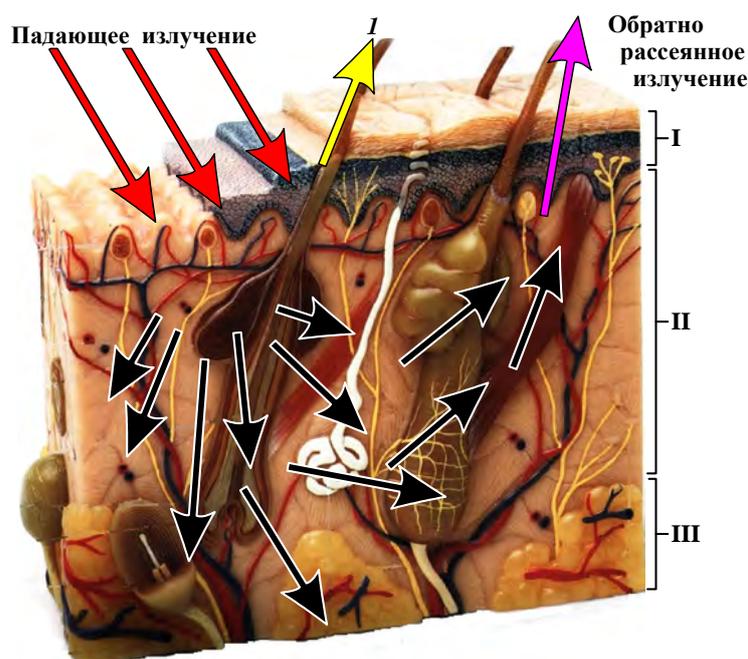


Рис. 1. Общая схема взаимодействия оптического излучения с биотканью:

I – эпидермис; II – дерма; III – жировой слой; I – отраженное от поверхности кожи излучение

Поскольку биологическая ткань включает в себя и большое количество кровеносных сосудов, как мелких, так и достаточно крупных, то ее можно считать сложной структурой, наполненной кровью. Однако кровь имеет свои оптические характеристики. Из всевозможных взаимодействий излучения с кровью нас будет интересовать лишь обратное рассеяние. Оно наблюдается при попадании света на эритроциты, в составе каждого содержатся молекулы Hb и HbO₂. В зависимости от их количества будет меняться и интенсивность отраженного света (рис. 2), т.е. будет происходить модуляция сигнала на приемном устройстве (фотодиоде) [6–8]. Изменение кровенаполнения сосудов будет идти за счет пульсовой волны.

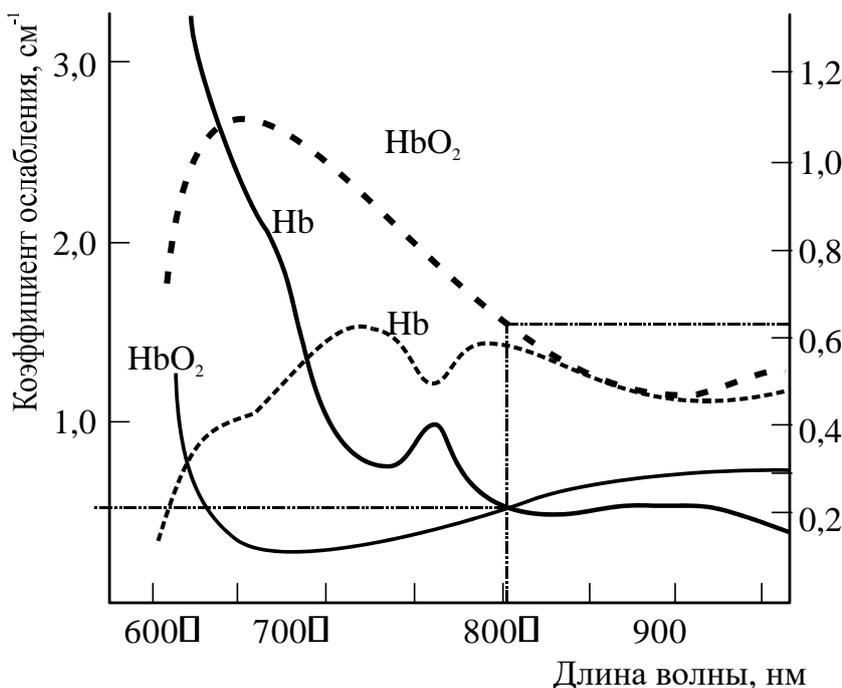


Рис. 2. Зависимость поглощения света от длины волны излучения для различных форм гемоглобина: 1 – оксигемоглобин (HbO₂); 2 – гемоглобин (Hb). Пунктирной линией представлены графики коэффициента обратного рассеяния для данных форм гемоглобина

Имеются разработки пальчиковых и поверхностных оптических датчиков для фотоплетизмографии и пульсоксиметрии [2, 9, 10], но они не удовлетворяют современным требованиям к диагностическому оборудованию, позволяющим регистрировать сигналы повышенного разрешения и, следовательно, без различных помех. Поэтому перед автором стояла задача в разработке поверхностного оптического датчика для пульсоксиметра высокого разрешения, который позволит решить важную медицинскую проблему повышения точности измерений и получения расширенной достоверной информации в пульсоксиметрии.

Материалы и методика

Методология при построения оптической части пульсоксиметра основана на законах Бугера – Ламберта – Бера и Ламберта, а также на других законах геометрической оптики (закон Снеллиуса) и принципах френелевского отражения.

В методологическом плане целью практического исследования является нахождение оптимального положения лазерных диодов и фотодиодов относительно друг друга и кожного покрова, а также конструкция и положение заградительных элементов, которыми служат прорези в оптической пластине.

На первом этапе были определены характеристики излучения лазеров при испускании и прохождении света в оптической пластине.

Интенсивность излучения на выходе лазерного диода можно рассчитать по выражению

$$I_{0e} = \frac{\Phi_e}{\Omega}, \quad (1)$$

где $\Omega = \pi \cdot \alpha^2$ – телесный угол; $\alpha = \beta$ – апертурный угол, β – расходимость пучка.

В нашем случае расходимость различна, тогда $\Omega = \pi \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 = \Omega = \pi \cdot 36 \cdot 10 = 360\pi$.

Следовательно,

$$I_{0e} = \frac{10^{-3}}{360\pi} \approx 88,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{стр}}. \quad (2)$$

При этом свет на границу раздела сред 1–2 (пластина кожа) будет падать под разными углами – от 0° до 18°. Найдем размер и проекцию площадки освещенной ЛД:

$$a = x \sin \frac{\alpha_1}{2},$$

$$b = x \sin \frac{\alpha_2}{2}, \quad (3)$$

где x – толщина оптической пластины (или расстояние между ЛД и границей раздела сред 1–2).

В начальном приближении $x = 4$ мм [1–4], тогда получим $a = 1,236$ мм, $b = 0,349$ мм. Проекция засвеченной площадки показана на рис. 3.

Свет от ЛД распространяется в пластине, сделанной из плексигласа (оргстекла), а затем переходит в ткань – кожный покров. Оптические характеристики плексигласа:

- показатель преломления $n_1 = 1,49$;
- коэффициент пропускания $\mu_{\text{пр}} = 0,92$;
- коэффициент рассеяния примем равным нулю.

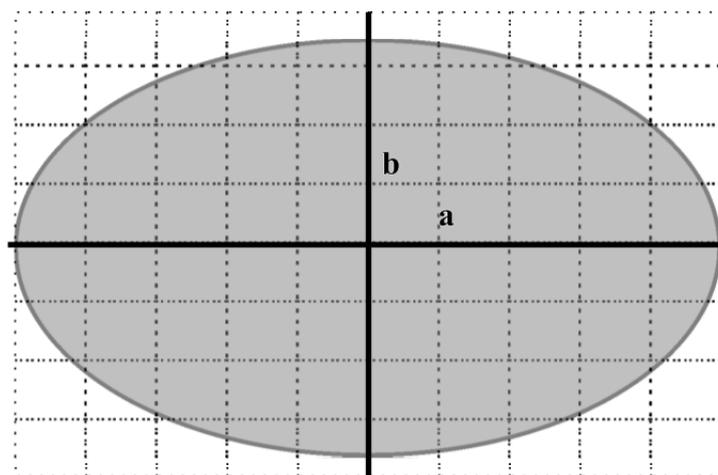


Рис. 3. Проекция пучка лучей на границе 1–2

Таким образом, интенсивность излучения, попавшего на кожу, будет отличаться. Она определяется по закону Бугера: $I_{le} = I_{0e} e^{-\mu_a x}$, где $\mu_a = 1 - \mu_{\text{пр}} = 0,08$ – коэффициент поглощения.

Получаем $I_{le} \approx 64,3 \frac{\text{мкВт}}{\text{стр}}$ – интенсивность излучения, дошедшего до границы раздела двух сред.

Свет от кожи человека отражается диффузно, в упрощенном варианте можно принять данное отражение согласно закону Ламберта, где сила излучения определяется по выражению

$$I(\theta) = I_{le}^0 \cos \theta, \quad (4)$$

где $I_{le}^0 = I_{le}$ – энергетическая сила излучения в направлении, перпендикулярном плоскости падения света, θ – угол между рассматриваемым направлением и нормалью к поверхности (угол излучения).

Однако коэффициент отражения кожи не равен 1, а равен $\sim 0,05 \dots 0,07$ или $5 \dots 7 \%$ [1, 2, 6].

Следовательно, часть упавшего светового потока будет отражаться от поверхности кожи и создавать засветку фотоприемного устройства (ФД), а количество прошедшего излучения можно определить по выражению

$$I_{2e} = (1 - \mu_r) I_{le}^0. \quad (5)$$

Та часть излучения, которая попала в ткань, будет распространяться по более сложным законам. Здесь необходимо учитывать и рассеяние света.

Показатель преломления кожи зависит от длины волны. Его спектральная зависимость может быть описана выражением

$$n_2 = 1,556 - 5,915 \cdot 10^{-4} \lambda + 7,7 \cdot 10^{-7} \lambda^2 - 5,033 \cdot 10^{-10} \lambda^3 + 1,624 \cdot 10^{-13} \lambda^4 - 2,086 \cdot 10^{-17} \lambda^5, \quad (6)$$

где λ – длина волны излучения в нанометрах.

Таким образом, можно рассчитать показатель преломления для всех используемых нами длин волн

$$\begin{aligned} n_{2(640)} &= 1,388, \\ n_{2(805)} &= 1,384, \\ n_{2(940)} &= 1,389. \end{aligned} \quad (7)$$

При прохождении света в коже он будет ослабляться за счет рассеяния и поглощения, кроме того, его распространение будет диффузным. Ослабление лучистого потока в биологической ткани будет идти согласно закону Бугера – Бера:

$$I(z) = (1 - R) I_{2e} \exp(-\mu_t z), \quad (8)$$

где $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$ определяется также для каждой длины волны; $\mu_t = \mu_a + \mu'_s$ – полный коэффициент затухания; μ_a – коэффициент поглощения; $\mu'_s = \mu_s (1 - g)$ – редуцированный коэффициент рассеяния; $\mu_s = \frac{2,9 \cdot 10^5}{\lambda}$ – коэффициент рассеяния; $g = 0,62 + 0,29 \cdot 10^{-3} \lambda$ – поправочный коэффициент; z – толщина ткани.

Коэффициент поглощения для разных длин волн различен и представлен на рис. 4.

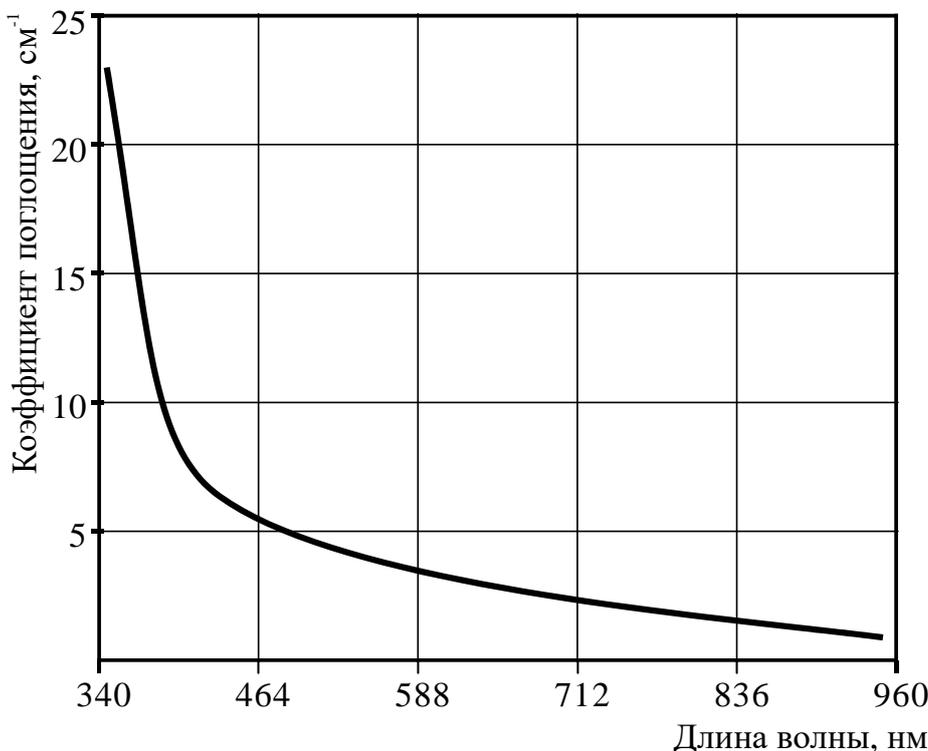


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента поглощения [6]

Из рис. 4 видно, что

$$\mu_a(640) = 2,5 \frac{1}{\text{см}}; \mu_a(805) = 1,75 \frac{1}{\text{см}}; \mu_a(940) = 1 \frac{1}{\text{см}}.$$

Так как значения коэффициентов приблизительно совпадают в точке 805 нм («изобестическая» точка), то целесообразно вести расчет именно для нее. Из рис. 2 графически получим следующие значения коэффициента рассеяния и поглощения: $\mu_{sk} = 0,6$; $\mu_{ak} = 0,5$.

Учитывая оптические параметры крови, получаем следующее выражение для расчета коэффициентов:

$$\mu_{s0} = \mu_{sk}\mu'_s, \quad (9)$$

$$\mu_{a0} = \mu_{ak}\mu_a. \quad (10)$$

Получив все вышеперечисленные параметры, найдем распределение интенсивности излучения в зависимости от расстояния от источника излучения (рис. 5).

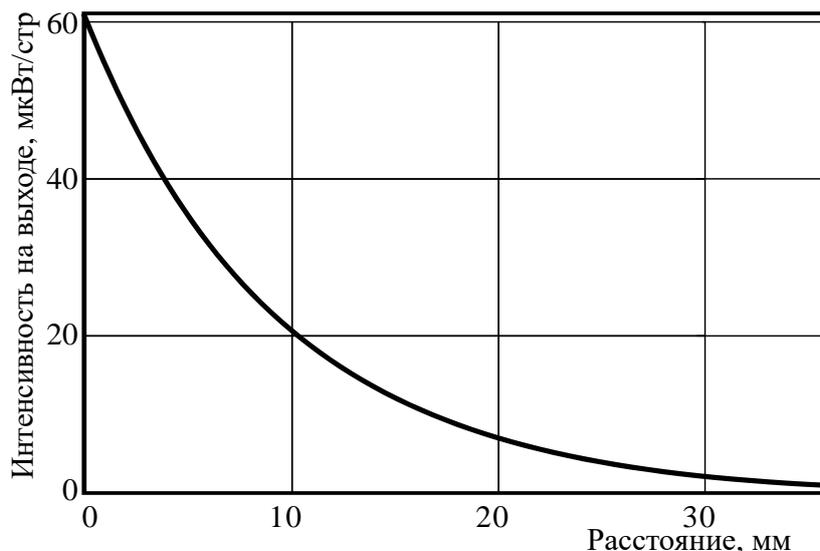


Рис. 5. Зависимость излучения от расстояния до источника

Как видно из рис. 5, зависимость носит экспоненциальный характер и на расстоянии ~40 мм можно наблюдать полное затухание. Распределение потока излучения будет идти по такому же закону.

Исходя из полученных значений, можно рассчитать отклик фотодиода (ток). Зная угол поля зрения ФД, можно рассчитать размер охватываемой области кожи по выражению

$$R = x \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (11)$$

где $x = 4$ мм – расстояние от фотоприемника до поверхности кожи, $\alpha = 65^\circ$ – угол поля зрения, $R = 2,1$ мм – радиус охватываемой поверхности.

Площадь круга $A = \pi R^2 = 14,5$ мм².

Распределение освещенности по данной площадке будет так же нелинейным и определяться по выражению

$$E_e = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \Phi_e(x) dx}{A}. \quad (12)$$

Сигнал на фотодиоде можно определить по выражению

$$I_{\text{фп}} = E_e a_{\text{фп}} S_i, \quad (13)$$

где $a_{\text{фп}}$ – площадь приемной площадки; S_i – чувствительность ФД.

Зависимость получаемого сигнала от расстояния между источником излучения и ФД можно представить в виде графика (рис. 6).

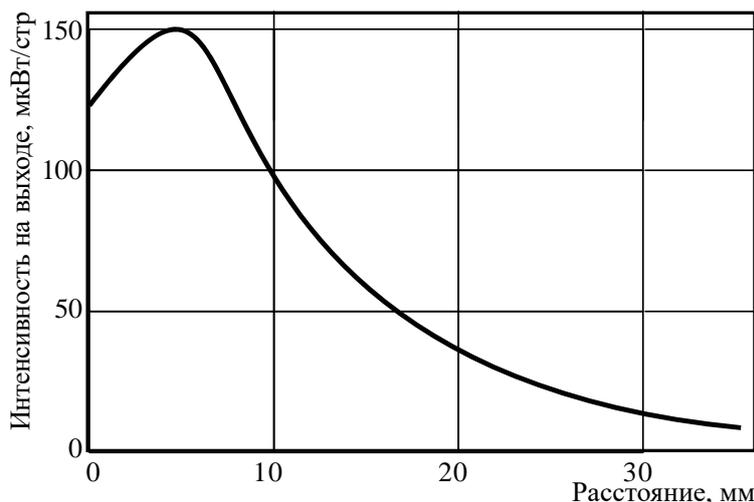


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала ФД от расстояния между ЛД и ФД

Как видно из рис. 6, максимальный сигнал получается при расстоянии ~5 мм между лазерным диодом и ФД. Однако при измерении фотоплетизмограммы в данной области будут максимальны и помехи. Следовательно, оптимальным положением датчиков будет расстояние соответствующее $0,8 I_{\max} \dots 0,2 I_{\max}$, т.е. 10... 20 мм.

Засветка ФПУ и пути ее устранения. Ранее рассмотрено: свет, упавший на поверхность кожи, частично отражается от поверхности, вызывает дополнительную засветку на фотоприемном устройстве ФПУ и может привести как к дополнительным помехам, так и полностью вывести приемник из строя. Необходимо устранить данную составляющую светового потока.

Из выражения (4): свет падает под углом от 0° до 18° , следовательно, по закону отражения излучения, отраженная составляющая будет распространяться под теми же углами.

Чтобы полностью убрать данное излучение, можно сделать в пластине прорези перпендикулярно плоскости кожного покрова. Излучение, достигающее данных прорезей, будет падать на границу раздела сред (пластина – воздух) под углами от 72° до 89° (в зависимости от ее расположения).

Зная показатели преломления обеих сред, можно найти по закону Снеллиуса угол полного внутреннего отражения для данной границы

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 42^\circ. \quad (14)$$

Так как полученный угол меньше рассматриваемых, можно сделать вывод: все излучение, попадая на границу раздела пластина – воздух, будет полностью отражаться от границы. Следовательно, ее расположение ограничивается лишь конструктивными особенностями датчика. Допустимым положением будет расстояние 1,5 мм от источника излучения.

Результаты

На основании вышеизложенных расчетов предложена конструкция датчика, примерный вид конструкции показан на рис. 7, глубина прорези 4 мм и ширина 2 мм.

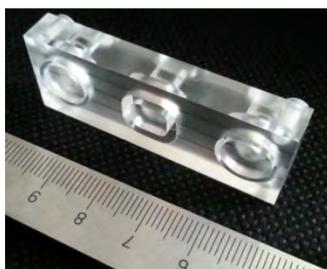


Рис. 7. Вид оптической пластины датчика PCS3-2КЛ

Структурная схема датчика лазерного (ДЛ). Датчик лазерный для трехволнового двухканального пульсоксиметра ПСО3-2КЛ лазерного состоит из двух диодов лазерных полупроводниковых (ЛД), одного фотодиода (ФД), фотоприемного устройства (ФПУ), одного акселерометра (АКС) для регистрации механических движений датчика пациента, одного температурного сенсора (ТС), микроконтроллера (МК), кабеля соединительного с разъемом (КС) (рис. 8).

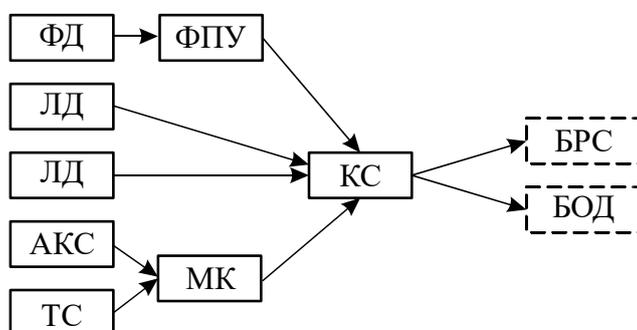


Рис. 8. Структурная схема ДЛ

Оптической частью ПСО3-2КЛ является лазерный датчик, работающий в обратно рассеянном свете. Принцип работы ДЛ показан на рис. 9. Излучателем в нашей схеме выбраны лазерные диоды с длинами волн 640, 940 и 805 нм (являющейся «изобестической точкой»).

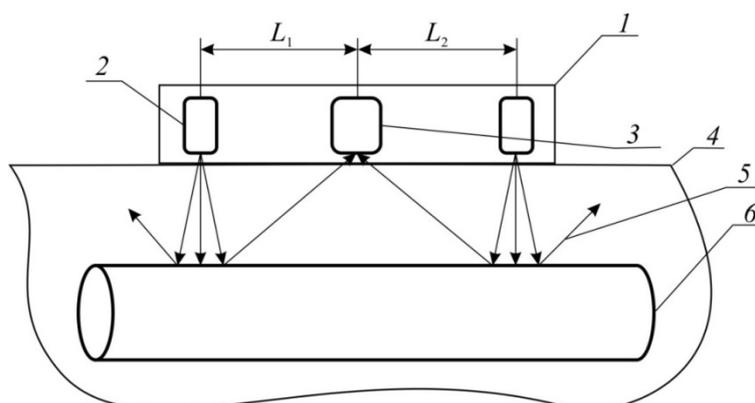


Рис. 9. Принцип работы датчика лазерного: 1 – лазерный датчик; 2 – диод лазерный полупроводниковый; 3 – фотодиод кремниевый; 4 – поверхность кожи пациента; 5 – оптические лазерные лучи; 6 – кровеносный сосуд (артерия); $L_1 = L_2$ – оптимальное расстояние между ЛД и ФД 10...20 мм

На рис. 10 показана трехмерная модель датчика лазерного, на рис. 11 – фотография датчика лазерного.

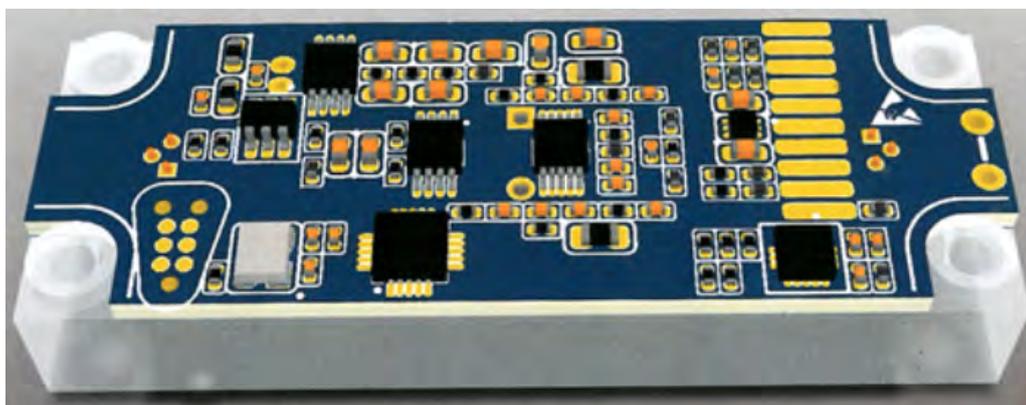


Рис. 10. Трехмерная модель ДЛ



Рис. 11. Фотография ДЛ без кабеля

В качестве источника излучения в датчике применяется лазерный полупроводниковый диод, поэтому ПСОЗ-2КЛ должно удовлетворять требованиям лазерной безопасности в соответствии с ГОСТ Р 50723-94. Класс лазерной опасности – 1-й, в соответствии с ГОСТ 12.1.040-83.

Дополнительной защитой от многократно отраженного излучения может служить чернение поверхности прорезей пластины специальными красками или иными покрытиями с показателем поглощения близким к 1.

Обсуждение

Медико-технические исследования и оптимизация конструкции датчиков. Медико-технические испытания автором проводились в ОАО «Яровит-Ярь», г. Москва. Цель испытаний: определение оптимального расстояния между лазерным диодом и фотоприемным устройством (ФПУ) в *in vivo* (в лечебно – практических условиях), что является важным моментом, так как имеющиеся теоретические данные для проведения расчета не являются абсолютными в связи с трудностью их измерения [8, 9, 11].

Методика измерения. В ходе эксперимента измерялось напряжение, снимаемое на выходе фотоприемного устройства (ФПУ), в состав которого входят фотодиод и схема усиления. Схема измерения напряжения ФПУ представлена на рис. 12.

Лазерные диоды (640 и 805 нм) подключаются к источнику питания, на котором можно выставить определенную частоту импульсов, экспозицию и мощность. Поскольку конструкция самого лазерного диода не позволяет вести эксперимент с необходимой точностью, используются оптоволоконные кабели, которые подводят излучение в необходимую нам точку, благодаря чему система становится компактной и «гибкой» в использовании.

Для фотоприемного устройства (ФПУ) используется выбранный ранее фотодиод с рассчитанной схемой включения и усилительным каналом. Напряжение питания ФПУ задается своим источником питания и равняется 5 В. Датчики устанавливаются на кожу (поверхностный датчик). Отсчеты расстояния выставлялись вдоль крупных и хорошо заметных артериальных сосудов.

К выходу ФПУ подключается многоканальный осциллограф (рис. 12), показания которого передаются на персональный компьютер (ПК) и выводятся на монитор. Чувствительность осциллографа ~1 мВ, что вполне достаточно для нашей системы.



Рис. 12. Блок-схема измерения напряжения для определения оптимальной величины расстояния между ЛД и ФД

Измерения проводились на группе пациентов, датчик располагался на руке. Тип кожи был выбран европейский, поскольку разработка данного прибора велась для нашего географического расположения. Расстояние между лазерным диодом и ФПУ менялось с интервалом 2 мм, начальной точкой отсчета было выбрано положение 10 мм из-за конструктивных особенностей исходного датчика и в соответствии с рекомендациями литературы.

Графики двух ФПГ сигналов, зарегистрированных с правой и левой руки одновременно, показаны на рис. 13.

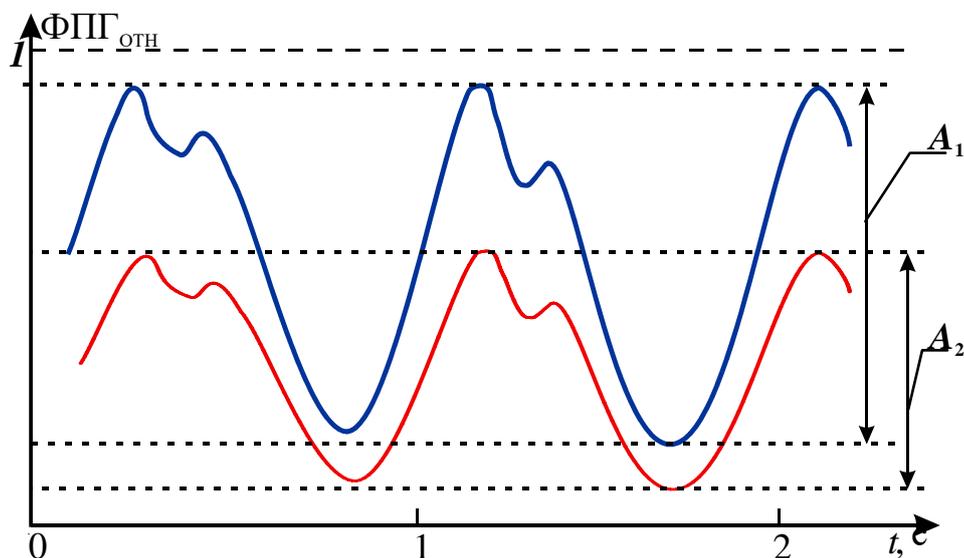


Рис. 13. Графики двух ФПГ сигналов, зарегистрированных с правой и левой руки одновременно

Проанализировав полученные данные, авторами были построены следующие графики (рис. 14, 15).

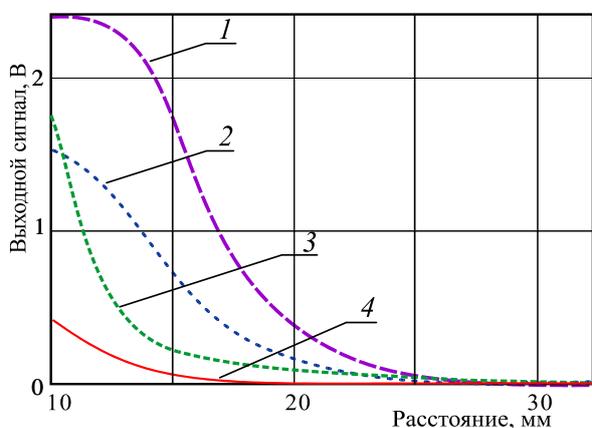


Рис. 14. График зависимости выходного сигнала фотоприемного устройства от расстояния между ЛД и ФД (пациент 1):
1 – ИК-лазер (локтевой сгиб); 2 – К-лазер (локтевой сгиб); 3 – ИК-лазер (кисть);
4 – К-лазер (кисть)

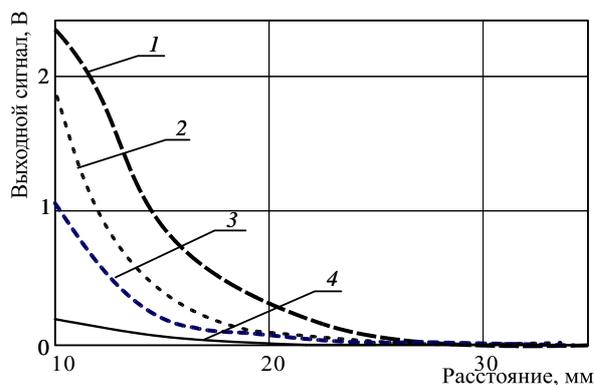


Рис. 15. График зависимости выходного сигнала фотоприемного устройства от расстояния между ЛД и ФД (пациент 2):
1 – ИК-лазер (локтевой сгиб); 2 – К-лазер (локтевой сгиб); 3 – ИК-лазер (кисть);
4 – К-лазер (кисть)

На рис. 14 представлены зависимости для пациента 1 (европейский тип кожи, малая глубина залегания сосудов ~1,5 мм), а рис. 15 соответствует измерениям пациента 2 (европейский тип кожи, большая глубина залегания сосудов ~2,5...3 мм). По полученным данным видно, что наилучший сигнал получается при измерении в области локтевого сгиба, как для красной (640 нм), так и для инфракрасной (805 нм) длины волны лазерного излучения. Следует отметить, что измерения в данной области при помощи датчика, работающего на пропускание

излучения через кожный покров, становятся невозможными, доказывая недостатки подобных приборов. При этом датчик обратного рассеянного света является незаменимым для регистрации сигналов в подобных случаях.

Кроме того, были получены зависимости выходного сигнала от изменения мощности лазерных диодов с выбранными длинами волн (рис. 16). Для удобства измерения проводились с постоянным значением расстояния между ЛД и ФПУ 10 мм.

Таким образом, данные, полученные экспериментальным путем, подтверждают теоретический расчет. Следовательно, оптимальное положение лазерных датчиков и фотоприемного устройства находится в диапазоне 10... 20 мм.

Заключение

На сегодняшний день имеется ряд достойных работ по применению пальцевых двухволновых одноканальных светодиодных ($\lambda_1 = 940 \pm 20$ нм; $\lambda_2 = 640 \pm 20$ нм) датчиков для ФПП («Акутест» авт. Малиновский Е. Л., «Спектротест» Рогаткин Д. А. и др.). Применение таких датчиков на СД неизбежно приводит к «физиологической помехе» при регистрации ФПП сигнала за счет разного количества поглощения света основными информативными составляющими кровотока – гемоглобином и оксигемоглобином. Следовательно, получить необходимую точность – менее 5 %, повторяемость и адекватность ФПП сигнала невозможно. В связи с этим авторами выполнены теоретические и практические работы по оптической части и разработан новый лазерный трехволновый двухканальный датчик с ФД для пульсоксиметрии с использованием третьей длинны волны ($\lambda = 805 \pm 0,75$ нм). В разработанном датчике нивелирована «физиологическая помеха при получении фотоплетизмограммы и получена погрешность измерений менее 5 % по отношению к приведенным приборам, например у «Акутест» погрешность составляет не более 30 %.

На основе проведенных теоретических и практических исследований разработана конструкция оптической части датчика.

При проведенные теоретических и практических работ получены:

– характеристики излучения лазеров при испускании и прохождении света в оптической пластине;

– зависимость излучения от расстояния до источника носит экспоненциальный характер и на расстоянии ~40 мм можно наблюдать полное затухание, распределение потока излучения будет идти по такому же закону;

– зависимость выходного сигнала ФД от расстояния между ЛД и ФД, максимальный сигнал получается при расстоянии ~5 мм между лазерным диодом и ФД, и получено оптимальное положение датчика соответствующему расстоянию $0,8 I_{\max} \dots 0,2 I_{\max}$, т.е. 10... 20 мм.

В качестве дополнительной защиты от помех в конструкцию оптического датчика добавлены прорези между источником и приемником с возможностью чернения при необходимости, основной функцией которых является устранение «паразитного» отраженного от поверхности кожи излучения.

В ходе медико-технических испытаний разработанного датчика в ООО «Яровит-Ярь», г. Москва, были получены зависимости выходного сигнала от изменения мощности лазерных диодов с выбранными длинами волн. Также в ходе испытаний данные, полученные экспериментальным путем, подтвердили теоретический расчет. Эксперимент показал, что оптимальное положение лазерных датчиков и фотоприемного устройства находится в диапазоне 10...20 мм.

Итак, данные теоретического расчета подтверждены результатами практического клинического исследования на пациентах, и определено наилучшее расположение поверхностного датчика на теле пациента.

Список литературы

1. Бугер П. Оптический трактат о градации света. М. : Изд-во АН СССР, 1950.
2. Буйлин В. А., Ларюшин А. И., Никитина М. В. Свето-лазерная терапия / под ред. проф. Е. И. Брехова. М. ; Тверь : Триада, 2004. 256 с.
3. Гайдук М. И., Григорьянц В. В., Зайцев В. Н. [и др.]. Биофизическое обоснование фотоплетизмографии в отраженном свете // Мед. техника. 1990. № 2. С. 4–8.

4. Lambert J. Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et mubrac // Ostwald's Klassiker den exakten. Wissenschaften. 1892. Nr. 31–33.
5. Troy T. L., Thennadil S. N. Optical properties of human skin in the near infra-red wavelength range of 1000 to 2200 nm // J. Biomed. Opt. 2001. Vol. 6, № 2. P. 167–176.
6. Kamal A. A., Harness J. B., Irving G., Mearns A. J. Skin photoplethysmography – a review // Comput Methods Programs Biomed. 1989. Vol. 28. P. 257–269.
7. Иржак Л. И. Гемоглобины и их свойства. М. : Медицина, 1975. 327 с.
8. Biophotonics. Optical Science and Engineering for the 21st Century / ed. by Xun Shen, R. Van Wijk. New York : Springer Science ; Business Media, Inc., 2005. 222 p.
9. Рогаткин Д. А., Дунаев А. В., Лапаева Л. Г. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии // Мед. техника. 2010. № 2. С. 31–36.
10. Ларюшин А. И., Хизбуллин Р. Н. Оптико-электронные приборы и биодозиметрический контроль в медицине : монография. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. 248 с.
11. Jacques S. L. The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers // Lasers in dermatology. B. : Springer-Verlag, 1991. P. 1–21.
12. Крекс Е. Оксигеметрия. М. : Медицина, 1978. 212 с.
13. Cheang P., Smit P. Обзор бесконтактной фотоплетизмографии. Loughborough Univ., 2003. P. 57–92.
14. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М. : Логос, 1993. 480 с.
15. Rogatkin D. A., Lapaeva L. G., Petritskaya E. N. [et al.]. Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and metrological provisions for that // Proc. SPIE. 2009. P. 7368.
16. Афанасьев А. И., Рогаткин Д. А., Сергиенко А. А., Шумский В. И. Методики и аппаратура неинвазивной оптической тканевой оксиметрии // Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии / под. ред. А. Н. Малова. Иркутск : Папирус2, 2008. С. 505–513.
17. Патент № 2398232 РФ. Устройство для калибровки медицинских диагностических спектрофотометрических приборов / Рогаткин Д. А., Лапаева Л. Г., Сидоров В. В. ; от 21.08.2008 ; опубл. 27.08.2010. Бюлл. № 24.
18. Хизбуллин Р. Н. Оптический двухканальный пульсоксиметр на основе лазерных датчиков для решения актуальных задач в медицинской практике // Фотоника. 2017. № 1. С. 144–157.
19. Галкин М. А., Невзоров В. П., Хизбуллин Р. Н. Оценка эффективности мануального воздействия с использованием лазерной плетизмографии высокого разрешения // Мануальная терапия. 2012. Т. 2, № 42. С. 42–48.
20. Ларюшин А. И., Галкин М. А., Хизбуллин Р. Н., Новиков В. А. Двухканальный лазерный фотоплетизмограф // Мир измерений. 2010. № 7. С. 22–28.
21. Рогаткин Д. А. Физические основы оптической оксиметрии // Медицинская физика. 2012. № 2. С. 97–114.
22. Галкин М. А., Семикин Г. И. Аппаратно-программное обеспечение диагностики сердечно-сосудистой системы человека с применением метода оптической плетизмографии высокого разрешения // Гуманитарный вестник. 2013. № 12.

References

1. Buger P. *Opticheskiy traktat o gradatsii sveta = Optical treatise on the gradation of light*. Moscow: Izdvo AN SSSR, 1950. (In Russ.)
2. Buylin V.A., Laryushin A.I., Nikitina M.V. *Sveto-lazernaya terapiya = Light-laser therapy*. Moscow; Tver: Triada, 2004:256. (In Russ.)
3. Gayduk M.I., Grigor'yants V.V., Zaytsev V.N. [et al.]. Biophysical substantiation of photoplethysmography in reflected light. *Med. tekhnika = Medical equipment*. 1990;(2):4–8. (In Russ.)
4. Lambert J. Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et mubrac. *Ostwald's Klassiker den exakten*. Wissenschaften. 1892:31–33.
5. Troy T.L., Thennadil S.N. Optical properties of human skin in the near infra-red wavelength range of 1000 to 2200 nm. *J. Biomed. Opt.* 2001;6(2):167–176.
6. Kamal A.A., Harness J.B., Irving G., Mearns A.J. Skin photoplethysmography – a review. *Comput Methods Programs Biomed.* 1989;28:257–269.
7. Irzhak L.I. *Gemoglobiny i ikh svoystva = Hemoglobins and their properties*. Moscow: Meditsina, 1975:327. (In Russ.)
8. Xun Shen, R. Van Wijk (ed.). *Biophotonics. Optical Science and Engineering for the 21st Century*. New York: Springer Science; Business Media, Inc., 2005:222.
9. Rogatkin D.A., Dunaev A.V., Lapaeva L.G. Metrological support of methods and devices of non-invasive medical spectrophotometry. *Med. tekhnika = Medical equipment*. 2010;(2):31–36. (In Russ.)
10. Laryushin A.I., Khizbullin R.N. *Optiko-elektronnye pribory i biodozimetricheskiy kontrol' v meditsine: monografiya = Optoelectronic devices and biosimetric control in medicine : monograph*. Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2018:248. (In Russ.)

11. Jacques S.L. The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers. *Lasers in dermatology*. B.: Springer-Verlag, 1991:1–21.
12. Kreps E. *Oksigometriya = Oxyhemometry*. Moscow: Meditsina, 1978:212. (In Russ.)
13. Cheang P., Smit P. *Obzor beskontaktnoy fotopletizmografii = Overview of contactless photoplethysmography*. Loughborough Univ. 2003:57–92. (In Russ.)
14. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov = Theory and calculation of optoelectronic devices*. Moscow: Logos, 1993:480. (In Russ.)
15. Rogatkin D.A., Lapaeva L.G., Petritskaya E.N. [et al.]. Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and metrological provisions for that. *Proc. SPIE*. 2009:73681.
16. Afanas'ev A.I., Rogatkin D.A., Sergienko A.A., Shumskiy V.I. Methods and equipment of noninvasive optical tissue oximetry. *Materialy XXVI shkoly po kogerentnoy optike i golografii = Materials of the XXVI School of coherent Optics and holography*. Irkutsk: Papirus2, 2008:505–513. (In Russ.)
17. Patent № 2398232 RF. Device for calibration of medical diagnostic spectrophotometric devices. Rogatkin D.A., Lapaeva L.G., Sidorov V.V.; 21.08.2008; publ. 27.08.2010, bull. № 24. (In Russ.)
18. Khizbullin R.N. Optical two-channel pulse oximeter based on laser sensors for solving urgent problems in medical practice. *Fotonika = Photonics*. 2017;(1):144–157. (In Russ.)
19. Galkin M.A., Nevzorov V.P., Khizbullin R.N. Evaluation of the effectiveness of manual exposure using high-resolution laser plethysmography. *Manual'naya terapiya = Manual therapy*. 2012;2(42):42–48. (In Russ.)
20. Laryushin A.I., Galkin M.A., Khizbullin R.N., Novikov V.A. Two-channel laser photoplethysmograph. *Mir izmereniy = The world of dimensions*. 2010;(7):22–28. (In Russ.)
21. Rogatkin D.A. Physical foundations of optical oximetry. *Meditsinskaya fizika = Medical physics*. 2012;(2):97–114. (In Russ.)
22. Galkin M.A., Semikin G.I. Hardware and software for diagnostics of the human cardiovascular system using the method of high-resolution optical plethysmography. *Gumanitarnyy vestnik = Humanitarian Bulletin*. 2013;(12). (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роберт Накибович Хизбуллин

доцент кафедры электротехнические
комплексы и системы,
Казанский государственный
энергетический университет
(Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51)
E-mail: Robert.Khizbullin@mail.ru

Robert N. Khizbullin

Associate professor of the sub-department
of electrical complexes and systems,
Kazan State Power Energy University
(51 Krasnoselskaya street, Kazan, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.04.2022

Принята к публикации/Accepted 12.05.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДОВ С ТКАНЬЮ ПРИ БИОИМПЕДАНСНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

**В. В. Антипенко¹, Е. А. Печерская², А. И. Левин³,
П. Е. Голубков⁴, И. Н. Камардин⁵, А. А. Анисимова⁶**

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

¹v.antipenko7@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³levin.alescha2013@yandex.ru,

⁴golpavpnz@yandex.ru, ⁵sehd@mail.ru, ⁶an.ryzhova18@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном мире большое внимание уделяется ранней диагностике и профилактике заболеваний пациентов, что связано с необходимостью разработки и совершенствования неинвазивных, легкодоступных и точных биомедицинских устройств с целью мониторинга параметров функционирования организма человека. Биоимпеданс – это неинвазивный метод, который находит разнообразные применения. Биологическая ткань при контакте с электродами под воздействием переменного тока демонстрирует сложное поведение импеданса, которое требует создания точных биофизических и электрических моделей. *Материалы и методы.* В данной работе рассмотрены модели взаимодействия контактов электрод–ткань, проанализированы факторы, влияющие на результат измерения импеданса. *Результаты.* На основании рассмотренных моделей взаимодействия контакта электрод–ткань предложен способ увеличения чувствительности измерения и точности измерения импеданса. *Выводы.* Успешное внедрение биоимпедансной диагностики зависит от базовой биофизической и электрической модели системы, а также взаимодействия электрода с тканью. Исследованные в работе способы взаимодействия электрода с тканью позволяют увеличить чувствительность, а также снизить погрешности измерений.

Ключевые слова: биоимпеданс, электрод, контакт, биологическая ткань, измерение биоимпеданса

Для цитирования: Антипенко В. В., Печерская Е. А., Левин А. И., Голубков П. Е., Камардин И. Н., Анисимова А. А. Исследование взаимодействия электродов с тканью при биоимпедансной диагностике // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 114–119. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-13

INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF ELECTRODES WITH TISSUE IN BIOPEDEANCE DIAGNOSIS

**V.V. Antipenko¹, E.A. Pecherskaya², A.I. Levin³,
P.E. Golubkov⁴, I.N. Kamardin⁵, A.A. Anisimova⁶**

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

¹v.antipenko7@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³levin.alescha2013@yandex.ru,

⁴golpavpnz@yandex.ru, ⁵sehd@mail.ru, ⁶an.ryzhova18@gmail.com

Abstract. *Background.* In the modern world, much attention is paid to the early diagnosis and prevention of diseases of patients, which is associated with the need to develop and improve non-invasive, easily accessible and accurate biomedical devices in order to monitor the parameters of the functioning of the human body. Bioimpedance is a non-invasive technique that has a variety of applications. Biological tissue in contact with electrodes under the influence of alternating current exhibits complex impedance behavior, which requires the creation of accurate biophysical and electrical models. *Materials and methods.* In this paper, the models of interaction between electrode-tissue contacts are considered, and the factors influencing the result of impedance measurement are analyzed. *Results.* Based on the considered models of electrode-tissue contact interaction, a method for increasing the sensitivity of measurement and the accuracy of impedance measurement is proposed. *Conclusions.* The successful implementation of bioimpedance diagnostics depends on the basic biophysical and electrical model of the system, as well as the interaction of the electrode with the tissue. The methods of interaction between the electrode and the tissue studied in the work make it possible to increase the sensitivity, as well as to reduce the measurement errors.

Keywords: bioimpedance, electrode, contact, biological tissue, bioimpedance measurement

For citation: Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Levin A.I., Golubkov P.E., Kamardin I.N., Anisimova A.A. Investigation of the interaction of electrodes with tissue in biopédance diagnosis. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):114–119. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-13

Введение

На данный момент в медицине будущего важнейшую роль отводят не лечению заболеваний пациентов, а их профилактике и прогнозированию с целью принятия превентивных мер. Это позволяет повысить эффективность лечения больного. Поэтому требуются новые подходы и методы для мониторинга здоровья. Перед разработчиками ставятся задачи создания биомедицинских устройств, обладающих условиями неинвазивности, а также удовлетворяющих по доступности и технико-экономическим параметрам. Необходимость определения состава тела человека актуальна для многих направлений деятельности и может применяться как в лечебно-профилактических учреждениях, в спортивно-медицинских центрах, так и фитнес-центрах. Определить состав тела человека и его индивидуальные особенности организма на тканевом уровне позволяет метод биоимпедансного анализа состава тела.

Метод измерения биоимпеданса

Метод биоимпедансного анализа (БИА) состава тела основан на способности ткани сопротивляться электрическому току в зависимости от частоты. Данный метод БИА является неинвазивным, одно из преимуществ заключается в сохранении целостности структуры ткани и комфортности процедуры измерения. БИА является более точным методом анализа состава тела по сравнению с основными методами, такими как антропометрическое измерение, индекс массы тела и измерение кожных складок [1]. Метод биоимпедансного анализа также является экономически эффективным и менее трудоемким по сравнению с альтернативными методами, требующими дорогостоящих инструментов, таких как магнитно-резонансная томография (МРТ), биохимический анализ и др. [2, 3]. Для успешного применения биоимпедансного анализа различных тканей необходима разработка ее биофизической модели, а также электрической схемы замещения. Биофизическая модель упрощает структуру для анализа, а ее эквивалентная электрическая модель приравнивает структуру к расположению электрических компонентов (резисторов, конденсаторов) для характеристики свойств.

Основные этапы, используемые при измерении и анализе состава тела с использованием БИА, представлены на блок-схеме (рис. 1) [4, 5].

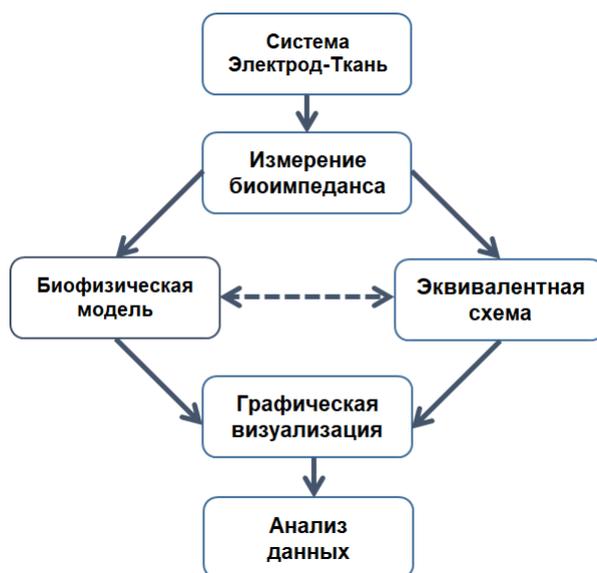


Рис. 1. Основные этапы измерения биоимпеданса

Этапы включают:

- 1) размещение материала-электрода для пропускания переменного тока через систему;
- 2) измерение импеданса в зависимости от частоты;

- 3) разработку биофизической модели и эквивалентной электрической схемы замещения;
- 4) графическое представление, визуализацию данных для анализа параметров модели;
- 5) анализ и обработку результатов измерений.

Для получения биоимпедансного анализа используется специальный прибор – биоимпедансный анализатор. Он состоит из аппаратной части, программного обеспечения на базе персонального компьютера и электродов. При помощи электродов создается воздействие на тело пациента от аппаратной части в виде слабого электрического тока (до 1 мА) заданной частоты в диапазоне от 250 Гц до 2,5 МГц. Согласно разработанным алгоритмам создано программное обеспечение, которое управляет аппаратной частью. Ответная реакция воспринимается в виде разности потенциалов на определенном участке тела. Для выполнения расчетов используются следующие данные пациента: пол, рост, вес, возраст, активная и реактивная составляющая сопротивления. На основании измерений биоимпеданса и исходных данных, определяется совокупность физиологических параметров организма. Отчет может быть выведен на экран, сохранен в виде файла и распечатан. Регистрируется и визуализируется динамика изменений показателей.

Исследование взаимодействия контакта электрода с тканью

Измерение биоимпеданса исследуемого объекта происходит под действием внешнего электрического поля из двух источников: подвижность ионов, присутствующих в его жидкости и матрице, и поляризации матрицы. Подвижность ионов может быть внешней по отношению к исследуемому объекту (например, ионы, присутствующие во внеклеточной жидкости), внутренней по отношению к исследуемому объекту (например, ионы, присутствующие в его внутриклеточной жидкости), через клетки (например, прохождение ионов из внеклеточной во внутриклеточную жидкость через клеточную мембрану) [6]. Свойство материала, связанное с поляризацией матрицы, называется полной относительной диэлектрической проницаемостью и эквивалентно конденсаторам с параллельными пластинами. Таким образом, исследуемый объект представляет собой сложную систему, состоящую из внеклеточной жидкости, мембраны и внутриклеточной жидкости. В результате исследуемый объект образует структуру проводник-диэлектрик-проводник, обладающую емкостными свойствами [7, 8].

Аппарат, измеряющий параметры биоимпеданса, взаимодействует с исследуемым объектом через электроды. В области контакта электрода с тканью протекают сложные физические и химические процессы, влияющие на результаты измерения. В металлических электродах ток образован электронами, а в ткани – ионами. При контакте электрода с электролитом между ними устанавливается равновесная разность потенциалов, а у поверхности раздела формируется двойной электрический слой (рис. 2).

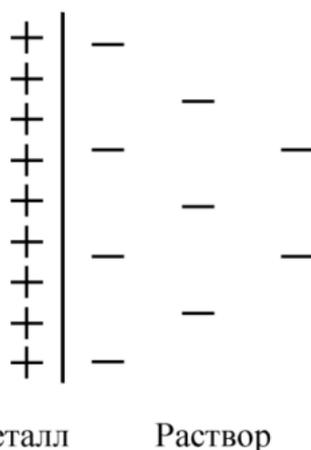


Рис. 2. Двойной электрический слой у контакта

При этом атомы материала электрода могут переходить в электролит, а ионы электролита – осажаться на поверхность электрода. В случае биоимпедансных измерений растворение электрода недопустимо, поэтому применяют электроды из серебра, платины и других инертных металлов, атомы которых лишь участвуют в обмене электронами с ионами.

Кожа состоит из трех основных слоев: наружный слой – эпидермис, дерма и подкожный слой. Эквивалентная схема контакта электрода с кожей будет выглядеть как на рис. 3 [7, 8].

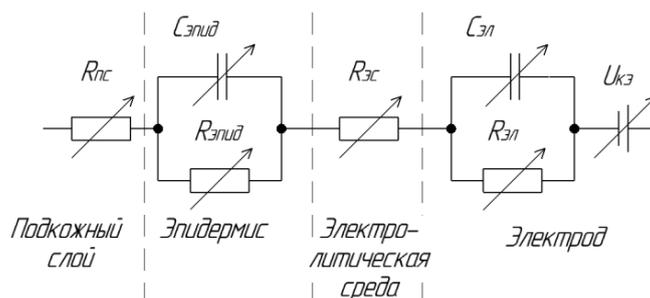


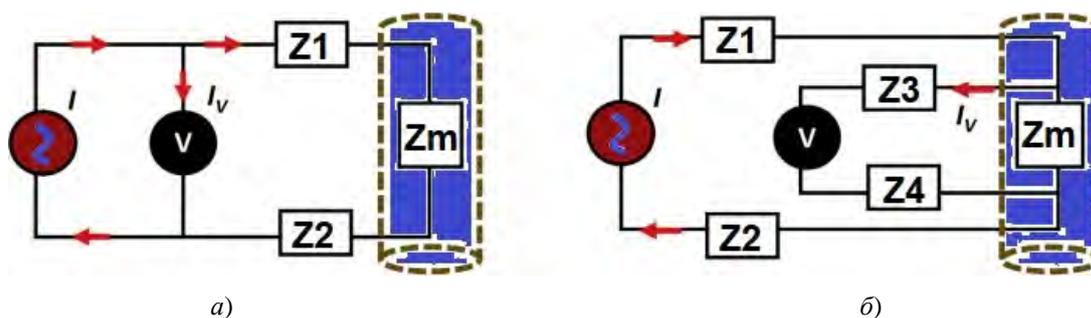
Рис. 3. Эквивалентная схема контакта электрода с кожей

Согласно приведенной модели дерма имеет чисто резистивный характер $R_{пс}$. Параллельный контур $R_{эпид}/C_{эпид}$ представляет эпидермис. Сопротивление $R_{эс}$ обусловлено обменом ионами и сильно зависит от наличия пота под электродом. Параллельный контур из $R_{эл}/C_{эл}$ отражает превращение электронного тока в ионный ток. В конце цепи представлен источник напряжения $U_{кэ}$. При воздействии электрического тока на исследуемый объект у поверхности электрода протекают окислительно-восстановительные реакции. Величина разности потенциалов между электродом и электролитом при этом изменяется. Это явление называется поляризацией электрода, что является нежелательным. Для снижения эффекта поляризации применяются $Ag/AgCl$ электроды. Это связано с тем, что на поверхности серебряного электрода формируется слой $AgCl$, а ионы Cl^- присутствуют в ткани. При изменении направления тока происходит увеличение или уменьшение толщины слоя $AgCl$.

Основные проблемы связаны с наложением электродов на поверхность кожи. Это обусловлено тем, что тонкий слой эпидермиса (10–20 мкм) в сухом состоянии на постоянном токе имеет очень высокое удельное сопротивление, 10^4 – 10^5 Ом·м. На переменном токе с ростом частоты удельное сопротивление постепенно уменьшается до $\approx 10^2$ Ом·м на 1 МГц. Для их преодоления необходимо, во-первых, очистить кожу в местах наложения электродов и, во-вторых, нанести на кожу специальный проводящий гель или солевой раствор [3, 4].

Полный импеданс контакта состоит из следующих последовательно соединенных элементов: импеданса контакта электрода с гелем, импеданса геля и импеданса эпидермиса, уменьшенного за счет пропитки гелем. В целом модуль импеданса контакта заметно уменьшается с ростом частоты. При применении электродов с небольшой площадью поверхности нелинейные искажения могут быть значительными.

Конкретная классификация электродной системы материала зависит от количества и расположения электродов (рис. 4).

Рис. 4. Схемы измерений биоимпеданса:
а – двухэлектродная система; б – четырехэлектродная система

Двумя распространенными типами являются двухэлектродная и четырехэлектродная конфигурации. Двухэлектродная конфигурация (см. рис. 4,а) использует одну пару электродов для воздействия как в качестве электрода тока, так и в качестве электрода напряжения. Несмотря на ряд ограничений, двухэлектродное подключение широко используется в измерении импеданса для анализа клеточных структур. Один из самых распространенных способов подключения – это четырехэлектродная система (см. рис. 4,б), которая подразумевает два разных набора электродов для измерения тока и напряжения. Электрод напряжения выбирается с очень высоким входным сопротивлением, чтобы цепь напряжения потребляла незначитель-

ный ток. Следовательно, измеряемое напряжение освобождается от помех контактного сопротивления, что повышает точность и чувствительность измерений. Высокая чувствительность позволяет в режиме реального времени контролировать динамические события, обусловленные воздействием внешних раздражителей (прием лекарств, изменение температуры и т.д.). В настоящее время разрабатываются инновационные чипы для измерения биоимпеданса конфигурации с четырьмя электродами. Один из чипов позволяет уменьшить ошибки, вызванные импедансом интерфейса между измеряемым образцом и электродами.

Заключение

Биоимпедансный анализ является неинвазивным и доступным для мониторинга здоровья и ранней диагностики в организме человека. Успешное внедрение БИА зависит от базовой биофизической и электрической модели системы, а также взаимодействия электрода с тканью. Проанализированные в работе способы взаимодействия электрода с тканью позволяют увеличить чувствительность и точность измерений. Полученные результаты целесообразно использовать при создании современных биосенсоров, улучшенных конструкций электродов, при создании машинного обучения для анализа данных и исследований в области тканевой инженерии. Это способствует в целом развитию отечественной биомедицинской техники.

Список литературы

1. Heitmann B. L. Evaluation of body fat estimated from body mass index, skinfolds and impedance. A comparative study // *European Journal of Clinical Nutrition*. 1990. Vol. 44. P. 831–837.
2. Dumler F., Kilates C. Use of bioelectrical impedance techniques for monitoring nutritional status in patients on maintenance dialysis // *Journal of Renal Nutrition*. 2000. Vol. 10. P. 116–124.
3. Paudel K., Visser A., Burke S. [et al.]. Can bioimpedance measurements of lean and fat tissue mass replace subjective global assessments in peritoneal dialysis patients? // *Journal of Renal Nutrition*. 2015. Vol. 25. P. 480–487.
4. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review // *Biosystems engineering*. 2020. Vol. 197. P. 170–178.
5. Antipenko V. V. [et al.]. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1515. P. 052075.
6. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy // *Malawi Medical Journal*. 2017. Vol. 29. P. 155–159.
7. Lukaski H. C. Evolution of bioimpedance: A circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research // *European Journal of Clinical Nutrition*. 2013. Vol. 67. S2–S9.
8. Pethig R., Kell D. B. The passive electrical properties of tissues and cell suspensions // *Medicine and Biology*. 1987. Vol. 3. P. 933–970.
9. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Kulkov V. N. [et al.]. Development of a radiofrequency ablation device with simultaneous determination of the transmural effect achievement // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM (Altay, 2021-June)*. 2021. P. 385–389.
10. Антипенко В. В., Печерская Е. А., Антипенко С. А. Схема для одновременного измерения биоимпеданса кожи, восприимчивости и потенциала // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы*. Пенза, 2021. С. 270–272.

References

1. Heitmann B.L. Evaluation of body fat estimated from body mass index, skinfolds and impedance. A comparative study. *European Journal of Clinical Nutrition*. 1990;44:831–837.
2. Dumler F., Kilates C. Use of bioelectrical impedance techniques for monitoring nutritional status in patients on maintenance dialysis. *Journal of Renal Nutrition*. 2000;10:116–124.
3. Paudel K., Visser A., Burke S. [et al.]. Can bioimpedance measurements of lean and fat tissue mass replace subjective global assessments in peritoneal dialysis patients? *Journal of Renal Nutrition*. 2015;25:480–487.
4. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review. *Biosystems engineering*. 2020;197:170–178.
5. Antipenko V.V. [et al.]. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:052075.
6. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy. *Malawi Medical Journal*. 2017;29:155–159.

7. Lukaski H.C. Evolution of bioimpedance: A circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2013;67:S2–S9.
8. Pethig R., Kell D.B. The passive electrical properties of tissues and cell suspensions. *Medicine and Biology*. 1987;3:933–970.
9. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Kulkov V.N. [et al.]. Development of a radiofrequency ablation device with simultaneous determination of the transmural effect achievement. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM (Altay, 2021-June)*. 2021:385–389.
10. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Antipenko S.A. Scheme for simultaneous measurement of skin bioimpedance, susceptibility and potential. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy = Information technologies in science and education. Problems and prospects*. Penza, 2021:270–272. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Викторович Антипенко

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: v.antipenko7@yandex.ru

Vladimir V. Antipenko

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Алексей Игоревич Левин

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

Aleksey I. Levin

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

Павел Евгеньевич Голубков

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

Pavel E. Golubkov

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

Игорь Николаевич Камардин

кандидат исторических наук, доцент,
директор Центра организации приема
и довузовской подготовки,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sehd@mail.ru

Igor' N. Kamardin

Candidate of historical sciences, associate professor,
director of the Center for Admission
and Pre-University Training,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анна Антоновна Анисимова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an.ryzhova18@gmail.com

Anna A. Anisimova

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

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

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022

Принята к публикации/Accepted 17.05.2022

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 531.741

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов¹, А. В. Гладков², С. А. Здобнов³, Д. М. Марков⁴, Н. В. Недопекин⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,4,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ³ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальной задачей при отработке новых типов изделий авиационной техники является создание датчиков угловых перемещений, обладающих высокой стабильностью, точностью измерений и надежностью. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, теории электрических цепей и электромагнитного поля. При проектировании конструкций датчиков применялась система автоматизированного проектирования КОМПАС. *Результаты.* В результате проведенной работы разработан трехканальный датчик угловых перемещений и два варианта исполнения вторичного преобразователя. Составлена схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений на основе которой получено выражение, определяющее зависимость значения выходной ЭДС от углового перемещения ротора датчика.

Ключевые слова: датчик перемещений, статор, ротор, схема замещения, обмотка, вторичный преобразователь

Для цитирования: Трофимов А. А., Гладков А. В., Здобнов С. А., Марков Д. М., Недопекин Н. В. Трехканальный датчик угловых перемещений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 120–126. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

THREE-CHANNEL ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR

A.A. Trofimov¹, A.V. Gladkov², S.A. Zdobnov³, D.M. Markov⁴, N.V. Nedopekin⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia
^{1,4,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ³ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* The actual problem in the development of new types of aviation products is the creation of angular displacement sensors with high stability, measurement accuracy and reliability. *Materials and methods.* The methods of integral and differential calculus, the theory of electric circuits and electromagnetic field were used to solve the problems. The computer-aided design system KOMPAS was used in the design of sensor structures. *Results.* As a result of this work, a three-channel angular displacement sensor and two versions of the secondary converter have been developed. The substitution diagram of transformer angular displacement sensor on the basis of which the expression defining dependence of output EMF value on angular displacement of the sensor rotor is obtained.

Keywords: displacement sensor, stator, rotor, substitution diagram, winding, secondary converter

For citation: Trofimov A.A., Gladkov A.V., Zdobnov S.A., Markov D.M., Nedopekin N.V. Three-channel angular displacement sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):120–126. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

При оснащении изделий авиационной техники актуальной задачей является разработка датчиков угловых перемещений, которые входят в состав систем управления самолета, в том числе в систему контроля параметров шасси, для измерения значения перемещения штока амортизатора передней и основных опор шасси [1–4].

Основным недостатком датчиков угловых перемещений, используемых в системах самолета, является недостаточная надежность, так как съем информации осуществляется с единственного канала.

Разрабатываемый датчик угловых перемещений имеет три информационных канала. Каждый канал датчика разделен по электрической схеме и выполнен конструктивно независимым.

Конструктивная схема датчика представлена на рис. 1.

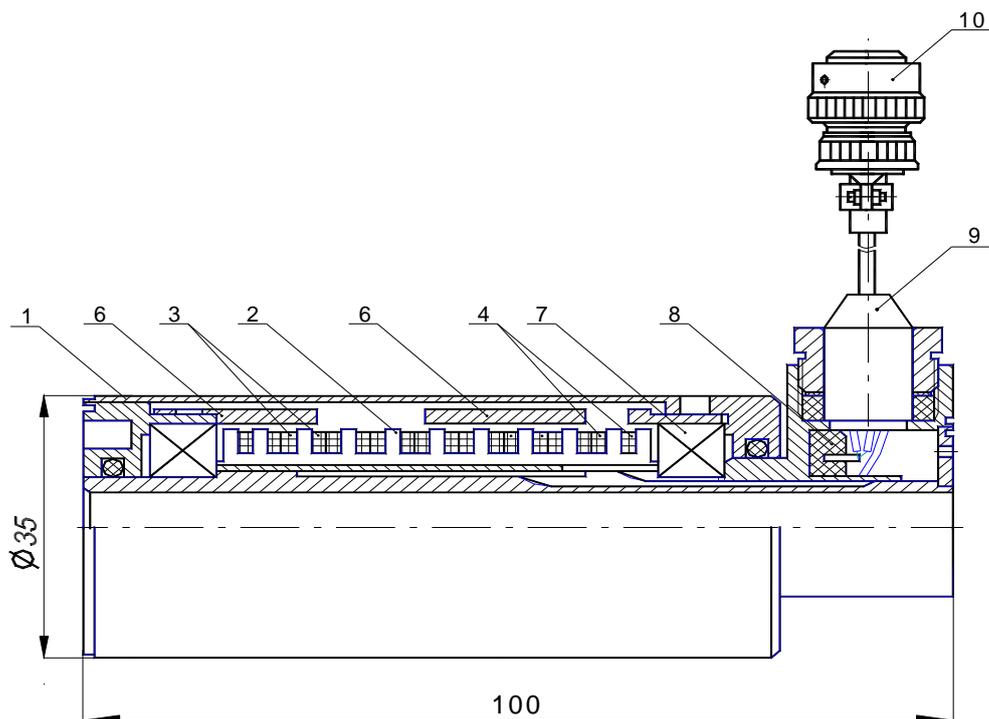


Рис. 1. Конструктивная схема датчика угловых перемещений

Основными элементами конструкции датчика угловых перемещений являются: корпус датчика 1, статор 2, на котором располагаются три секции питающих обмоток 3 и шесть секций измерительных обмоток 4, ротор 6, подшипники качения 7, контактная колодка 8, кабельная перемычка 9, заканчивающаяся разъемом типа СНЦ, обеспечивающим съем информации с датчика и подачу напряжения питания. Датчик жестко крепится на валу с помощью зубцового соединения.

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. В нем измерительные и питающие обмотки располагаются в кольцевых проточках статора. Снаружи статора располагается ротор с перфорированными окнами. Датчик работает следующим образом: при подаче на обмотки питания переменного тока в секциях измерительной обмотки индуцируется переменная ЭДС (E), амплитуда которой зависит от положения ротора относительно полюсов статора.

Так как для авиационной техники требуются датчики, работоспособные в жестких условиях эксплуатации (широкий диапазон воздействующих температур, вибрация, удары, линейные ускорения, влажность и т.д.), необходимо найти функцию преобразования датчика и определить параметры, которые могут повлиять на метрологические и надежность характеристики датчика в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов. Для решения поставленной задачи составим схему замещения трансформаторного датчика угловых перемещений, приведенную на рис. 2 [5].

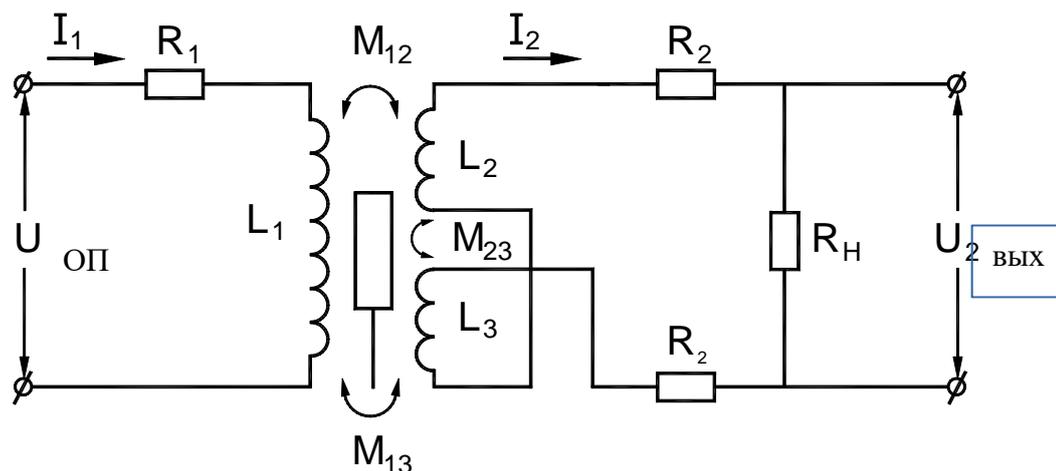


Рис. 2. Схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений

На схеме замещения приняты следующие обозначения: R_1 – сопротивление обмотки питания; $U_{\text{оп}}$ – напряжение, поступающее на обмотку питания; L_1 – индуктивность первичной обмотки; M_{12} и M_{13} – взаимные индуктивности соответственно верхней и нижней секций вторичной обмотки; M_{23} – взаимные индуктивности секций вторичной обмотки; L_2 и L_3 – индуктивности соответственно, верхней и нижней секций вторичной обмотки; R_H – сопротивление нагрузки, $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение.

Уравнения Кирхгофа для цепи первичной обмотки:

$$U_{\text{оп}} = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_2, \quad (1)$$

где $M_{12} = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$; $M_{13} = k\sqrt{L_1 \cdot L_3}$; k – коэффициент связи катушек, показывающий, какая доля потока, созданного током в контуре, пронизывает соседний контур.

Для цепи вторичной обмотки:

$$[2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]I_2 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_1 = 0, \quad (2)$$

где $M_{23} = k\sqrt{L_2 \cdot L_3}$

Выражение для тока нагрузки имеет следующий вид:

$$I_2 = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1) \cdot [2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (3)$$

Выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений:

$$U_{\text{вых}} = I_2 R_H = \frac{j\omega U_{\text{оп}} R_H (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 \cdot (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1) \cdot [2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (4)$$

Угол сдвига фазы выходного напряжения относительно напряжения питания:

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega [R_1 \cdot (L_2 + L_3 - 2M_{23}) + L_1 (2R_2 + R_H)]}{R_1 (2R_2 + R_H) + \omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 - \omega^2 L_1 [L_2 + L_3 - 2M_{23}]} \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) характеризуют выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений для определенного положения сердечника. Из уравнения (4) видно, что для достижения линейного выходного напряжения датчика необходимо, чтобы при перемещении якоря индуктивность первичной обмотки L_1 и величина $(L_2 + L_3 - 2M_{23})$ оставались неизменными, а разность взаимных индуктивностей $(M_{12} - M_{13})$ изменялась линейно в зависимости от значения величины перемещения якоря.

Для дифференциального трансформатора, имеющего линейную характеристику преобразования, при $R_H \rightarrow \infty$ большинством членов уравнений (4) и (5) можно пренебречь.

Выходное напряжение с датчика будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{j\omega U_{\text{оп}}(M_{12} - M_{13})}{R_1 + j\omega L_1}. \quad (6)$$

Значение угла сдвига фазы будет определяться как

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{\omega L_1}{R_1}. \quad (7)$$

ЭДС секций вторичной обмотки трансформаторного датчика в соответствии с работой [7] определяется выражениями

$$E_1 = \omega M_o \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o}\right); \quad (8)$$

$$E_2 = \omega M_o \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o}\right), \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения питания; M_o – взаимная индуктивность секции вторичной обмотки и первичной обмотки при расположении сердечника на нейтрали трансформаторного датчика; $Z_{\text{оп}}$ – полное сопротивление первичной обмотки (обмотки питания); x – перемещение сердечника относительно электрической нейтрали датчика; m – изменение взаимной индуктивности секции вторичной обмотки и первичной обмотки.

Выражая величины E_1 и E_2 в долях выходной ЭДС, приходящейся на единицу перемещения якоря, получим

$$E_1 = a U_{\text{оп}} \left(1 - \frac{ex}{a}\right) = E_o \left(1 - \frac{ex}{a}\right); \quad (10)$$

$$E_2 = a U_{\text{оп}} \left(1 + \frac{ex}{a}\right) = E_o \left(1 + \frac{ex}{a}\right), \quad (11)$$

где E_o – ЭДС на зажимах секций вторичной обмотки при расположении якоря в электрической нейтрали датчика; e – изменение вторичной ЭДС, приходящееся на единицу перемещения сердечника;

$$a = \frac{\omega_o M_o}{z_{\text{оп}}} = \frac{E_o}{E_{\text{оп}}} \quad (12)$$

Значение выходной ЭДС датчика при встречном включении вторичной обмотки определяется выражением

$$E_2 - E_1 = 2E_o \frac{e}{a} x. \quad (13)$$

В полученном выражении, в отличие от выражения (7), значение выходной ЭДС датчика непосредственно связано с перемещением сердечника.

Для дальнейшей обработки выходной сигнал с трех каналов через кабельную перемычку поступает во вторичный преобразователь.

На рис. 3 приведена структурная схема одного канала вторичного преобразователя, предназначенного для обработки сигналов с чувствительного элемента (ЧЭ) датчика.

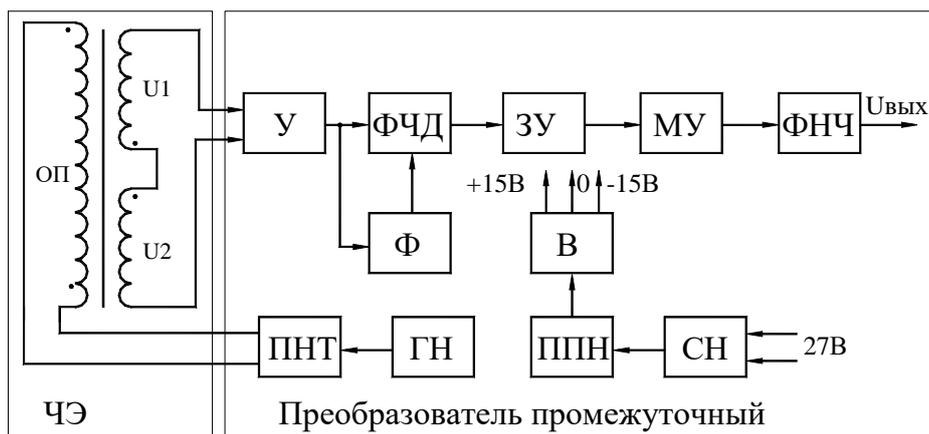


Рис. 3. Структурная схема одного канала вторичного преобразователя

Генератор напряжения (ГН) формирует напряжение переменного тока синусоидальной формы частотой $\sim 7 \dots 10$ кГц. Это напряжение в преобразователе «напряжение-ток» (ПНТ) преобразуется в стабильный ток (8–12 мА), который подается в обмотку питания (ОП) чувствительного элемента (ЧЭ) датчика.

В измерительных обмотках, включенных встречно, индуцируются напряжения U_1 и U_2 . Разностный сигнал с измерительных обмоток ($U_1 - U_2$) поступает на вход предварительного усилителя (У). Далее усиленное переменное напряжение подается на фазочувствительный детектор (ФЧД), управление которым осуществляется сигналом формирователя (Ф) синхронно с измеряемым напряжением. Выпрямленное напряжение сохраняется в запоминающем устройстве (ЗУ), далее нормируется по величине в масштабном усилителе (МУ). После фильтра нижних частот (ФНЧ) выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = K_y(U_1 - U_2), \quad (14)$$

где K_y – коэффициент преобразования.

Питание преобразователя осуществляется от источника напряжения постоянного тока 27 В. В преобразователе имеется блок питания, рассчитанный на напряжения ± 15 В и состоящий из стабилизатора напряжения (СН), преобразователя постоянного напряжения в переменное (ППН) и выпрямителя (В).

В настоящее время разрабатывается электронный модуль для датчика угловых перемещений с использованием микропроцессора, который позволит значительно снизить габаритно-весовые показатели вторичного преобразователя, повысить точность измерения, а также даст возможность совместить ЧЭ и электронный модуль в одном корпусе.

Электронный модуль (ЭМ) состоит из:

- устройства питания датчика, обеспечивающего питание датчика импульсами тока прямоугольной (сглаженной) формы;
- входных усилителей, выполненных на сдвоенном операционном усилителе AD823AR;
- устройства преобразования данных.

Условное графическое изображение электронного модуля приведено на рис. 4.

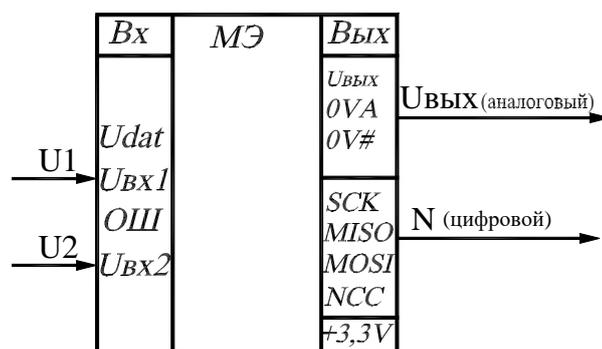


Рис. 4. Условное графическое изображение электронного модуля

В соответствии с заложенной программой микроконтроллер формирует последовательность импульсов на входе устройства питания датчика, которая преобразуется в импульсы тока. Длительность и количество импульсов в последовательности определяются электромагнитными процессами в датчике и формируются программным образом.

Выходные сигналы с датчика $U1$ и $U2$, амплитуда которых зависит от угловых перемещений, поступают на входные усилители. Отрицательная часть импульсов срезается ограничительными диодами.

Усилители обеспечивают усиление входных сигналов с датчика до уровня 2,4 В, необходимого для работы встроенного АЦП микропроцессора. За счет конденсаторов обеспечивается фильтрация и сглаживание импульсных сигналов до формы усеченной косинусоиды. Выборка амплитуды по максимуму сигнала обеспечивается программной задержкой относительно входных импульсов.

Устройство преобразователя данных выполнено на микропроцессоре фирмы Silicon Labs C8051F007, имеющего в своем составе: 12-разрядный АЦП с 4-входовым мультиплексором, 12-разрядный ЦАП, 8-разрядный цифровой порт и внутреннюю Flash-память программ. Доступ к памяти программ обеспечивается через контактные площадки 1–7 JTAG порта. Оцифрованные значения входных сигналов с полуобмоток датчика $U1$, $U2$ преобразуются в код в виде функции преобразования:

$$N = \left(\frac{U1 - U2}{U1 + U2} \cdot k_1 + k_2 \right) \cdot \theta_{\circ} + U_{\text{ПД}}, \quad (15)$$

где N – выходной код; k_1 , k_2 – нормирующие коэффициенты; θ_{\circ} – температурный коэффициент влияния; $U_{\text{ПД}}$ – код оценки влияния амплитуды питания датчика.

Выходной код длиной три байта выдается по каналу SPI по запросу от внешнего устройства. Первые два байта – информация о перемещении, третий байт – информация диагностики состояния датчика.

Выходной код выдается через встроенный ЦАП в виде аналогового сигнала 0–2,4 В (для работы с аналоговыми регистраторами).

Список литературы

1. Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С. [и др.]. Датчик угловых перемещений для газотурбинного двигателя // Измерения. Мониторинг Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 71–76.
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. 18–21.
3. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
4. Трофимов А. А. Датчик угловых перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 13–14.
5. Шидлович Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение. М., 1966.
6. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.
7. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.

References

1. Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S. [et al.]. Angular displacement sensor for a gas turbine engine. *Izmereniya. Monitoring Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring Management. Control.* 2021;(2):71–76. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor structures for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment.* 2010;(10):18–21. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2012;(9):4–6. (In Russ.)

4. Trofimov A.A. Angular displacement sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):13–14. (In Russ.)
5. Shidlovich L.Kh. *Differentsial'nye transformatory i ikh primeneniye* = . Moscow, 1966. (In Russ.)
6. Urakseev M.A., Kagarmenov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;(1):33–36. (In Russ.)
7. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monogr. = Mutually inductive displacement sensors : monogr.* Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (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: iit@pnzgu.ru

Aleksey 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)

Алексей Владимирович Гладков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

Aleksey V. Gladkov

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

Сергей Александрович Здобнов

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

Sergey A. Zdobnov

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

Дмитрий Максимович Марков

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

Dmitriy M. Markov

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

Никита Вячеславович Недопекин

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

Nikita V. Nedopekin

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 8.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 12.03.2022

Принята к публикации/Accepted 20.04.2022