

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Скрябин Ю. М.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЦИОНАЛЬНОЙ
АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА
НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

5

Федоров С. В.

КОММУТИРУЕМЫЙ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ
ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

14

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Хасанишина Н. А., Бадеев А. В., Дудоров Е. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО
РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

22

Трофимов А. А., Кикот В. В., Здобнов С. А., Забродин С. О., Жуков Т. О.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ
ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

32

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Агаев Ф. Г., Омаров М. Э.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЗЕМНОГО ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО
МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПЛОЩАДИ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ

40

Ахмедова С. О., Джаббарлы Б. Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ
ЖИДКОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ИЗ-ЗА ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

47

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Алтай Е. А.

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ
И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ
ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

53

Селина А. Д., Венецианский А. С.

ЗНАЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ ВОДИТЕЛЯ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

65

Терешин Н. И., Кузьмин А. В.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА
ОСЛОЖНЕНИЙ ПРИ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ

72

Карташов И. С., Привалова С. В., Кузьмин А. В.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАРУЧНОГО ТРЕХОСЕВОГО
АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

78

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Skryabin Yu.M.

DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF A RATIONAL
ANALYZING FUNCTION USING THE METHOD OF LEAST SQUARES

5

Fedorov S.V. A SWITCHED MULTIDIFFERENTIAL OPERATIONAL
AMPLIFIER FOR A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM

14

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Murashkina T.I., Badeev V.A., Khasanshina N.A., Badeev A.V., Dudorov E.A.

MODELING OF THE PARAMETERS OF A FIBER-OPTIC
REFRACTOMETRIC CONVERTER

22

Trofimov A.A., Kikot V.V., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Zhukov T.O.

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MULTILAYER PIEZO ACTUATORS
FOR CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

32

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Agayev F.G., Omarov M.E.

OPTIMIZATION OF GROUND PHOTOMETRIC METHOD
OF MEASUREMENT OF VEGETATION LEAF AREA INDEX

40

Ahmedova S.O., Jabbarli B.R.

INVESTIGATION OF THE MEASUREMENT ERROR OF THE TURBIDITY
OF THE LIQUID ARISING FROM THE DEPOSITION OF PARTICLES

47

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Altay Y.A.

NOISE-RESISTANCE AND ACCURACY ASSESSMENTS
ECG SIGNAL PROCESSING SYSTEMS BASED ON FILTERING METHODS

53

Selina A.D., Venetsiansky A.S.

THE IMPORTANCE OF MONITORING THE HEALTH
OF A VEHICLE DRIVER

65

Tereshin N.I., Kuzmin A.V.

DEVELOPMENT OF A STROKE RISK SCALE WEB APPLICATION

72

Kartashov I.S., Privalova S.V., Kuzmin A.V.

SPECTRAL ANALYSIS OF DATA FROM A WRIST-WORN THREE-AXIS
ACCELEROMETER TO DETERMINE PHYSICAL ACTIVITY

78

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 51.74

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЦИОНАЛЬНОЙ АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Ю. М. Скрябин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
meh-record@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Настоящее исследование относится к области локации летательных аппаратов с помощью средств электростатической разведки. Для цифровой обработки нестационарных электростатических сигналов датчиков рассматриваемой системы обычно используется свертка с анализирующей функцией, в том числе и специального вида под конкретный сигнал. В настоящей работе предлагается новый алгоритм синтеза анализирующей функции. *Материалы и методы.* В качестве исходного метода синтеза использовался метод наименьших квадратов (МНК). Уравнения МНК описывают целевые свойства рациональной анализирующей функции. Свойства выбраны в соответствии с практикой цифровой обработки на основе модифицированной вейвлет-функцией Морле. Кроме того, анализирующая функция выбиралась подобной анализируемой. При записи свойств функций в виде уравнений МНК интегралы раскрывались через основную теорему о вычетах функции. *Результаты.* Описан и реализован алгоритм, который определяет коэффициенты анализирующей функции программным способом. *Выводы.* Представленный алгоритм определяет коэффициенты анализирующей функции более точно и за гораздо меньшее машинное время, чем алгоритм на основе градиентного поиска.

Ключевые слова: электростатический сигнал, электростатический мониторинг, электростатическая локация, цифровая обработка сигналов, время-частотное распределение

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90028.

Благодарности: выражаю благодарность своему научному руководителю Потехину Дмитрию Станиславовичу за критику настоящего исследования.

Для цитирования: Скрябин Ю. М. Определение коэффициентов рациональной анализирующей функции с помощью метода наименьших квадратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 5–13. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-1

DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF A RATIONAL ANALYZING FUNCTION USING THE METHOD OF LEAST SQUARES

Yu.M. Skryabin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
meh-record@yandex.ru

Abstract. *Background.* This research relates to the field of aircraft location using electrostatic reconnaissance equipment. For digital processing of non-stationary electrostatic sensor signals of the system in question, convolution from the

analyzing function, including a special type for a specific signal, is usually used. In this paper, a new algorithm for the synthesis of the analyzing function is proposed. *Materials and methods.* The least squares method was used as the initial synthesis method. The equations describe the target properties of a rational analyzing function. The properties are selected in accordance with the algorithm of using the modified Morlet wavelet function. In addition, the analyzing function was chosen to be similar to the one being analyzed. When writing the properties of functions in the form of equations, the integrals were revealed through Cauchy's residue theorem. *Results.* An algorithm is described and implemented that determines the coefficients of the analyzing function programmatically. *Conclusions.* The presented algorithm determines the coefficients of the analyzing function more accurately and in much less machine time than the algorithm based on gradient search.

Keywords: electrostatic signal, electrostatic monitoring, electrostatic location, digital signal processing, time-frequency distribution

Financing: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of a scientific project № 20-37-90028.

Acknowledgements: i would like to express my gratitude to my scientific supervisor Dmitry Stanislavovich Potekhin for criticizing this study.

For citation: Skryabin Yu.M. Determination of the coefficients of a rational analyzing function using the method of least squares. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1): 5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-1

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в настоящее время и их количество только растет. Не все пользователи БПЛА соблюдают законы по воздушному движению и пролет БПЛА на определенных территориях, что необходимо контролировать, так как данные аппараты могут нести определенные угрозы жизни людей или порчи имущества или нарушать законы о частной собственности. Контроль за их движением включает в себя обнаружение и распознавание БПЛА, которые пересекают границы охраняемой территории [1].

Радиолокационные системы (РЛС) имеют более низкую вероятность обнаружения БПЛА, нежели пилотируемых летательных аппаратов. Это связано с тем, что БПЛА, как правило, обладают малой эффективной площадью рассеяния радиоволн и могут летать на низких и сверхнизких высотах, на которых становятся сильны отражения от подстилающей поверхности. Кроме того, возле гражданских строений необходимо соблюдать экологические нормы по электромагнитному излучению. Поэтому РЛС совмещают с системами детектирования на ином физическом принципе работы, такими как оптические, звуковые и радиотехнические средства разведки [2].

Одной из возможных систем обнаружения БПЛА может являться система электростатической локации [3]. Работа данных систем основана на измерении квазистатического электрического поля вдоль границы охраняемого периметра в определенных точках. Ввиду того, что БПЛА, как и любой другой объект, движущийся в атмосфере, неизбежно несет электростатический заряд, то он создает характерные возмущения электростатического поля вблизи поверхности. В одном из предшествующих исследований было выявлено, что для определения параметров траектории БПЛА, пересекающего периметр, необходимо определить временной tp и частотный ht признак электростатического сигнала, показанных на рис. 1 [4].

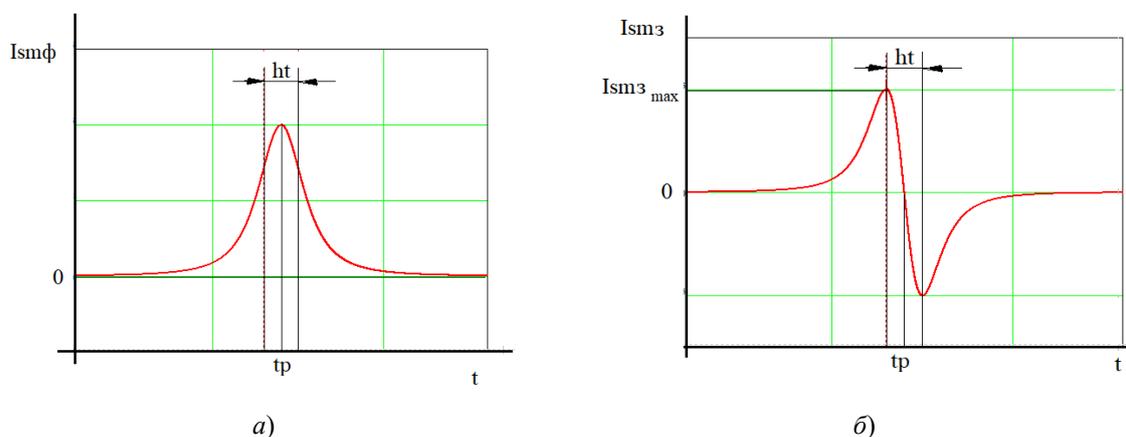


Рис. 1. Идеальные измерительные сигналы:
а – электростатического флюксметра; б – электростатического зонда

На рис. 1 представлены два сигнала, которые могут быть получены с помощью электростатического флюксметра [5] или электростатического зонда [6]. Электростатический флюксметр является прибором, более защищенным от помех, чем электростатический зонд. Последний же является гораздо более простым с конструктивной точки зрения и в нем отсутствуют движущиеся детали.

В предыдущем исследовании [4] рассматривалась цифровая обработка электростатических сигналов данной системы, полученных с помощью зондов. Стратегия данной обработки соответствует методам обработки сигналов, применяемых в системе электростатического мониторинга состояния технических объектов [6–8]. В рамках данной стратегии предлагается анализ время-частотного распределения измерительного сигнала, полученного путем многократной свертки сигнала со специальной анализирующей функцией [9]. В исследовании [4] предлагается использование специальной рациональной функции, выводимой специально под нужный сигнал. Данная функция показала большую точность определения временного признака tp сигнала по сравнению с общепринятой в данной области вейвлет-функцией Морле.

Однако в том исследовании [4] для получения коэффициентов рациональной функции использовался метод градиентного поиска, который базировался на ряде эмпирических правил для достижения приемлемого результата. Так как использование рациональной анализирующей функции предполагает подбор ее вида под конкретный сигнал, то актуальным становится создание более универсального алгоритма для поиска коэффициентов рациональной функции. Это обусловлено тем, что данный алгоритм можно использовать и при других условиях электростатической задачи, которая определит иные идеальные электростатические сигналы, чем изображенные на рис. 1.

Целью данного исследования является создание алгоритма на основе метода наименьших квадратов (МНК) для поиска коэффициентов рациональной анализирующей функции.

Материалы и методы

Алгоритм подбора коэффициентов рациональной анализирующей функции на основе градиентного поиска подробно разобран в работе [4]. Символьное упрощение вычетов функции в системе компьютерной алгебры Maple и усовершенствование градиентного поиска за счет линейности частных производных целевой функции описано в статье [10]. В настоящем исследовании метод градиентного поиска заменяется на МНК. Алгоритм поиска коэффициентов при этом модифицируется для обеспечения подобия анализирующей функции измерительному сигналу.

Алгоритм расчета коэффициентов рациональной анализирующей функции состоит из следующих шагов:

- запись анализирующей функции и идеального измерительного сигнала в виде рациональной функции;
- символьное упрощение интегралов свертки анализирующей функции с измерительным сигналом и расчет их частных производных;
- определение коэффициентов рациональной анализирующей функции;
- перевод анализирующей функции в цифровой вид с учетом ошибки дискретизации и ограниченности во времени.

Целевые свойства анализирующей функции

В качестве исходного измерительного сигнала использовалась его запись в аналитической форме через частотный признак ht и временной признак tp для электростатического флюксметра и зонда соответственно [4]:

$$I_{smf}(t) = 8Amht^3 \frac{1}{((t-tp)^2 + 4ht^2)^{1.5}}; \quad (1)$$

$$I_{smp}(t) = -25\sqrt{5}Amht^4 \frac{1}{((t-tp)^2 + 2ht^2)^{2.5}}, \quad (2)$$

где Am – амплитуда измерительного сигнала; t – время.

В дальнейшем свойства будут описаны на основе сигнала электростатического флюксметра (1). Запись свойств в случае сигнала электростатического зонда аналогична, меняется лишь четность мнимой и действительной части анализирующей функции.

Цифровая обработка электростатических сигналов основана на многократных свертках электростатического сигнала $I_{sm}(t)$ с анализирующей функцией и расчет амплитуду Amp и (или) фазы Ph в выбранной точке:

$$CR(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{sm}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) F_{cre}\left(t + \frac{\tau}{2}\right) dt; \quad (3)$$

$$CI(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{sm}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) F_{cim}\left(t + \frac{\tau}{2}\right) dt; \quad (4)$$

$$Amp = \sqrt{CR(\tau)^2 + CI(\tau)^2}; \quad (5)$$

$$Ph = \text{Arctg}(CI(\tau) / CR(\tau)), \quad (6)$$

где $F_{cre}(\tau)$ и $F_{cim}(\tau)$ – реальная и мнимая часть анализирующей функции; $CR(\tau)$ и $CI(\tau)$ – действительная и мнимая часть свертки соответственно; τ – смещение центра сигнала tp относительно центра окна свертки.

Согласно теории цифровой обработки мнимая и действительная часть анализирующей функции должны быть ортогональными. С учетом четности (1) необходимо, чтобы $F_{cre}(\tau)$ было нечетной функцией, а $F_{cim}(\tau)$ – четной. Кроме того, для того, чтобы на результат цифровой обработки не влияло смещение нуля, у функции должно быть нулевое среднее значение [11]. В случае нечетной $F_{cre}(\tau)$ это обеспечивается автоматически, для нечетной необходимо обеспечить следующее тождество [12]:

$$NuR = \int_{-\infty}^{\infty} F_{cim}(t) dt = 0. \quad (7)$$

Для обеспечения верности выражений (5) и (6) необходимо обеспечить изменение действительной и мнимой части свертки по гармоническим законам:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I_{sm}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) F_{cre}\left(t + \frac{\tau}{2}\right) dt = \sin(cf\tau 2\pi); \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I_{sm}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) F_{cim}\left(cht + \frac{\tau}{2}\right) dt = \cos(cf\tau 2\pi). \quad (9)$$

где cf – коэффициент соответствия; $ch = 1$ – коэффициент сжатия.

В целевых свойствах (8), (9) введен коэффициент соответствия cf . Необходимость его введения заключается в том, что у электростатических сигналов (1) и (2) частотный признак ht не является прямым отображением периода (частоты) сигнала, а связан с ним через постоянный множитель cf заранее неизвестный. В алгоритме на основе градиентного поиска [4] данный коэффициент подбирался исходя из начальных условий при градиентном спуске, соответствующем максимальному подобию измерительного сигнала $I_{sm}(t)$ к мнимой части анализирующей функции $CI(t)$. В настоящем алгоритме данный коэффициент подбирается таким образом, чтобы амплитуда Amp при $ch = 1$ при $\tau = 0$ была максимальна, что является более универсальным условием. Естественно, что при $\tau = 0$ реальная часть свертки $CR(\tau) = 0$ и амплитуда определяется мнимой частью $CI(\tau)$. Поэтому ch отсутствует в выражении (8).

Запись уравнений МНК

Для расчета точности выполнения условий (7)–(9) в аналитической форме используется основная теорема о вычетах, согласно которой неопределенный интеграл равен сумме вычетов в верхней полуплоскости подынтегрального выражения [13]. Для использования данной теоремы анализирующая функция и измерительный сигнал электростатического флюксметра записывается в виде рациональных функций следующего вида:

$$I_{sm}(t) = \frac{S_3 t^6 + S_2 t^4 + S_1 t^2 + S_0}{(t^2 + A^2)(t^2 + B^2)(t^2 + C^2)^2}; \quad (10)$$

$$F_{cre}(t) = \frac{K_3 t^7 + K_2 t^5 + K_1 t^3 + K_0 t}{(t^2 + A^2)(t^2 + B^2)(t^2 + C^2)^2}; \quad (11)$$

$$F_{cim}(t) = \frac{P_4 \cdot t^8 + P_3 \cdot t^6 + P_2 \cdot t^4 + P_1 \cdot t^2 + P_0}{(t^2 + A^2) \cdot (t^2 + B^2)^2 \cdot (t^2 + C^2)^2}, \quad (12)$$

где S_j, K_j, P_j, A, B, C – коэффициенты.

Подстановка выражений (10)–(12) в условия (7)–(9) и их символьное упрощение в системе компьютерной алгебры Maple подробно описана в предыдущей работе [10]. В настоящей работе в выражения (8), (9) добавляется коэффициент сжатия ch , который необходим для реализации метода наименьших квадратов. Выражение (8) и (9) упрощаются при $ch = 1$ или при $\tau = 0$, но не при неизвестных значениях этих двух показателей, так как в данном случае система компьютерной алгебры Maple не дает результат.

Нахождение коэффициентов S_j, A, B и C осуществляется на основе простого градиентного поиска так же, как и в предыдущей работе [10]. Коэффициенты K_j и P_j в данном исследовании находятся модифицированным методом наименьших квадратов как аналитическое системы уравнений. Классическая реализация метода наименьших квадратов запишет для коэффициентов K_j и P_j две системы уравнений по количеству неизвестных. Модификация метода состоит в замене одного из уравнений системы на приближенность анализирующей функции к нулю на краю. Для коэффициентов четной части анализирующей функции P_j одно из уравнений заменяется на условие (7). Итоговая система уравнений для коэффициентов P_j выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial P_0} \sum_{j=0}^N (\cos\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CI(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial P_1} \sum_{j=0}^N (\cos\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CI(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial P_2} \sum_{j=0}^N (\cos\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CI(j/N))^2 = 0; \\ \int_{-\infty}^{\infty} CI(\tau) d\tau = Cz; \\ \sum_{j=1}^{10} F_{cim}\left(\frac{i+40}{5}\right) = 0, \end{array} \right. \quad (13)$$

где Cz – околонулевая константа; $N = 20$ – количество учтенных невязок между идеальным изменением свертки от смещения τ и сверткой.

Учет околонулевой константы вместо нуля в системе (13) необходим, так как последним шагом алгоритма является коррекция коэффициентов анализирующей функции с учетом ошибки дискретизации при переводе анализирующей функции в цифровой вид для записи в память датчика электростатического поля.

Для нахождения коэффициентов K_j используется следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial K_0} \sum_{j=0}^N (\sin\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CR(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial K_1} \sum_{j=0}^N (\sin\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CR(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial K_2} \sum_{j=0}^N (\sin\left(\frac{2cf\pi j}{N}\right) - CR(j/N))^2 = 0; \\ \sum_{j=1}^{10} F_{cre}\left(\frac{i+40}{5}\right) = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

Результаты

На основе решения уравнений (13) и (14) в системе компьютерной алгебры Maple были протестированы различные алгоритмы по синтезу анализирующей функции. Точный результат дал алгоритм, соответствующий блок-схеме, изображенной на рис. 2.

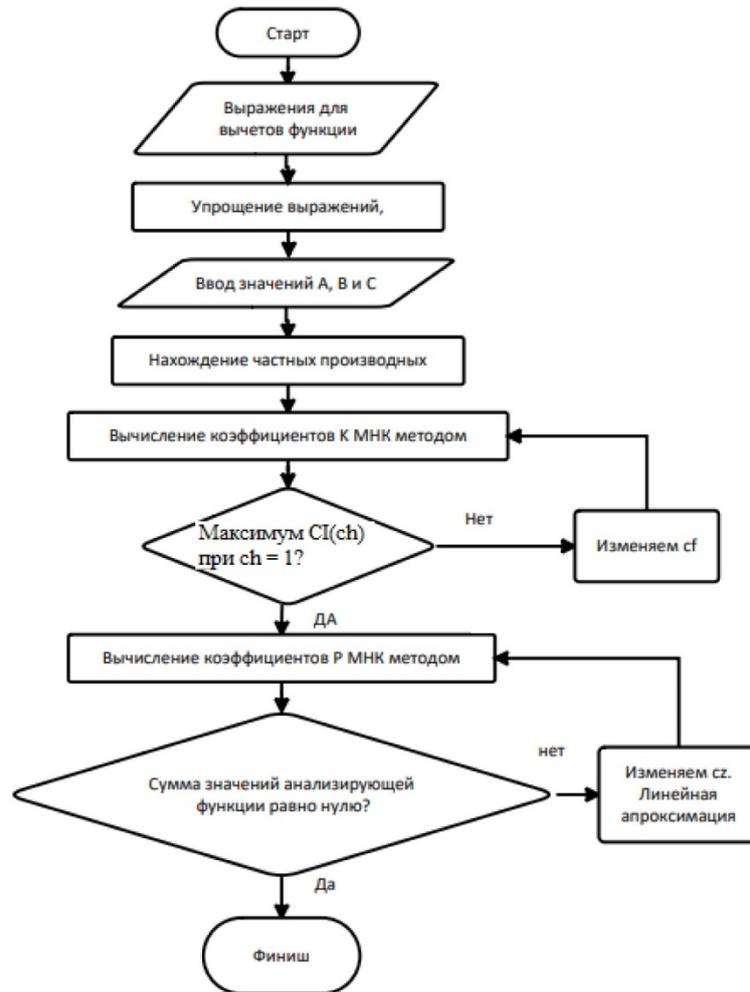


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нахождения коэффициентов анализирующей функции

Алгоритм, изображенный на рис. 2, может быть применен как для синтеза анализирующей функции к сигналу электростатического зонда (2), так и для электростатического флюксметра. Следует иметь в виду, что сначала происходит вычисление коэффициентов анализирующей функции той части, чья четность соответствует анализирующей функции. Именно при их расчете происходит итерационный подбор cf .

Изменение cz следует производить на последнем шаге синтеза при дискретизации сигнала таким образом, чтобы сумма значений четной части анализирующей функции была равна нулю. Для нечетной части это выполнится автоматически. Необходимые изменения cz очень слабо влияют на коэффициенты четной части и сумма линейно зависит от cz . Поэтому поиск необходимого значения возможен в три итерации и после пересчета корректировка cf не требуется.

Итоговая анализирующая функция изображена на рис. 3.

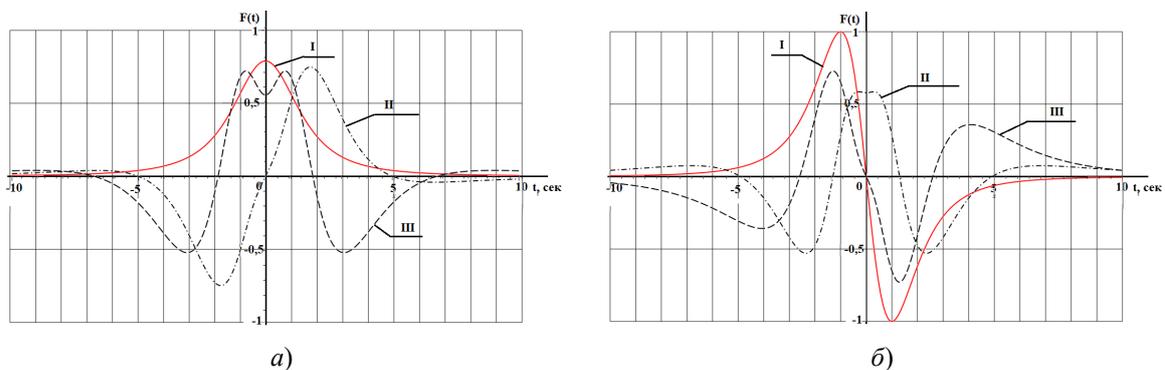


Рис. 3. Анализирующая функция:
 a – для электростатического флюксметра; b – для электростатического зонда;
 I – измерительный сигнал; II – реальная часть; III – мнимая часть

Коэффициенты полученных функций представлены в табл. 1, а их соответствие целевым свойствам – в табл. 2.

Таблица 1

Коэффициенты анализирующей функции

Электростатический флюксметр				Электростатический зонд			
Общие	Сигнал	Реальная	Мнимая	Общие	Сигнал	Реальная	Мнимая
A	S_0	K_0	P_0	A	S_0	P_0	K_0
1,603	498312	71857,8	116877	1,285	-74120	23443,7	-15397,2
B	S_1	K_1	P_1	B	S_1	P_1	K_1
3,276	1,30500	123687	212966	2,362	-17526	29454,8	-53463,7
C	S_2	K_2	P_2	C	S_2	P_2	K_2
5,183	-5288,832	-5075,99	-76160,3	4,755	-283,863	-27491,0	8284,06
ht		K_3	P_3	ht		P_3	K_3
2		1,660	1,660	2		1109,22	-2,725
			P_4			P_4	
			-1,2064			-0,8838	

Таблица 2

Соответствие преобразования целевым свойствам

Тип датчика	Сжатие ch	Интервал соответствия	Средняя невязка	Макс. невязка	ноль cz
Эл. флюксметр	0,483	$\pm 22,5\%$	Re(0,04%) Im(0,29%)	Re(0,6%) Im(0,9%)	-0,043854
Эл. зонд	0,735	$\pm 22,5\%$	Re(0,04%) Im(0,1%)	Re(0,3%) Im(0,9%)	-0,033116

В табл. 2 в столбце интервал соответствия отображено, какая часть периода гармонической функции из целевых свойств (8) и (9) соответствует зависимости свертки от положения центра окна τ . Следует обратить внимание, что данная доля берется от периода $2 \cdot ht/ch$. Соответственно, это означает, что фаза по формуле (6) может быть рассчитана корректно в пределах $\pm 0,93 \cdot ht$ для электростатического флюксметра и в пределах $\pm 0,61 \cdot ht$ для электростатического зонда.

Обсуждение

Алгоритм на основе метода наименьших квадратов позволяет с использованием относительно малого количества машинных ресурсов рассчитать коэффициенты анализирующей функции. При этом целевые свойства выполняются абсолютно точно. В указанных в табл. 3 пределах зависимость свертки идеального сигнала от гармонической функции визуально не отличается и содержит малую ошибку. Кроме того, рассмотренный алгоритм без каких-либо затруднений оказался применим также к сигналу электростатического флюксметра в отличие от алгоритма, рассмотренного в предыдущей работе. В том случае это было связано с тем, требования подобия измерительному сигналу и равенства нулю среднего значения в случае электростатического флюксметра являются взаимоисключающими.

Введение в алгоритм корректировки коэффициента cf путем изучения амплитудной характеристики при $\tau = 0$ позволило убрать проблему нахождения подобной функции, так как без данной корректировки в общем случае алгоритм стремился найти функции, которые обладают кратно большей частотой чем измерительный сигнал, что являлось ошибочным.

Заключение

На основании вышеизложенного материала можно заключить, что представленный алгоритм позволяет надежно и точно определить анализирующую функцию, обладающую целевыми свойствами (7)–(9) по отношению к идеальному электростатическому сигналу или схожему с ним. Данные целевые свойства необходимы для цифровой обработки электростатического сигнала, что было рассмотрено в предшествующем исследовании [4]. Синтезированная анализирующая

функция предлагается в качестве основы время-частотного преобразования электростатического сигнала вместо (или совместно с) модифицированной вейвлет-функции Морле, общепринятой в области электростатического мониторинга [7].

Список литературы

1. Сенцов А. А., Поляков В. Б., Иванов С. А., Помозова Т. Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2023. № 129. С. 1–30. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID = 173033>
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 101–146.
3. Ластовецкий А. Е., Клепка С. П., Рябоконт М. С. Дистанционное измерение электрических зарядов воздушных объектов // Вестник концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 3. С. 59–69.
4. Скрыбин Ю. М., Потехин Д. С. Рациональная анализирующая функция для точного определения параметров электростатического сигнала // Труды МАИ. 2021. № 119. С. 1–32. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID = 159792>
5. Патент 2722477 Российская Федерация. Электростатический флюксометр / Потехин Д. С., Скрыбин Ю. М., Тетерин Е. П. № 2019123353 ; заявл. 24.07.2019 ; опубл. 01.06.2020.
6. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. [et al.]. Electrostatic sensors – Their principles and applications // Measurement. 2022. № 169. P. 153–183.
7. Zhenhua W., Junxing H., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions // Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 2, iss. 1. P. 1–11.
8. Kun Yu, Terri Lin, Hui Ma [et al.]. A combined polynomial chirplet transform and synchroextracting technique for analyzing nonstationary signals of rotating machinery // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, iss. 4. P. 1505–1518. doi: 10.1109/TIM.2019.2913058
9. Iatsenko D., McClintock P., Stefanovska A. Linear and synchrosqueezed time – frequency representations revisited: Overview, standards of use, resolution, reconstruction, concentration, and algorithms // Digital Signal Processing. 2015. Vol. 42. P. 1–26. doi: 10.1016/j.dsp.2015.03.004
10. Skryabin Y., Potekhin D. Synthesis of the Rational Analyzing Function for Feature Extraction of Signals from the Electrostatic Location System // Communications in Computer and Information Science. 2023. Vol. 1733. P. 250–261.
11. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М. : СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
12. Потехин Д. С., Тарасов И. Е. Синтез сверточных функций в реальном времени в системах программно-зависимого радио и фазо-частотных измерительных устройствах // Российский технологический журнал. 2018. № 6. С. 41–54.
13. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. 3, ч. 1. 24-е изд. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 816 с.

References

1. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A., Pomozova T.G. Method of interception of small-sized and inconspicuous aircraft. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2023;(129):1–30. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID = 173033>
2. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Management, communication and security systems*. 2020;(1):101–146. (In Russ.)
3. Lastovetskiy A.E., Klepka S.P., Ryabokon' M.S. Remote measurement of electric charges of air objects. *Vestnik kontserna PVO Almaz-Antey = Bulletin of the air defense concern Almaz-Antey*. 2015;(3):59–69. (In Russ.)
4. Skryabin Yu.M., Potekhin D.S. Rational analyzing function for accurate determination of parameters of an electrostatic signal. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2021;(119):1–32. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID = 159792>
5. Patent 2722477 Russian Federation. *Elektrostaticheskiy flyuksmetr = Electrostatic fluxmeter*. Potekhin D.S., Skryabin Yu.M., Teterin E.P. № 2019123353; appl. 24.07.2019; publ. 01.06.2020. (In Russ.)
6. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. et al. Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2022;(169):153–183.
7. Zhenhua W., Junxing H., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017;2(1):1–11.
8. Kun Yu, Terri Lin, Hui Ma et al. A combined polynomial chirplet transform and synchroextracting technique for analyzing nonstationary signals of rotating machinery. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020;69(4):1505–1518. doi: 10.1109/TIM.2019.2913058

9. Iatsenko D., McClintock P., Stefanovska A. Linear and synchrosqueezed time – frequency representations revisited: Overview, standards of use, resolution, reconstruction, concentration, and algorithms. *Digital Signal Processing*. 2015;42:1–26. doi: 10.1016/j.dsp.2015.03.004
10. Skryabin Y., Potekhin D. Synthesis of the Rational Analyzing Function for Feature Extraction of Signals from the Electrostatic Location System. *Communications in Computer and Information Science*. 2023;1733:250–261.
11. D'yakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike = Wavelets. From theory to practice*. Moscow: SOLON-R, 2002:448. (In Russ.)
12. Potekhin D.S., Tarasov I.E. Synthesis of convolutional functions in real time in software-dependent radio systems and phase-frequency measuring devices. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;(6):41–54. (In Russ.)
13. Smirnov V.I. *Kurs vysshey matematiki = Course of higher mathematics*. Vol. 3, part 1. 24-th ed. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010:816. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Михайлович Скрябин

преподаватель кафедры вычислительной техники,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)
E-mail: meh-record@yandex.ru

Yuriy M. Skryabin

Lecturer of the sub-department
of computer engineering,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 12.01.2024

Принята к публикации/Accepted 13.02.2024

КОММУТИРУЕМЫЙ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

С. В. Федоров

Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау),
Кумертау, Республика Башкортостан, Россия
proinfosystem@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данного исследования является проектирование усилителя, позволяющего осуществлять дифференциальное преобразование нескольких входных напряжений с возможностью их мультиплексирования, а также обладающего более низким напряжением смещения нуля и высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала, чем в операционных и инструментальных усилителях. *Материалы и методы.* Рассмотрены методы преобразования сигналов датчиков в многоканальных измерительных системах. Недостатками данных методов является использование операционных усилителей, которые не обеспечивают дифференциального преобразования нескольких входных напряжений, что требует наличие аналогового мультиплексора для переключения каналов. Операционные усилители также обладают невысокими собственными параметрами. Многоканальные измерительные системы на их основе требуют наличия внешних элементов, влияющих на ее качественные показатели. *Результаты.* В качестве решения по устранению данных недостатков разработана схема мультидифференциального операционного усилителя с идентичными входными дифференциальными каскадами и возможностью их коммутации для подключения и отключения входных сигналов. *Выводы.* Моделирование схемы в среде Multisim обеспечило получение передаточных характеристик для дифференциального и синфазного режимов мультидифференциального усилителя. Анализ полученных результатов показывает, что разработанный мультидифференциальный усилитель обладает более качественными собственными параметрами, чем существующие операционные и инструментальные усилители, а также позволяет исключить внешние элементы схемы, влияющих на ее качественные показатели. Отличием данной схемы от существующих мультидифференциальных усилителей является возможность коммутации входных дифференциальных сигналов датчиков, что исключает использование аналогового мультиплексора для переключения каналов.

Ключевые слова: многоканальная измерительная система, операционный усилитель, коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель, коэффициент ослабления синфазного входного напряжения, напряжение смещения нуля, инструментальный усилитель

Для цитирования: Федоров С. В. Коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель для многоканальной измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 14–21. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-2

A SWITCHED MULTIDIFFERENTIAL OPERATIONAL AMPLIFIER FOR A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM

S.V. Fedorov

Ufa University of Science and Technology (Kumertau Branch), Kumertau, Republic of Bashkortostan, Russia
proinfosystem@gmail.com

Abstract. *Background.* The purpose of this study is to design an amplifier that allows differential conversion of several input voltages with the possibility of multiplexing them, as well as having a lower zero offset voltage and a high common-mode attenuation coefficient than in operational and instrumental amplifiers. *Materials and methods.* Methods of converting sensor signals in multichannel measuring systems are considered. The disadvantages of these methods are the use of operational amplifiers that do not provide differential conversion of several input voltages, which requires an analog multiplexer to switch channels. Operational amplifiers do not have high intrinsic parameters. Multichannel measurement systems based on them require the presence of external elements that affect its quality indicators. *Results.* As a solution to eliminate these shortcomings, a scheme of a multidifferential operational amplifier with identical input differential stages

and the possibility of switching them to connect and disconnect input signals has been developed. *Conclusions.* The simulation of the circuit in the Multisim environment provided the transmission characteristics for the differential and common-mode modes of a multidifferential amplifier. The analysis of the obtained results shows that the developed multidifferential amplifier has better intrinsic parameters than existing operational and instrumental amplifiers, and also allows you to exclude external elements of the circuit that affect its quality indicators. The difference between this scheme and existing multidifferential amplifiers is the possibility of switching the input differential signals of the sensors. Thus, it eliminates the use of an analog multiplexer for channel switching.

Keywords: multichannel measuring system, operational amplifier, switched multidifferential operational amplifier, common-mode input voltage attenuation coefficient, zero offset voltage, instrumental amplifier

For citation: Fedorov S.V. A switched multidifferential operational amplifier for a multichannel measuring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):14–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-2

Введение

На сегодняшний день при изучении процессов, происходящих в различных объектах с распределенными параметрами, используются современные компьютерные системы. Такие системы предполагают применение множества быстродействующих высокоточных датчиков, находящихся на объекте. На основании параметров, полученных с этих датчиков при проведении исследований, составляется информация о характере протекающих процессов. На основании данной информации происходит формирование алгоритмов управления объектом. Данный процесс исследования происходит с помощью многоканальных систем сбора данных. Функциями данных систем являются [1]:

- 1) выработка сигналов датчиков;
- 2) мультиплексирование сигналов датчиков;
- 3) нормирование сигналов;
- 4) аналого-цифровое преобразование;
- 5) цифровая фильтрация сигналов;
- 6) линеаризация статических характеристик датчиков;
- 7) калибровка измерительных каналов.

Материалы и методы

На сегодняшний день при создании многоканальных систем сбора сигналов датчиков используется два типа схем. Первый вариант приведен на рис. 1.

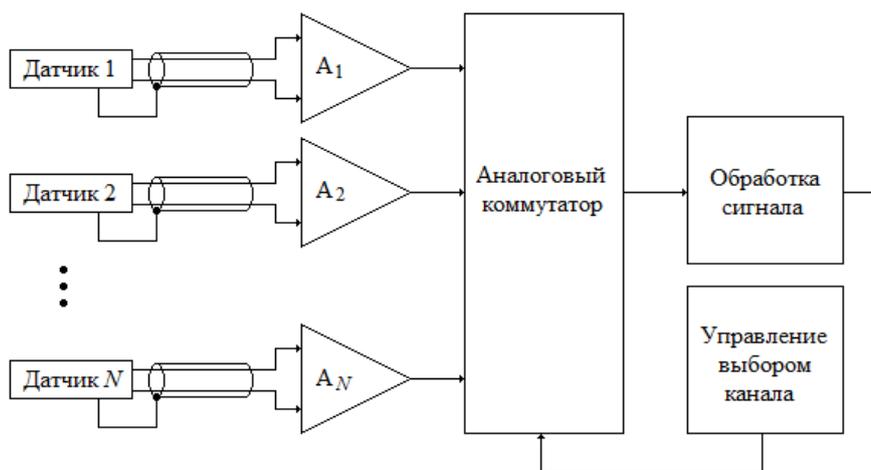


Рис. 1. Многоканальная система сбора сигналов датчиков с предварительным усилением

В данной системе используются несколько усилителей, которые устанавливаются непосредственно после датчиков. Для каждого датчика задается определенный коэффициент усиления усилителя.

Другим вариантом, применяемым при создании многоканальных измерительных систем, является система сбора сигналов датчиков с масштабным усилением (рис. 2).



Рис. 2. Многоканальная система сбора сигналов датчиков с масштабным усилением

Особенностью данной системы является подключение аналогового коммутатора (мультиплексора) непосредственно к датчикам. Таким образом, с помощью системы управления происходит подключение конкретного датчика к единому усилителю. Одновременно с этим система управления задает коэффициент усиления усилителя.

Недостатком приведенных выше систем является использование операционных усилителей (ОУ). Операционный усилитель не обеспечивает дифференциальное преобразование нескольких входных сигналов, что требует наличия аналогового мультиплексора для переключения каналов.

Помимо этого, операционные усилители обладают относительно невысокими собственными качественными параметрами, такими как коэффициент ослабления синфазного сигнала, напряжение смещения нуля. Задание коэффициента усиления с помощью внешних резисторов приводит к ухудшению качественных параметров всей схемы вследствие рассогласования данных резисторов.

Попытки решения данной проблемы привели к появлению инструментальных усилителей (ИУ) (рис. 3).

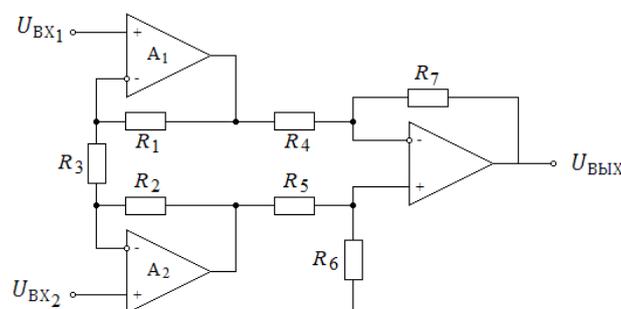


Рис. 3. Схема инструментального усилителя на трех ОУ

Однако использование более сложной структуры ИУ привело к следующим недостаткам [2, 3]:

1. Коэффициент усиления синфазного сигнала ($K_{сф}$) инструментального усилителя (рис. 3) определяется точностью резисторов R_4 – R_7 :

$$K_{сф} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{сф}},$$

$$K_{сф} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left(1 + \frac{R_7}{R_4} \right) - \frac{R_7}{R_4} = \frac{R_6 - \frac{R_5 R_7}{R_4}}{R_5 + R_6}.$$

2. Влияние активных элементов A_1 , A_2 на коэффициенты усиления синфазного сигнала [4].

3. Синфазные выходные напряжения усилителей A_1 и A_2 зависят от точности сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и R_3 [5, 6].

ИУ также не позволяет осуществлять непосредственное дифференциальное преобразование нескольких входных напряжений.

На основании вышеизложенного целью исследования является проектирование усилителя, позволяющего осуществлять дифференциальное преобразование нескольких входных сигналов с возможностью их мультиплексирования, а также обладающего более низким напряжением смещения нуля и высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала, чем в ОУ и ИУ, независимыми от внешней схемы.

Решением данной проблемы в части достижения внутренних высоких показателей качества является использование вместо традиционных ОУ и ИУ новейших разработок в области усилителей, таких как мультидифференциальные операционные усилители (МОУ). Отличием МОУ от ОУ является наличие в их структуре нескольких входных дифференциальных каскадов.

На рис. 4 показана схема включения МОУ в структуру классического измерительного моста с резистивными сенсорами некоторой физической величины.

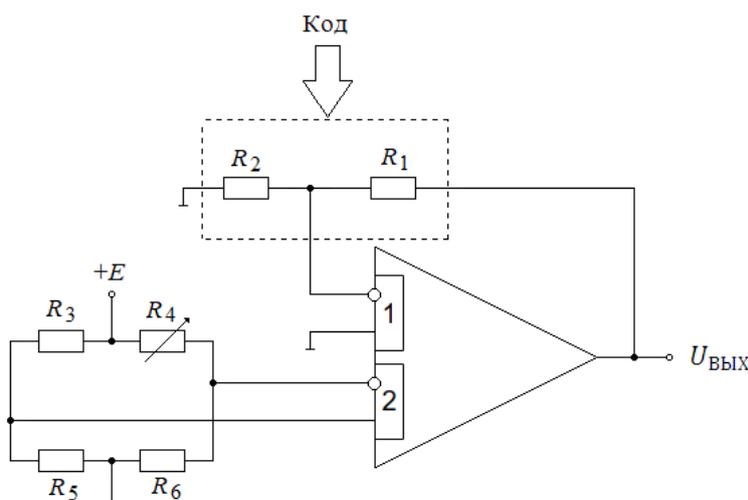


Рис. 4. Измерительный мост с мультидифференциальным преобразователем

Преимуществами использования МОУ в измерительных системах являются [7]:

1. Возможность исключения из обратной связи резисторов R_1 , R_2 . Если принять $R_1 = 0$, $R_2 = \infty$, то коэффициент усиления МОУ будет равен единице.
2. Цифровое управление коэффициентом усиления с помощью включения вместо резистора R_2 классической матрицы « $R-2R$ », коммутируемой с помощью КМОП ключей [8].
3. Напряжение смещения нуля в МОУ существенно ниже, чем в ОУ и ИУ.
4. Коэффициент ослабления синфазного сигнала в МОУ имеет более высокое значение по сравнению с ОУ [9–11].
5. Простота увеличения числа каналов путем добавления необходимого количества дифференциальных каскадов.

Хотя МОУ обладает возможностью дифференциального преобразования нескольких входных сигналов, но при этом в нем нет возможности мультиплексирования данных сигналов. Выходной сигнал МОУ представляет собой сумму входных дифференциальных сигналов [9, 12]. В связи с этим встает вопрос разработки коммутируемого МОУ для многоканальной системы сбора сигналов датчиков.

На основании ОУ КР140УД1 был спроектирован и исследован коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель с тремя идентичными входными дифференциальными каскадами. Электрическая схема данного МОУ приведена на рис. 5.

Для подключения сигнала с какого-либо датчика на входе каждого дифференциального каскада установлены идентичные аналоговые коммутаторы DD . Схема коммутатора аналоговых сигналов DD представлена на рис. 6. Коммутатор имеет вход и выход сигнала, а также вход разрешения прохождения сигнала EI . Он имеет два управляемых ключа $S1$ и $S2$. Когда значение управляющего сигнала $EI = 1$, ключ $S1$ замыкается, а ключ $S2$ размыкается и сигнал со входа подключается к выходу. Если $EI = 0$, то ключ $S1$ размыкается, а ключ $S2$ замыкается и входной сигнал отключается, а выход заземляется.

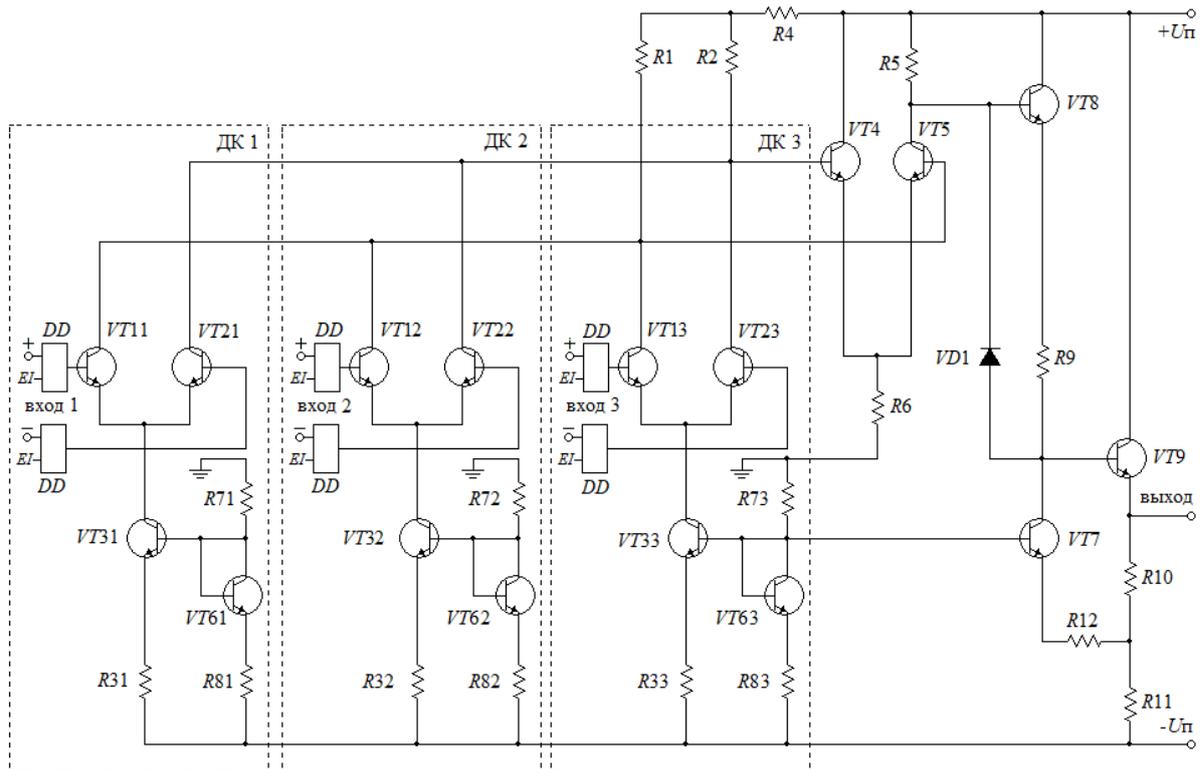


Рис. 5. Схема мультидифференциального операционного усилителя с тремя входными дифференциальными каскадами – ДК 1, ДК 2, ДК 3

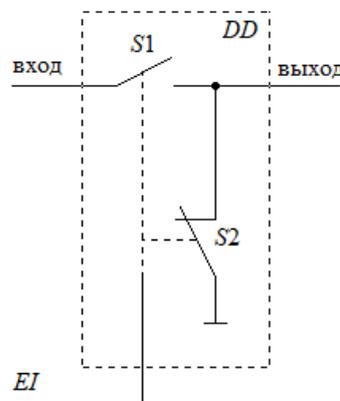


Рис. 6. Схема коммутатора аналоговых сигналов

Результаты

Моделирование схемы коммутируемого мультидифференциального операционного усилителя производилось в среде *Multisim 14.0*. В процессе исследования были изучены дифференциальный и синфазный режимы мультидифференциального усилителя. Для каждого входного каскада были определены передаточные характеристики (рис. 7). Передаточная характеристика для дифференциального режима работы МОУ представлена на рис. 7,а, где U_{in} – дифференциальное напряжение на входе, U_{out} – напряжение на выходе МОУ. Передаточная характеристика для синфазного режима работы МОУ представлена на рис. 7,б, где $U_{in sn}$ – синфазное напряжение на входе МОУ, $U_{out sn}$ – напряжение на выходе.

Значения коэффициентов усиления синфазного ($K_{сф}$) и дифференциального ($K_{д}$) сигналов получаются исходя из графиков:

$$K_{д} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{д}} = 1100, \quad K_{сф} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{сф}} = 0,000059.$$

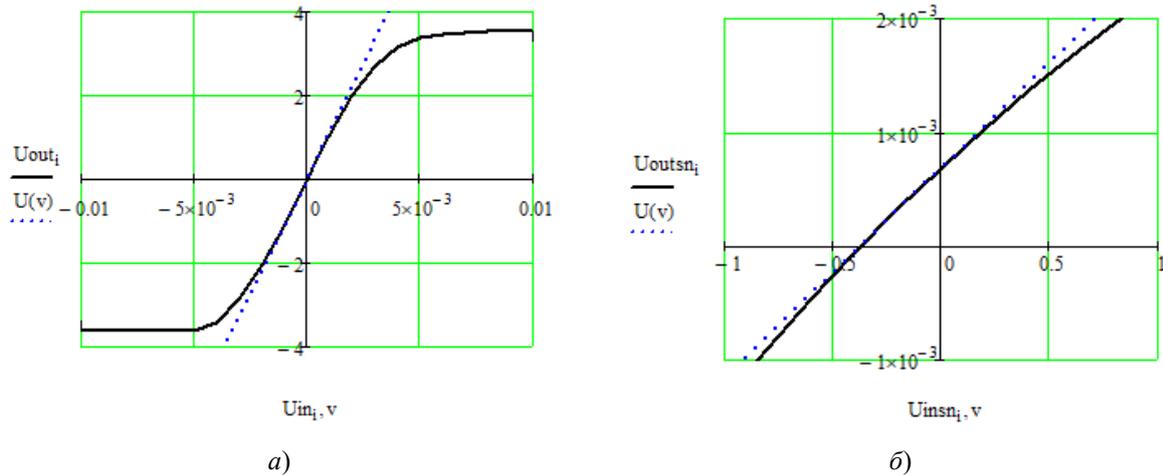


Рис. 7. Передаточная характеристика для дифференциального (а) и синфазного (б) режимов

В результате коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{осс}$) принимает следующее значение:

$$K_{осс} = 20 \log \left(\frac{K_{д}}{K_{сф}} \right) = 115,5 \text{ дБ.}$$

Напряжение смещения нуля МОУ составило $\pm 0,645 \text{ мкВ}$.

Обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный МОУ обладает более качественными собственными параметрами, чем существующие ОУ и ИУ. Для подтверждения данного факта в качестве сравнения в табл. 1 приведены параметры разработанного коммутируемого МОУ с современным инструментальным усилителем производства компании *Texas Instruments* – *INA333* и прецизионным ОУ 140УД17.

Таблица 1

Сравнение параметров усилителей

Параметры усилителя	Коммутируемый МОУ	Инструментальный усилитель <i>INA333</i>	ОУ 140УД17
1. Напряжение смещения нуля	$\pm 0,645 \text{ мкВ}$	25 мкВ	25 мкВ
2. Коэффициент ослабления синфазного входного напряжения	$\geq 115 \text{ дБ}$	100 дБ	110 дБ

В отличие от существующих МОУ разработанная схема позволяет осуществлять коммутацию входных дифференциальных сигналов датчиков. На рис. 8 показана схема включения коммутируемого МОУ в многоканальной мостовой измерительной системе.

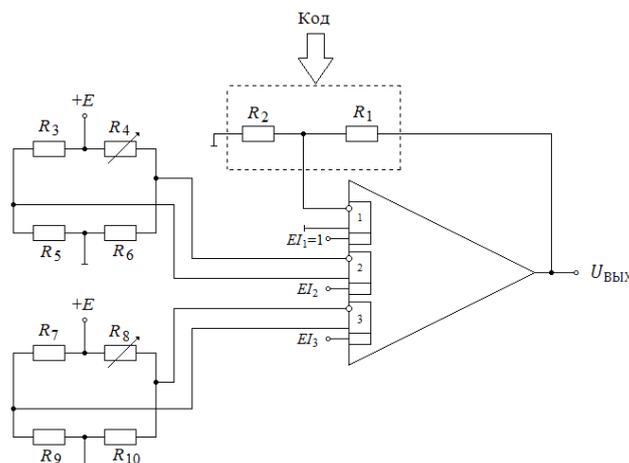


Рис. 8. Коммутируемый МОУ в многоканальной мостовой измерительной системе

Заключение

В результате проведенных исследований была разработана схема коммутируемого мультидифференциального операционного усилителя для многоканальной измерительной системы.

Преимуществом использования разработанного усилителя от классических ОУ и ИУ являются более качественные собственные параметры МОУ, а также исключение внешних элементов схемы, влияющих на ее качественные показатели.

Отличием данной схемы от существующих МОУ является возможность коммутации входных дифференциальных сигналов датчиков. Таким образом, исключается использование аналогового мультиплексора для переключения каналов.

Список литературы

1. Дьякова А. А., Мазур А. В., Ковальчук Д. А., Пушкин А. А. Многоканальная система сбора и обработки информации на базе контроллера ADuC7061 // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2014. № 17. С. 66–71.
2. Пахомов И. В. Мультидифференциальные операционные усилители напряжений и токов с активной отрицательной обратной связью : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Ростов-на-Дону, 2017. 208 с.
3. Bielek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals // Radioengineering. 2008. Vol. 17, № 4. P. 15–32.
4. Titov A. E., Prokopenko N. N., Pakhomov I. V. The Design Features of Low-Temperature Radiation-Hardened Instrumentation Amplifiers and Sensor Interfaces // Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS) (April 20–22, 2016, Košice, Slovakia). 2016. P. 186–189.
5. Крутччинский С. Г. Структурный синтез в аналоговой микросхемотехнике : монография. Шахты : ЮРГУЭС, 2010. 260 с.
6. Krutchinsky S. G., Titov A. E. Structure synthesis and optimization of instrumental amplifiers based on DDAs // Radiotekhnika under the total. 2015. Vol. 2. P. 98–106.
7. Прокопенко Н. Н., Бутырлагин Н. В., Бугакова А. В., Игнашин А. А. Многоканальный радиационно-стойкий инструментальный усилитель для датчиковых систем и аналоговых интерфейсов ответственного применения // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 1. С. 76–86.
8. Крутччинский С. Г., Титов А. Е. Мультидифференциальный операционный усилитель в режиме инструментального усилителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 3. С. 200–203.
9. Крутччинский С. Г., Титов А. Е. Оптимизация структур инструментальных усилителей с мультидифференциальными операционными усилителями // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 9–14.
10. Zhu L., Zhou Z., Wang W. [et al.]. A High CMRR Differential Difference Amplifier Employing Combined Input Pairs for Neural Signal Recordings // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2023. Sep 4. P. 99.
11. Mejía-Chávez P., Sánchez-García J. C., Velázquez-López J. Differential difference amplifier FGMOS for electrocardiogram signal acquisition // 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (Merida City, Mexico, 2011). 2011. P. 1–5.
12. Федоров С. В. Структурный синтез схем инструментальных усилителей на основе мультидифференциальных операционных усилителей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 2. С. 29–35.

References

1. D'yakova A.A., Mazur A.V., Koval'chuk D.A., Pushkin A.A. Multichannel information collection and processing system based on the ADuC7061 controller. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i biznesprotsessov = Automation of technological and business processes*. 2014;(17):66–71. (In Russ.)
2. Pakhomov I.V. *Multidifferential operational voltage and current amplifiers with active negative feedback*. PhD dissertation: 05.13.05. Rostov-on-Don, 2017:208. (In Russ.)
3. Bielek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals. *Radioengineering*. 2008;17(4):15–32.
4. Titov A.E., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. The Design Features of Low-Temperature Radiation-Hardened Instrumentation Amplifiers and Sensor Interfaces. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS) (April 20–22, 2016, Košice, Slovakia)*. 2016:186–189.
5. Krutchinskiy S.G. *Strukturnyy sintez v analogovoy mikroskhemotekhnike: monografiya = Structural synthesis in analog microcircuit engineering : monograph*. Shakhty: YuRGUES, 2010:260. (In Russ.)

6. Krutchinsky S.G., Titov A.E. Structure synthesis and optimization of instrumental amplifiers based on DDAs. *Radiotekhnika under the total*. 2015;2:98–106.
7. Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V., Ignashin A.A. Multichannel radiation-resistant instrumental amplifier for sensor systems and analog interfaces of domestic use. *Global'naya yadernaya bezopasnost' = Global nuclear safety*. 2016;(1):76–86. (In Russ.)
8. Krutchinskiy S.G., Titov A.E. A multidifferential operational amplifier in the mode of an instrumental amplifier. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Management*. 2010;(3):200–203. (In Russ.)
9. Krutchinskiy S.G., Titov A.E. Optimization of structures of instrumental amplifiers with multidifferential operational amplifiers. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)*. 2014;(3):9–14. (In Russ.)
10. Zhu L., Zhou Z., Wang W. [et al.]. A High CMRR Differential Difference Amplifier Employing Combined Input Pairs for Neural Signal Recordings. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2023;Sep.4:99.
11. Mejía-Chávez P., Sánchez-García J. C., Velázquez-López J. Differential difference amplifier FGMOS for electrocardiogram signal acquisition. *8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (Merida City, Mexico, 2011)*. 2011:1–5.
12. Fedorov S.V. Structural synthesis of the circuit of instrumental amplifiers based on multidifferential operational amplifiers. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2022;(2):29–35. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Витальевич Федоров

кандидат технических наук, доцент кафедры
технологии производства летательных аппаратов,
Уфимский университет науки и технологий
(филиал в г. Кумертау)
(Россия, Республика Башкортостан,
г. Кумертау, ул. Горького, 22А)
E-mail: proinfosystem@gmail.com

Sergey V. Fedorov

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of aircraft
manufacturing technology,
Ufa University of Science and Technology
(Kumertau Branch)
(22A Gorkogo street, Kumertau,
Republic of Bashkortostan, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 15.01.2024

Принята к публикации / Accepted 12.02.2024

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

УДК 681.2.08

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Т. И. Мурашкина¹, В. А. Бадеев², Н. А. Хасаншина³, А. В. Бадеев⁴, Е. А. Дудоров⁵

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

¹ timurashkina@mail.ru, ² vladbadeev4464@gmail.com, ³ nadin.gloria@mail.ru,

⁴ badeyev@mail.ru, ⁵ evgenyudorovo@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Защита окружающей среды предполагает разработку и совершенствование теории проектирования, технологических процессов и процедур изготовления датчиков различных физических величин, среди которых значительное место занимают датчики качества жидкостных сред, в том числе волоконно-оптические датчики параметров жидкостных сред. Для экспресс-анализа состава веществ запатентованы рефрактометрический способ и волоконно-оптическое устройство для его реализации. Объектом исследования являются рефрактометрические волоконно-оптические измерительные преобразователи, основные элементы волоконно-оптических датчиков для систем охраны окружающей среды. Предметом исследования являются физико-технические и геометрические параметры рефрактометрических волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОРИП). Целью работы является повышение чувствительности преобразования ВОРИП волоконно-оптических датчиков качества жидкостных сред, используемых в системах защиты окружающей среды. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели выполняется математическое моделирование для определения физико-технических и конструктивно-технологических параметров микро-оптической системы ВОРИП. *Результаты.* Приведены результаты моделирования оптических и геометрических параметров чувствительного элемента ВОРИП, представляющего собой прозрачную трубку малого диаметра, сопоставимого с диаметром оптического волокна, применяемого в конструкции датчика. Определены внутренний и внешний диаметры трубки, коэффициент преломления материала трубки, исходя из предполагаемого коэффициента преломления исследуемого вещества. *Выводы.* Определенные физико-технические и геометрические параметры позволяют повысить чувствительность преобразования ВОРИП. Рассчитанные параметры будут использованы при конструировании волоконно-оптических рефрактометрических датчиков систем охраны окружающей среды.

Ключевые слова: волоконно-оптический преобразователь, рефрактометрический способ, диаметр, коэффициент преломления, цилиндрическая трубка, исследуемое вещество

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10017.

Для цитирования: Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Хасаншина Н. А., Бадеев А. В., Дудоров Е. А. Моделирование параметров волоконно-оптического рефрактометрического преобразователя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 22–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-3

MODELING OF THE PARAMETERS OF A FIBER-OPTIC REFRACTOMETRIC CONVERTER

T.I. Murashkina¹, V.A. Badeev², N.A. Khasanshina³, A.V. Badeev⁴, E.A. Dudorov⁵^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia¹timurashkina@mail.ru, ²vladbadeev4464@gmail.com, ³nadin.gloria@mail.ru,⁴badeyev@mail.ru, ⁵evgenyudorovo@yandex.ru

Abstract. *Background.* Environmental protection involves the development and improvement of the design theory, technological processes and manufacturing procedures for sensors of various physical quantities, among which a significant place is occupied by sensors for the quality of liquid media, including fiber-optic sensors for the parameters of liquid media. For the express analysis of the composition of substances, a refractometric method and a fiber-optic device for its implementation have been patented. The object of research is refractometric fiber-optic measuring transducers, the main elements of fiber-optic sensors for environmental protection systems. The subject of the study is the physical, technical and geometric parameters of refractometric fiber-optic measuring transducers (FOMT). The aim of the work is to increase the sensitivity of the conversion of fiber-optic sensors for the quality of liquid media used in environmental protection systems. *Materials and methods.* To achieve this goal, mathematical modeling is performed to determine the physical, technical, structural and technological parameters of the micro-optical system of the FOMT. *Results.* The results of modeling the optical and geometric parameters of the sensor element FOMT, which is a transparent tube with a small diameter comparable to the diameter of the optical fiber used in the sensor design, are presented. The inner and outer diameters of the tube and the refractive index of the tube material are determined based on the assumed refractive index of the substance under study. *Conclusions.* Certain physical, technical and geometric parameters make it possible to increase the sensitivity of the FOMT transformation. The calculated parameters will be used in the design of fiber-optic refractometric sensors for environmental protection systems.

Keywords: fiber-optic converter, refractometric method, diameter, refractive index, cylindrical tube, test substance

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-10017.

For citation: Murashkina T.I., Badeev V.A., Khasanshina N.A., Badeev A.V., Dudorov E.A. Modeling of the parameters of a fiber-optic refractometric converter. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):22–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-3

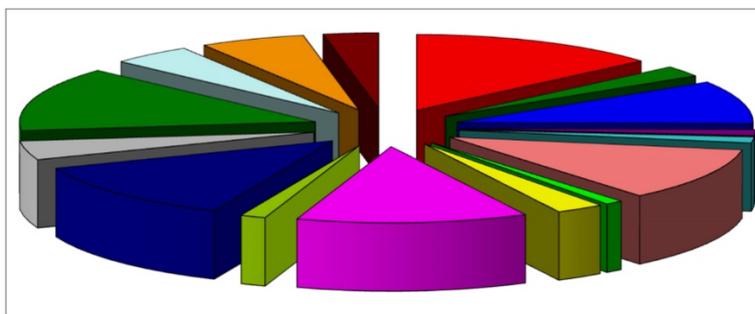
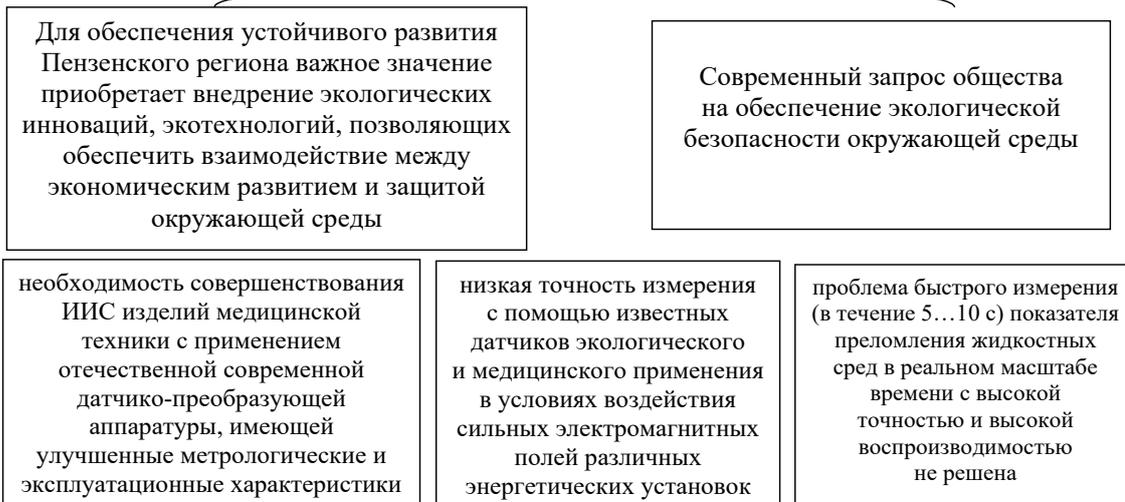
Введение

В соответствии с распоряжением Правительства Пензенской области от 21 февраля 2014 г. № 83-рП (с изменениями от 28 июля 2022 г.) «Об утверждении Стратегии инновационного развития Пензенской области до 2021 года и прогнозный период до 2030 года» в п.1.4 «Предназначение Пензенской области в системе инновационного развития России в реальном секторе экономики» Пензенская область претендует стать лидером на рынке разработки и производства датчиков физических величин, систем измерения, диагностики, мониторинга, контроля и управления в интересах космической, оборонной промышленности и специальных проектов. Для обеспечения устойчивого развития Пензенского региона важное значение приобретает внедрение экологических инноваций, экотехнологий, позволяющих обеспечить взаимодействие между экономическим развитием и защитой окружающей среды (там же п. 5.1.1).

Защита окружающей среды предполагает разработку и совершенствование теории проектирования, технологических процессов и процедур изготовления датчиков различных физических величин, среди которых значительное место занимают датчики качества жидкостных сред, в том числе волоконно-оптические датчики (ВОД) параметров жидкостных сред (рис. 1) [1, 2].

Основное преимущество ВОД перед электрическими обусловлено их возможным использованием в ситуациях, в которых либо электронные устройства вообще нельзя использовать, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами [3, 4]. ВОД обеспечивают чрезвычайно высокий уровень безопасности при эксплуатации в потенциально искро-, пожаро- и взрывоопасных условиях. Важнейшим достоинством ВОД является невосприимчивость их к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам. Внедрение ВОД существенно уменьшает массу и объем измерительных средств и кабельных сетей на инженерно-технических объектах медицинской техники и других отраслей техники [3, 4].

Актуальность исследований



■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6 ■ 7 ■ 8 ■ 9 ■ 10 ■ 11 ■ 12 ■ 13 ■ 14 ■ 15 ■ 16

Рис. 1. Соотношение между параметрами, измеряемыми в системах жизнеобеспечения или экологической безопасности:

- 1 – перемещение; 2 – скорость; 3 – ускорение; 4 – деформация; 5 – координаты;
 6 – качество жидкости (состав); 7 – освещенность; 8 – герметичность;
 9 – давление; 10 – расход жидкости; 11 – уровень; 12 – сила; 13 – температура;
 14 – наличие загазованности; 15 – газовый состав; 16 – напряженность магнитного поля

Важной прикладной задачей, решаемой с помощью ВОД и систем охраны окружающей среды на их основе, является оперативный контроль параметров жидких, в том числе технологических, сред в таких отраслях хозяйства, как электронная, химическая, нефтехимическая, пищевая промышленность, ядерная энергетика, биомедицинские исследования, экологический мониторинг загрязнения окружающей среды [5]. При этом только волоконно-оптические датчики могут надежно работать в особо агрессивных, взрыво- и пожароопасных средах, в условиях электромагнитных помех различных энергетических установок.

Толчком для создания нового способа измерения коэффициентов преломления жидкостей послужили проблемы в период пандемии при диагностике вирусного заболевания Covid-19, а именно большая длительность диагностики заболевания и малая воспроизводимость результатов измерений. Предложено было адаптировать предшествующие разработки научной школы «Волоконно-оптическое приборостроение» для решения данной проблемы, а именно волоконно-оптические микросенсоры микроперемещений на основе стержневых линз [6, 7]. В результате подана заявка и получен патент на изобретение 2796797 С2 [8]. В этой работе предложен рефрактометрический волоконно-оптический способ измерения показателя преломления прозрачного вещества, а также устройство для его реализации, которые могут быть использованы для получения информации о качестве вещества [9, 10].

Основным элементом предложенного устройства является ВОРИП, в состав которого входят оптические волокна, по которым свет от источника излучения подается в зону преобразования измерительной информации, а потом промодулированный в зависимости от измеряемого параметра направляется на приемник излучения [8]. Между подводящими и отводящими

оптическими волокнами расположена емкость с исследуемым веществом (рис. 2). Данная емкость представляет собой прозрачную трубку, в полости которой размещают небольшое количество исследуемого вещества. С одной стороны трубки на расстоянии l_1 соосно с ней расположен излучающий торец подводящего оптического волокна (ПОВ), с другой стороны трубки на расстоянии l_2 расположены приемные торцы отводящих оптических волокон (ООВ) (рис. 3).

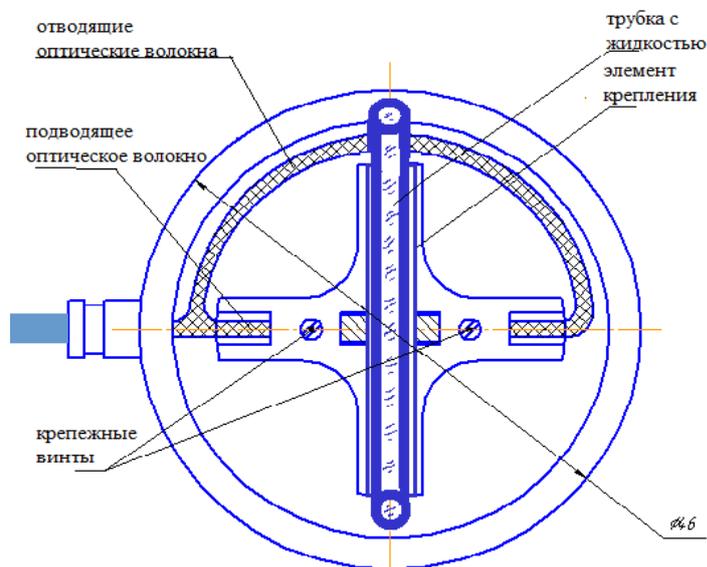


Рис. 2. Рефрактометрический волоконно-оптический датчик

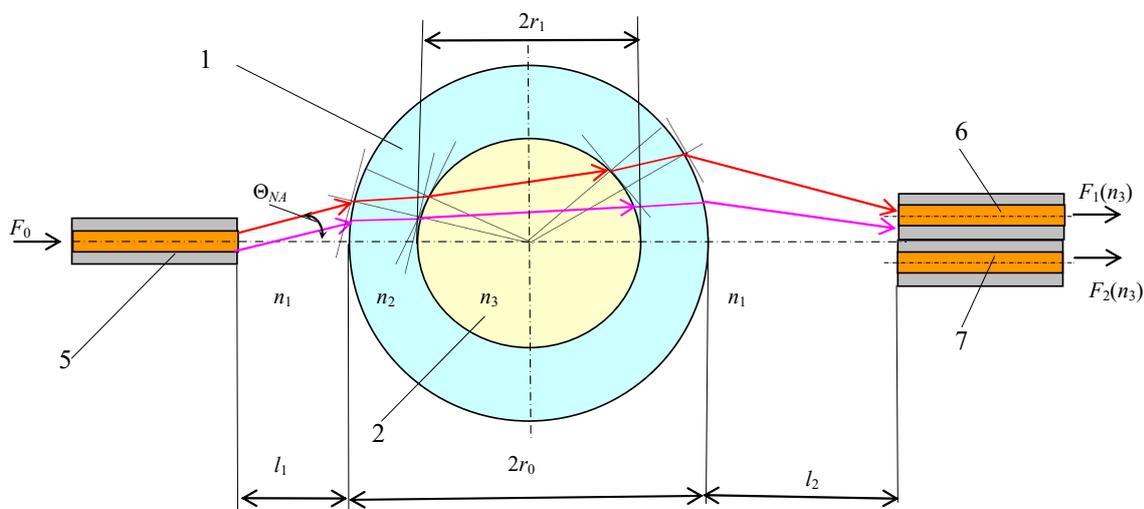


Рис. 3. Ход лучей в рефрактометрическом волоконно-оптическом преобразователе

По изменению сигналов с выхода приемников излучения определяют коэффициент преломления жидкости $n_{ж}$ по формуле: $n_{ж} = k_0 n_0$, где k_0 – коэффициент пропорциональности, равный отношению уровня сигнала с выхода приемника излучения при наличии в трубке калибровочной жидкости (например, дистиллированной воды) к уровню сигнала того же приемника излучения при наличии в трубке жидкости (или другого прозрачного вещества) с измеряемым коэффициентом преломления $n_{ж}$.

Основной задачей инженера-разработчика в этом случае является обеспечение максимального перепада сигналов ВОРИП, соответствующих ситуациям, когда в трубке находится калибровочное вещество и когда в трубке находится исследуемое вещество (например, жидкость, состав которой необходимо определить). Чем больше перепад, тем выше чувствительность преобразования ВОРИП, соответственно, можно добиться повышения точности измерения.

Цель исследований – повышение чувствительности преобразования ВОРИП волоконно-оптических датчиков качества жидкостных сред, используемых в системах защиты окружающей среды.

Методы и подходы

Для достижения поставленной цели осуществляется математическое моделирование [11] для определения физико-технических и конструктивно-технологических параметров микро-оптической системы ВОРИП.

Для эффективной работы ВОРИП необходимо определить:

- оптимальные размеры трубки: внешний и внутренний диаметры;
- коэффициент преломления материала, из которого должна быть изготовлена трубка, с дальнейшим подбором материала;
- диаметр сердцевины и оболочки, апертурный угол оптического волокна;
- тип оптического волокна, определяемый материалами, из которых он изготовлен;
- расстояния между элементами ВОРИП: между излучающим торцом подводящего излучение оптического волокна и ближайшей от него точкой трубки с жидкостью и между приемным торцом отводящего излучение оптического волокна и ближайшей от него точкой трубки с жидкостью.

При проведении математического моделирования необходимо учитывать, что световой поток на излучающем торце подводящего оптического волокна распространяется в виде полого усеченного конуса, толщина стенок которого равна диаметру сердцевины оптического волокна, а преобразования оптического сигнала осуществляются в дальней зоне дифракции в зоне с равномерным распределением освещенности в поперечном сечении волоконно-оптического канала [6].

Вывод функциональных зависимостей ВОРИП

Применение сначала прозрачного вещества (например, жидкости) с известным коэффициентом преломления n_0 , помещенного в цилиндрическую трубку, а потом прозрачного вещества, коэффициент преломления $n_ж$ которого измеряется, ведет к изменению углов преломления внутри исследуемого вещества и во внутренней и внешней поверхностях цилиндрической трубки и, соответственно, изменить углы $\Theta_{вх1}$ и $\Theta_{вх2}$, под которыми световой поток поступит на приемные торцы ООВ. При изменении углов $\Theta_{вх1}$ и $\Theta_{вх2}$ изменяется площадь пересечения светового пятна (изображения излучающего торца) и плоскости торцов ООВ, что ведет к изменению интенсивности оптического сигнала, передаваемому по ООВ на приемники излучения [8]. Поэтому в процессе математического моделирования необходимо в первую очередь определить угол $\Theta_{вх}$, под которым лучи света входят в приемный торец отводящего оптического волокна.

В соответствии с графическими построениями на рис. 4 и с учетом теоремы синусов определяем

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{\cos \Theta_{NA} (3r_c + r_1 \operatorname{tg} \Theta_{NA})}{r_1} \right]; \quad (1)$$

$$\alpha' = \arcsin \left[\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right], \quad \alpha_1 = \arcsin \left[\frac{r_1}{r_2} \sin \alpha' \right], \quad \alpha'_1 = \arcsin \left[\frac{n_2}{n_3} \sin \alpha_1 \right]; \quad (2)$$

$$\gamma_1 = 2 \arcsin \left[\frac{n_2}{n_3} \sin \alpha_1 \right] + \Theta_{NA} - \alpha - 2\alpha_1 + 2\alpha'_1. \quad (3)$$

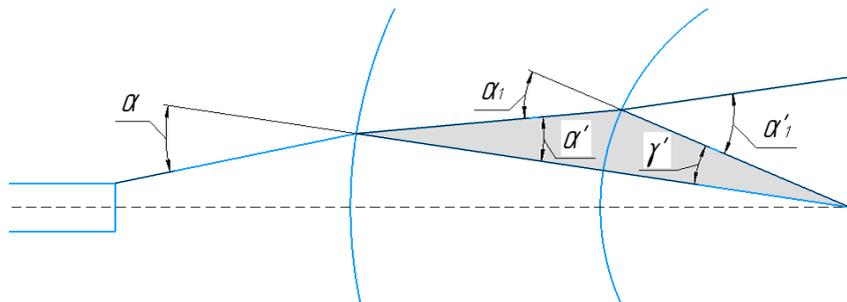


Рис. 4. Геометрические построения к выводу функциональных зависимостей преобразования оптического сигнала в ВОРИП

Согласно теореме косинусов (рис. 5):

$$x = r_1 \sqrt{2(1 - \cos \gamma_1)}, \quad \delta = 90^\circ - \frac{\gamma_1}{2}, \quad \varepsilon = 90^\circ + \frac{\gamma_1}{2}; \quad (4)$$

$$y = \sqrt{x^2 + l_2^2 - 2xl_2 \cos \varepsilon}, \quad \eta = \arcsin \left[\frac{x}{y} \cos \left(\frac{\gamma_1}{2} \right) \right], \quad \varphi = \arcsin \left[\frac{l_2}{y} \cos \left(\frac{\gamma_1}{2} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\omega_3 = 180^\circ - \omega_1 - \omega_2 = 180^\circ - (180^\circ - \alpha - \varphi - \delta) - (90^\circ - \eta) = \alpha + \varphi + \delta + \eta - 90^\circ; \quad (6)$$

$$\Theta_{\text{ex1}} = 90^\circ - \omega_3 = 180^\circ - \alpha - \varphi - \delta - \eta.$$

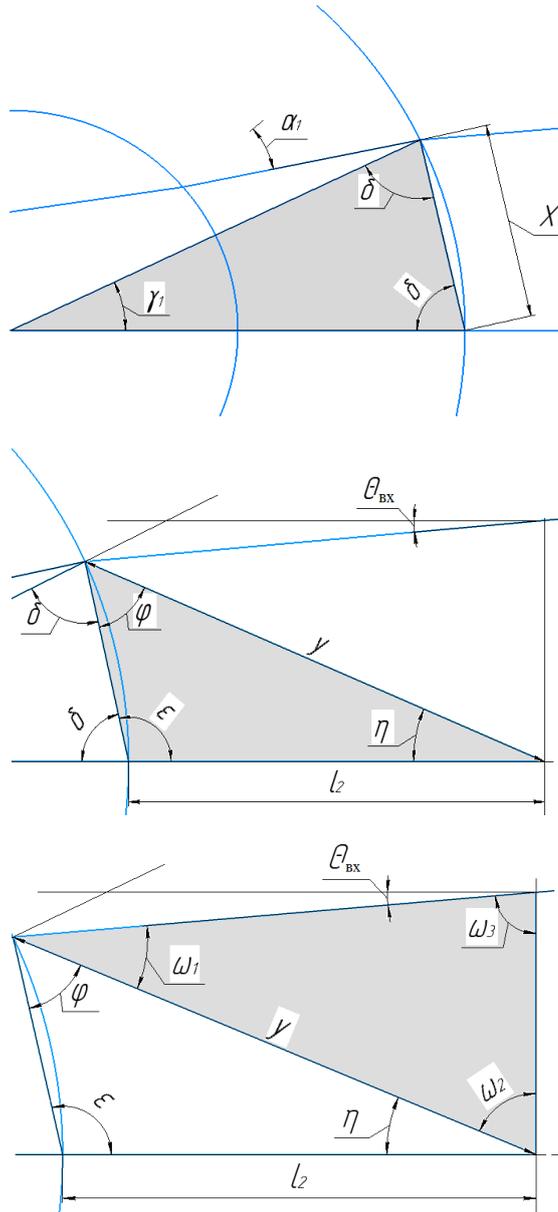


Рис. 5. Геометрические построения к определению Θ_{BX}

Окончательно $\Theta_{\text{BX}}(n_3)$ для первого луча $\Theta_1(n_3)$:

$$\Theta_1(n_3) = 90^\circ - \arcsin \left[\frac{\cos \Theta_{NA} (3r_c + r_1 \text{tg} \Theta_{NA})}{r_1} \right] - \arcsin \left[\frac{l_2}{y} \cos \left(\frac{\gamma_1}{2} \right) \right] + \frac{\gamma_1}{2} - \arcsin \left[\frac{x}{y} \cos \left(\frac{\gamma_1}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

Аналогичные рассуждения и выводы осуществляются для второго луча при определении $\Theta_2(n_3)$.

Результаты моделирования

На рис. 6 приведены графики зависимостей $\Theta_{ВХ} = f(n_3)$ при следующих параметрах оптической системы: 1) Θ_1 (в градусах) при $r_1 = 2$ мм, $r_2 = 1$ мм, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,46$; 2) Θ_2 при $r_1 = 2$ мм, $r_2 = 1$ мм, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,37$; 3) Θ_3 при $r_1 = 3$ мм, $r_2 = 2$ мм, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,46$; 4) Θ_4 при $r_1 = 3$ мм, $r_2 = 2$ мм, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,37$.

При калибровке ВОРИП можно использовать в качестве калибровочного прозрачного вещества газ, жидкость, гелеобразное вещество, твердый прозрачный материал (например, стеклянный стержень с известным коэффициентом преломления n_0 , внешний диаметр которого равен внутреннему диаметру трубки).

Расстояния l_1 и l_2 , внешний и внутренний диаметры цилиндрической трубки $2r_{ц}$, $2r_{ж}$ выбираются из условия максимального ввода светового потока и конструктивного согласования элементов оптической системы. ПОВ располагается перед цилиндрической трубкой для равномерного освещения и увеличения освещенности торцов ООВ на расстоянии, равном или большем двух дистанций формирования L_{Φ} [6]:

$$2L_{\Phi} = l_1 = \frac{2r_c}{\operatorname{tg}\Theta_{NA}}. \quad (8)$$

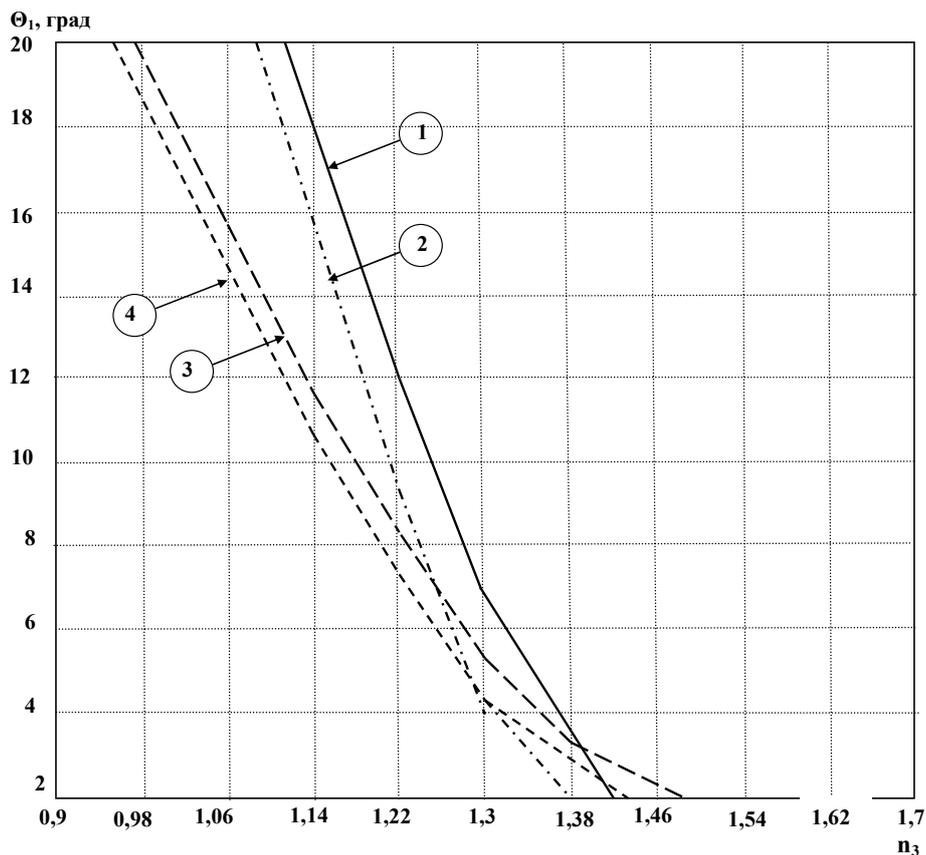


Рис. 6. Графики зависимостей входного угла от коэффициента преломления жидкости $\Theta = f(n_3)$

Параметр l_2 выбирается таким образом, чтобы при калибровке свет максимально перекрывал приемные торцы ООВ, а при измерении показателя преломления вещества – минимально.

С этой целью расстояние l_2 определяется выражением

$$l_2 = \frac{\cos \Theta_{NA} (4r_c + r_{ц} \operatorname{tg} \Theta_{NA})}{\sin \Theta_{NA}} - r_{ц}. \quad (9)$$

Например, для «кварц-кварцевых» оптических волокон с параметрами: диаметр сердцевины $d_c = 0,2$ мм, апертурный угол $\Theta_{NA} = 12^\circ$, цилиндрической трубки с внешним радиусом $r_{ц} = 2,5$ мм и внутренним радиусом $r_{тр} = 1,5$ мм – передача максимально возможной мощности излучения в зону преобразования оптических сигналов достигается при $0,5 \text{ мм} \leq l_1$ и $1,5 \text{ мм} \leq l_2$.

Обсуждения

Для того, чтобы при переходе оптического луча из среды с более высоким коэффициентом преломления (материал трубки) в среду с меньшим коэффициентом преломления (например, исследуемая жидкость) не проявился эффект полного внутреннего отражения, необходимо, чтобы коэффициент преломления жидкости был меньше или равен показателю преломления материала цилиндрической трубки.

Для того, чтобы можно было зафиксировать минимальное изменение коэффициента преломления вещества при незначительном изменении его состава, необходимо добиться максимального перепада коэффициента преломления исследуемого вещества относительно коэффициента преломления вещества, при котором осуществлялась калибровка датчика.

Для достижения максимального перепада значений оптических сигналов между калибровочным веществом и веществом, коэффициент преломления которого измеряется, необходимо позиционировать излучающие торцы подводящего оптического волокна относительно приемных торцов отводящих оптических волокон таким образом, чтобы оптические лучи попадали в них под углами $\Theta_{вх1}$ и $\Theta_{вх2}$, не превышающими апертурный угол оптического волокна Θ_{NA} , т.е.

$$\Theta_{вх1} \leq \Theta_{NA} \text{ и } \Theta_{вх2} \leq \Theta_{NA}. \quad (10)$$

Коэффициенты преломления, соответствующие расчетным, имеют плавленные кварцевые стеклянные трубки ТКГДА, ТКГДБ, ТКГОВ, ТКГОА ТУ 5932-014-00288679-01, которые кроме того устойчивы к потемнению, термически стабильны. Так, при температуре нагрева 1000 ± 20 °С и с последующим охлаждением в воде при температуре не более 25 °С плавленные кварцевые стеклянные трубки с толщиной стенки от 0,6 до 3,0 мм не трескаются, не режутся, не ломаются после 15 смен нагрева. Их диаметр лежит в пределах 5–40 мм. Их можно применять для анализа химических продуктов. Поэтому они рекомендуются для конструирования ВОРИП.

Заключение

Научная и практическая значимость работы состоит:

- в повышении чувствительности преобразования оптических сигналов в ВОРИП на основе определения их физико-технических, оптических и математических закономерностей функционирования;
- определении параметров ВОРИП, которые будут использованы при конструировании волоконно-оптических рефрактометрических датчиков, основных элементов систем мониторинга качества жидкостных сред в системах охраны окружающей среды;
- развитию волоконно-оптических, высокорезультативных экологических технологий.

Список литературы

1. Назарова И. Т. Волоконно-оптические системы измерения уровня искро-взрыво-пожароопасных жидкостей // Фундаментальные исследования. 2014. № 51. URL: <http://www.science-education.ru/117-13472>
2. Зыков В. Н. Метрологические основы систем экологических измерений // Вестник РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 1. С. 60–68.
3. Гармаш В. Г., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н. [и др.]. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических информационно-измерительных систем в современном приборостроении // ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА, 2005. № 6. С. 128–140
4. Волкова Г. В. Световодный рефрактометрический датчик контроля химического состава жидких сред : дис. ... канд. техн. наук. 05.11.13. М., 2004. 145 с. РГБ ОД, 61:05-5/817.
5. Апкин Р. Н., Минакова Е. А. Экологический мониторинг : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 127 с.
6. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы : научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета. СПб. : Политехника, 2018. Ч. I. 187 с.

7. Зуев В. Д., Кривулин Н. П., Волков В. С. Моделирование распределения интенсивности светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя перемещений с управляющим элементом в виде сферической линзы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 1. С. 320–322.
8. Патент РФ 2796797 С2. Волоконно-оптический способ определения коэффициента преломления прозрачного вещества и реализующий его ВОРИП / Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Хасаншина Н. А., Васильев Ю. А., Кукушкин А. Н. № 2021130405 ; заявл. 18.10.2021 ; опубл. 29.05.2023, Бюл. № 16.
9. Бадеев В. А., Шачнева Л. А., Шапетько Е. А., Мурашкина Т. И. Применение волоконно-оптических микросенсоров при мониторинге состояния водной среды // Материалы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Шлядинские чтения-2022) : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд.-во ПГУ, 2022. С. 106–108.
10. Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Шачнева Е. А. Волоконно-оптический рефрактометрический способ мониторинга жидкостных сред // Оптические методы исследования потоков : труды XVII Междунар. науч.-техн. конф. (26– 30 июня 2023). М. : Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. С. 184–190.
11. Вавилин В. А. Математическое моделирование – метод исследования при решении задач регионального гидробиологического мониторинга // Мониторинг состояния окружающей среды. Л. : Гидрометеиздат, 1977. С. 131–139.

References

1. Nazarova I.T. Fiber-optic systems for measuring the level of spark-explosive-flammable liquids. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2014;(51). (In Russ.). Available at: <http://www.science-education.ru/117-13472>
2. Zykov V.N. Metrological foundations of environmental measurement systems. *Vestnik RUDN. Ser.: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the RUDN. Ser.: Ecology and life safety*. 2009;(1):60–68. (In Russ.)
3. Garmash V.G., Egorov F.A., Kolomiets L.N. et al. Possibilities, tasks and prospects of fiber-optic information and measuring systems in modern instrumentation. *FOTON-EKSPRESS-NAUKA*. 2005;(6):128–140. (In Russ.)
4. Volkova G.V. *Light-guide refractometric sensor for monitoring the chemical composition of liquid media*. PhD dissertation: 05.11.13. Moscow, 2004:145. RGB OD, 61:05-5/817. (In Russ.)
5. Apkin R.N., Minakova E.A. *Ekologicheskij monitoring: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. = Environmental monitoring : a textbook. 2nd ed., rev. and exp.* Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2015:127. (In Russ.)
6. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: nauchnye razrabotki NTTs «Nanotehnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Fiber-optic devices and systems : scientific developments of the Scientific Research Center "Nanotechnology of fiber-optic systems" of Penza State University*. Sait Petersburg: Politekhnik, 2018;I:187. (In Russ.)
7. Zuev V.D. Krivulin N.P., Volkov V.S. Modeling of the intensity distribution of the luminous flux in the space of a fiber-optic displacement transducer with a control element in the form of a spherical lens. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;1:320–322. (In Russ.)
8. Patent Russian Federation 2796797 C2. *Volokonno-opticheskiy sposob opredeleniya koeffitsienta prelomleniya prozrachnogo veshchestva i realizuyushchiy ego VORIP = Fiber-optic method for determining the refractive index of a transparent substance and its VORIP*. Badeeva E.A., Badeev V.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Khasanshina N.A., Vasil'ev Yu.A., Kukushkin A.N. № 2021130405; appl. 18.10.2021; publ. 29.05.2023, Bull. № 16. (In Russ.)
9. Badeev V.A., Shachneva L.A., Shapet'ko E.A., Murashkina T.I. The use of fiber-optic microsensors in monitoring the state of the aquatic environment. *Materialy, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii (Shlyandinskie chteniya-2022): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Materials, means and technologies for obtaining and processing measuring information (Shlyandinsky readings-2022) : materials of the XIV International scientific and technical conf.* Penza: Izd.-vo PGU, 2022:106–108. (In Russ.)
10. Badeev V.A., Murashkina T.I., Shachneva E.A. Fiber-optic refractometric method for monitoring liquid media. *Opticheskie metody issledovaniya potokov: trudy XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (26– 30 iyunya 2023) = Optical methods of flow research : proceedings of the XVII International Scientific and Technical conf. (June 26– 30, 2023)*. Moscow: Nauchno-tekhnologicheskii tsentr unikal'nogo priborostroeniya RAN, 2023:184–190. (In Russ.)
11. Vavilin V.A. Mathematical modeling – a research method for solving problems of regional hydrobiological monitoring. *Monitoring sostoyaniya okruzhayushchey sredy = Monitoring of the state of the environment*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977:131–139. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Татьяна Ивановна Мурашкина**

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

Tatyana I. Murashkina

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

Владислав Александрович Бадеев

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

Vladislav A. Badeev

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

Надежда Александровна Хасаншина

магистр, научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nadin.gloria@mail.ru

Nadezhda A. Khasanshina

Master degree student, researcher,
Scientific Research Center
"Nanotechnology of Fiber-optic systems",
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Валентинович Бадеев

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeyev@mail.ru

Aleksandr V. Badeev

Candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific Research Center
"Nanotechnology of Fiber-optic systems",
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Евгений Андреевич Дудоров

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

Evgeny A. Dudorov

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.01.2024

Принята к публикации/Accepted 12.02.2024

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А. А. Трофимов¹, В. В. Кикот², С. А. Здобнов³, С. О. Забродин⁴, Т. О. Жуков⁵

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

¹alex.t1978@mail.ru, ²kikot.v.v@mail.ru, ³sa_zdobnov@mail.ru, ⁴iit@pnzgu.ru, ⁵iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы определяется распространенностью задач контроля и управления изделий гражданской техники с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций. Целью работы является разработка и освоение в серийном производстве унифицированных рядов многослойных пьезопленочных керамических элементов на основе пьезоэлектрического эффекта с использованием технологии шликерного литья для системы управления двигателями внутреннего сгорания. *Материалы и методы.* В работе использованы технологии шликерного литья и холодного полусухого прессования. *Результаты.* Приводятся результаты исследований технологии создания многослойных пьезоактюаторов инжекторов двигателей внутреннего сгорания, изготовленных с использованием технологии шликерного литья. Представлены технические характеристики лабораторных образцов многослойных пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования. Полученное значение относительного рабочего хода при управляющем электрическом напряжении 200 В составило от 0,05 до 0,08 %, при минус 200 В составило от минус 0,06 до минус 0,033 %. Дальнейшее улучшение технических характеристик пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования, в том числе увеличение относительного рабочего хода до 0,13 % при управляющем электрическом напряжении 140 В, возможно путем снижения толщины заготовок-пьезопластин с 0,2 до 0,1 мм и изменения способа их металлизации и сборки (склеивания).

Ключевые слова: инжектор, многослойный пьезоактюатор, макет, цирконат-титаната свинца, пьезокерамический материал, шликерное литье, полусухое прессование, рабочий ход

Для цитирования: Трофимов А. А., Кикот В. В., Здобнов С. А., Забродин С. О., Жуков Т. О. Технология изготовления многослойных пьезоактюаторов для системы управления двигателями внутреннего сгорания // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 32–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-4

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MULTILAYER PIEZO ACTUATORS FOR CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.A. Trofimov¹, V.V. Kikot², S.A. Zdobnov³, S.O. Zabrodin⁴, T.O. Zhukov⁵

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

¹alex.t1978@mail.ru, ²kikot.v.v@mail.ru, ³sa_zdobnov@mail.ru, ⁴iit@pnzgu.ru, ⁵iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is determined by the prevalence of monitoring and control tasks for civil engineering products in order to prevent the occurrence of emergency situations. The goal of the work is to develop and master in mass production of unified rows of multilayer piezo-film ceramic elements based on the piezoelectric effect using slip casting technology for the control system of internal combustion engines. *Materials and methods.* The work uses slip casting and cold semi-dry pressing technologies. *Results.* The results of research into the technology for creating multilayer piezo actuators for injectors of internal combustion engines, manufactured using slip casting technology, are presented. The technical characteristics of laboratory samples of multilayer piezo actuators manufactured using semi-dry cold pressing technology are presented. The obtained value of the relative working stroke at a control electrical voltage of 200 V ranged from 0.05 to 0.08 %, and at minus 200 V it ranged from minus 0.06 to minus 0.033 %. Further improvement of the technical characteristics of piezo actuators manufactured using semi-dry cold pressing technology, including an increase in the relative working stroke to 0.13 % at a control electrical voltage of 140 V, is possible by reducing the thickness of the piezo plate blanks from 0.2 to 0.1 mm and changes in the method of their metallization and assembly (gluing).

Keywords: injector, multilayer piezoactuator, model, lead zirconate-titanate, piezoceramic material, slip casting, semi-dry pressing, working stroke

For citation: Trofimov A.A., Kikot V.V., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Zhukov T.O. Manufacturing technology of multilayer piezo actuators for control systems of internal combustion engines. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):32–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-4

Введение

Пьезокерамика находит широкое применение в различных областях народного хозяйства и специальной техники [1–3]. Пьезокерамические элементы могут быть использованы в различных акустических устройствах, в датчиках для измерения давлений, вибраций и ускорения, датчиках для ультразвуковых линий задержки, в фильтровой технике, системах зажигания, гироскопах, пьезотрансформаторах и т.д.

Разнообразие областей применения пьезокерамики приводит к большому разнообразию требований на ее свойства. Например: для специальных пьезодатчиков требуется керамика, способная работать в широком интервале температур, для фильтровых резонаторов необходима высокая стабильность параметров в широком интервале температур и в течение длительного промежутка времени, для гидроакустических применений необходима пьезокерамика, способная работать в сильных электрических полях и при больших давлениях, для гидроакустики и сейсмоприемников требуется высокоэффективная пьезокерамика (с большими значениями пьезомодулей). Требования, предъявляемые к пьезокерамике, непрерывно повышаются. Это заставляет искать новые пьезокерамические материалы и исследовать их свойства.

К изыскиваемым в этой работе пьезоэлектрическим материалам для работы их в качестве преобразователя в специальных пьезодатчиках предъявляются следующие требования: работоспособность в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С; высокая чувствительность; минимальное изменение чувствительности от времени, температуры, давления; минимальный температурный гистерезис чувствительности; высокая прочность пьезокерамики.

К настоящему времени практическое применение нашли в основном две группы пьезокерамических материалов. К ним относятся: титанат бария и его производные материалы на основе титаната свинца и ниобатные материалы. Эти материалы наиболее полно исследованы и именно для них в литературе известны характеристики, определяющие возможность использования их в качестве пьезоэлектрических преобразователей. Так, известно, что применение в пьезодатчиках керамики титаната бария ограничено температурами порядка 70–80 °С.

Введение добавок Са и Рb повышает рабочие температуры до 110–130 °С, но вдвое снижает чувствительность. Введение кобальта в твердый раствор титаната бария-кальция (BaCa)TiO₃ повышает устойчивость состава к воздействию сильных электрических полей и больших механических напряжений. Низкий верхний предел рабочих температур и низкотемпературные фазовые переходы ограничивают применение керамик на основе титаната бария в широком температурном интервале.

С целью расширения интервала рабочих температур были разработаны пьезодатчики с керамикой (PbBa)Nb₂O₆. Эти пьезодатчики работают на сдвиг, чувствительность их характеризуется пьезомодулем d_{15} , верхний предел рабочих температур – до 200 °С.

Пьезокерамика на основе твердых растворов (PbBa)Nb₂O₆ по ряду показателей эффективнее составов системы титаната бария, однако пока не удается определить условия для получения стабильных составов.

Сейчас в пьезоэлектрических датчиках применяются пьезокерамические материалы системы ЦТС (цирконат-титанат свинца). Семейство пьезокерамик ЦТС имеет температуры Кюри до 350–400 °С, рабочие температуры порядка 250 °С, хорошую пьезочувствительность, но требуют тщательных исследований с учетом предъявляемых требований.

В последние годы интенсивно ведется разработка новых пьезокерамических материалов. Сейчас известны составы, у которых достаточно хорошие пьезосвойства сохраняются до 400 °С. Это материалы на основе титаната свинца, метаниобата свинца, метаниобатов натрия и калия.

В настоящее время известна система управления питанием двигателя внутреннего сгорания с прямым впрыском топлива на основе инжекторов с соленоидными игольчатыми клапанами: при деактивированном соленоиде подпружиненная игла закрывает клапан (сопло инжектора), при активации соленоида игла поднимается и топливо впрыскивается в камеру сгорания.

Разрабатываемая система свободна от недостатков, имеющих у системы инжекторов с соленоидными игольчатыми клапанами. У инжекторов с пьезоактюаторами на основе многослойных пьезокерамических элементов управляющее электрическое напряжение ниже, чем у монолитных (при тех же габаритных размерах и рабочем ходе). Например, чтобы обеспечить рабочий ход 1 мкм, монолитному пьезоактюатору толщиной 1 мм требуется около 1 кВ, многослойному той же толщины и состоящему из слоев толщиной от 0,04 до 0,1 мм, – около 100 В [4].

Материалом, используемым для изготовления пьезоактюаторов, является твердый раствор ЦТС, состав которого изменяется при его изготовлении введением различных легирующих добавок, которые определяют требуемые пьезочувствительность (до 550 пКл/Н), добротность (до 2000), диапазон рабочих температур (из диапазона от минус 253 до 250 °С) и рабочий ход или относительное изменение геометрических размеров до не менее $1 \cdot 10^{-3}$). При изготовлении пьезоактюаторов используются две технологии: на основе шликерного литья и металлизации пьезопленок толщиной от 0,02 мм и более и последующей сборки и спекания из пьезопленок заготовок пьезоактюаторов; на основе полусухого холодного прессования, последующего спекания, механообработки и склеивания заготовок-пьезопластин толщиной от 0,1 мм [4].

Применение игольчатых клапанов с пьезоактюаторами привело к улучшению технических характеристик системы управления питанием двигателем путем увеличения блокирующего усилия, управляющего клапаном, и повышения быстродействия и точности задания перемещения иглы клапана форсунки, что понизило расход топлива на 15 % и более [5]. Например, пьезоактюаторы инжекторов обеспечивают управление клапанами с быстродействием от 1 до 10 мс при максимальном рабочем ходе от 3 до 5 мкм и усилием до 5 кН [6]. Основными задачами, решаемыми в рамках данной работы являются:

- поиск и исследование новых пьезокерамических материалов, работоспособных в интервале рабочих температур от минус 60 °С до +600 °С;
- исследование возможности повышения температурной стабильности пьезокерамики;
- поиск путей увеличения пьезочувствительности пьезоматериалов;
- разработка теоретических основ влияния дефектов структуры на стабильность рабочих параметров пьезоматериалов;
- получение и исследование диэлектрических свойств и стабильности рабочих параметров при воздействии дестабилизирующих факторов, в том числе при воздействии повышенных температур;
- внедрение разработанной технологии изготовления высокотемпературных текстурированных материалов пьезоэлементов при изготовлении пьезопроводов на основе пьезоэлектрических пластин, полученных методом холодного полусухого прессования для системы управления двигателями внутреннего сгорания.

Пьезоэлементы применяются в гидроакустических излучателях и приемниках, в ультразвуковых линиях задержки, в качестве резонаторов пьезокерамических фильтров и преобразователей электромеханических и камертонных фильтров, а также в датчиках для измерения ускорений, вибрации, давлений. Находят применение в телефонах, микрофонах, звукоснимателях, в ультразвуковых устройствах, предназначенных для интенсификации технологических процессов, сейсмоприемниках, аппаратах медицинской диагностики, гироскопах и многих других устройствах.

Пьезокерамические элементы в составе многослойной структуры достаточно широко используются для создания чувствительных элементов датчиков высокой чувствительности, микроконденсаторов переменной емкости, микрофазовращателей, Переключателей, пьезопроводов, управляемых микрзеркалами для адаптивной оптики и других устройствах микро и нано электроники.

Производство многослойных пьезокерамических элементов, состоящих из чередующихся слоев, обеспечивает ряд преимуществ:

- очень тонкие керамические слои позволяют создавать большие перемещения при низких напряжениях возбуждения (20–100 В);
- высокая интенсивность электрического поля (до 3000 В/мм) позволяет получить большую величину перемещения на единицу объема;
- малая мощность потребления;
- надежная работа в жестких условиях благодаря использованию встроенных электродов.

Пьезокерамический материал с температурой точки Кюри > 350 °С позволяет расширить область применения пьезоэлементов на его основе.

Создание сегнето-пьезоэлектрических материалов с оптимальными свойствами для различных применений является важной материаловедческой задачей. Параметры пьезоэлементов в значительной степени определяются составом пьезокерамического материала, из которого они изготавливаются.

Основная часть

Для исследования возможностей применения технологии шликерного литья при изготовлении пьезоактюаторов фирмой «Технодизель Мурсия» (Испания), используемых в составе пьезоактюаторного инжектора (рис. 1), предоставлены образцы многослойных пьезоактюаторов.



Рис. 1. Конструкция пьезоактюаторного инжектора

При анализе пьезоактюаторов установлено, что в их конструкции имеются многослойные пьезоэлементы, соединенные эластичным электроизоляционным клеем, в том числе: по одному верхнему и нижнему пьезоэлементу толщиной 4,85 мм (каждый из 36 пьезопленок: 14 – 0,072 мм, 6 – 0,0125 мм, а также из 16 – 0,0197 мм толщиной, которые не подключены к управляющим электродам) и по 16 рабочих пьезоэлементов толщиной 1,15 мм (каждый из 17 пьезопленок толщиной 0,068 мм), причем пьезопленки имеют двухстороннюю металлизацию. Пьезопленки изготовлены с использованием шликерного литья из сегнетомягкого пьезокерамического материала плотностью не менее $7,3 \text{ г/см}^3$, температурой спекания не более $950 \text{ }^\circ\text{C}$, относительной диэлектрической проницаемостью 1500 и пьезочувствительностью d_{31} не менее 160 пКл/Н, d_{33} не менее 320 пКл/Н [7].

Представленные образцы пьезоактюаторов обеспечивают рабочий ход не менее 0,04 мм при управляющем электрическом напряжении 140 В и температуре эксплуатации от минус 40 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что технология шликерного литья находится на этапе отработки, при изготовлении макетов применена имеющаяся технология полусухого прессования для определения возможности ее использования в производстве пьезоактюаторов. Из материала НФИ-50 (пьезочувствительность d_{33} не менее 400 пКл/Н; относительная диэлектрическая проницаемость не менее 1500) изготовлены заготовки-пьезопластины, приведенные на рис. 2.

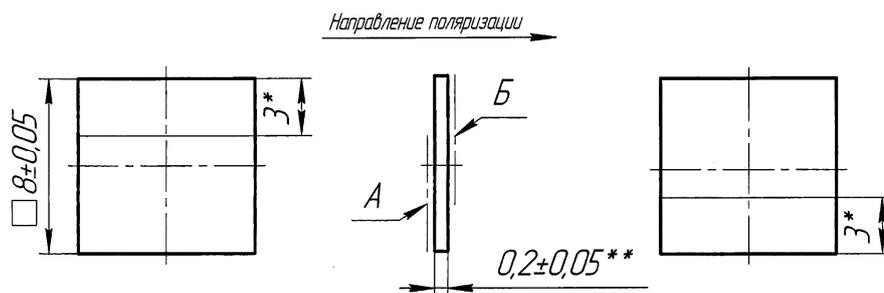


Рис. 2. Внешний вид пьезопленочного керамического элемента

1. Покрытие поверхностей А и Б Вж.Ср.0,005min допускается Ср.0,005min Хим.Н.0,005min.
 2. На металлизированных и неметаллизированных поверхностях пьезоэлемента не допускаются трещины вздутия и отслаивания покрытия.
 3. Маркировать поверхность А положительной полярности знаком «•». Способ нанесения знака не регламентируется.
 4. Пьезочувствительность d_{33} должна быть не менее 250 пКл/Н.
- Внешний вид одного из изготовленных лабораторных образцов многослойного пьезоактюатора приведен на рис. 3.

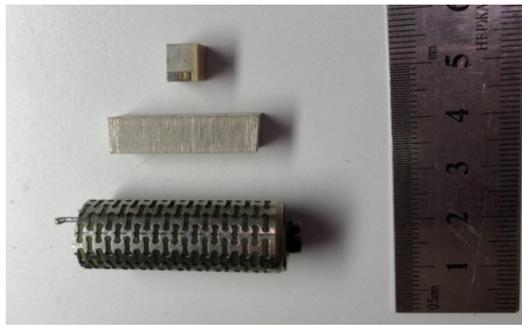


Рис. 3. Лабораторный образец пьезоактюатора

Рабочий ход пьезоактюатора зависит в основном от пьезочувствительности материала d_{33} и напряженности приложенного к пьезоактюатору управляющего электрического поля. В процессе эксплуатации пьезоактюатора при воздействующей противодействующей силе необходимо учитывать характер ее воздействия: постоянная или переменная. На рис. 4 показано влияние противодействующих сил на рабочий ход пьезоактюатора. Рабочий ход при отсутствии противодействующей силы (нагрузки) принят равным S_0 [5].

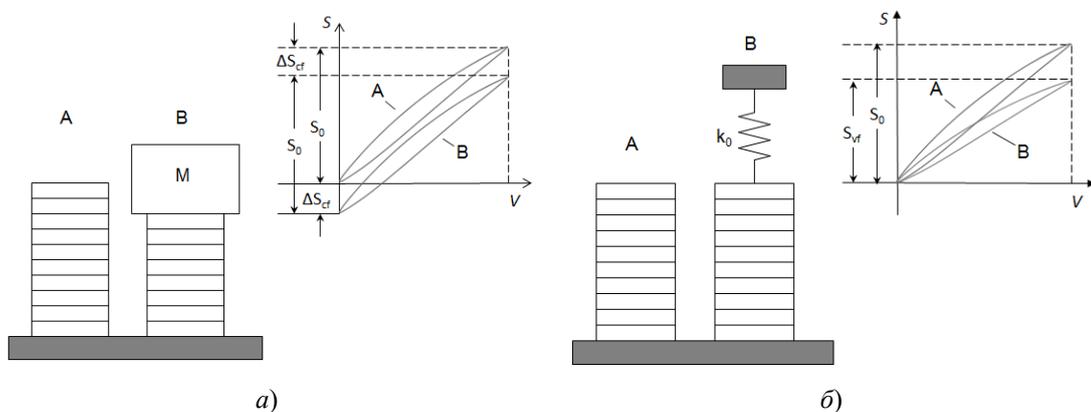


Рис. 4. Влияние противодействующей силы на рабочий ход пьезоактюатора:
а – постоянной; б – переменной

Если нагружение остается постоянным во время процесса приведения пьезоактюатора в действие (при воздействии постоянной массы или предварительного нагружения пружиной), то пьезоактюатор будет первоначально сжат на ΔS_{cf} , причем, несмотря на предварительное нагружение, рабочий ход пьезоактюатора будет прежним, и полный рабочий ход обеспечивается максимальным управляющим электрическим напряжением. Величину сжатия ΔS_{cf} можно определить по выражению

$$\Delta S_{cf} = \frac{M}{k}, \quad (1)$$

где ΔS_{cf} – это сжатие пьезоактюатора с жесткостью k из-за постоянной нагрузки M , приложенной к пьезоактюатору.

Если нагрузка пьезоактюатора изменяется в процессе эксплуатации, например, при воздействии на жесткую пружину, то его рабочий ход в этом случае будет меньше, чем рабочий ход в ненагруженном состоянии S_0 . Если пьезоактюатор будет противодействовать пружине с постоянной k_0 , то его фактический рабочий ход S_{vf} вычисляется по выражению [5]

$$S_{vf} = \frac{k_0 S_0}{k + k_0}. \quad (2)$$

Рабочий ход исследуемых ненагруженных пьезоактюаторов измерен при натурном эксперименте, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений рабочего хода пьезоактюаторов

Наименование	Толщина, мм	Удлинение		Сжатие	
		Управляющее электрическое напряжение, В	Рабочий ход, мм (относительный рабочий ход, %)	Управляющее электрическое напряжение, В	Рабочий ход, мм (относительный рабочий ход, %)
1. Пьезоактюатор, изготовленный с использованием технологии шликерного литья	30	140	0,04 (0,13)	–	–
2. Макет пьезоактюатора, изготовленный с использованием технологии полусухого прессования	30	200	0,015 (0,05)	–200	–0,01 (–0,033)
3. Макет пьезоактюатора, изготовленный с использованием технологии полусухого прессования	10	200	0,008 (0,08)	–200	–0,006 (–0,06)

Заключение

Рассмотрены известные сейчас сегнетоэлектрики и твердые растворы на их основе, перспективные для получения пьезокерамики. Проведен обзор кристаллохимических принципов поиска новых составов, работоспособных в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С, проанализированы экспериментальные данные относительно возможности управления электрофизическими свойствами материала, рассмотрены вопросы, связанные с повышением пьезоактивности.

Рассмотрены вопросы технологии производства пьезокерамики, влияние отдельных технологических факторов на ее электрофизические и механические свойства. Исследованы режимы термообработки и поляризации, проведен рентгеноструктурный анализ.

В процессе выполнения работы на основе теоретического анализа получены зависимости, показывающие влияние примесных атомов на стабильность пьезоэлектрических свойств пьезокерамики. Проведен анализ основных механизмов, связанных с диффузией примесей к доменным границам, определены характерные времена таких процессов, предложены рекомендации по улучшению стабильности рабочих параметров пьезоматериалов. Проведены исследования структуры, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств этой керамики в интервале температур 293–900 К, стабильности пьезосвойств при циклическом изменении температуры от 293 до 570 К. Изготовлены экспериментальные образцы пьезоэлементов из керамики.

Рассмотрена технология изготовления многослойных пьезоактюаторов толщиной до 30 мм и относительным рабочим ходом при управляющем электрическом напряжении 200 В от 0,05 до 0,08 %, при минус 200 В от минус 0,06 до минус 0,033 %.

Дальнейшее улучшение технических характеристик пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования, в том числе увеличение

относительного рабочего хода до не менее 0,13 % при управляющем электрическом напряжении 140 В, возможно путем снижения толщины заготовок-пьезопластин с 0,2 до 0,1 мм и изменения способа их металлизации и сборки (склеивания).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
4. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков : монография / пер. с япон. М. М. Богачихина, Л. Р. Зайонца. М. : Энергия, 1976. 327 с.
5. Davoudi S. Effect of temperature and thermal cycles on PZT ceramic performance in fuel injector applications // Library University of Toronto. URL: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/33393/1/Davoudi_Sadegh_201211_MASc_thesis.pdf (дата обращения: 02.10.2021).
6. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.
7. Губич И. А., Кикот В. В., Кошкин Г. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : XXXIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2021. С. 98–103.

References

1. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and, based on them, measurement, monitoring and control systems for technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)
4. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov: monografiya = Technology of ceramic dielectrics : monograph* / Translated from Japanese. M.M. Bogachikhin, L.R. Zayonts. Moscow: Energiya, 1976:327. (In Russ.)
5. Davoudi S. Effect of temperature and thermal cycles on PZT ceramic performance in fuel injector applications. *Library University of Toronto*. Available at: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/33393/1/Davoudi_Sadegh_201211_MASc_thesis.pdf (accessed 02.10.2021).
6. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy = Executive devices and systems for micro-displacement*. Saint Petersburg: SPb GU ITMO, 2011:131. (In Russ.)
7. Gubich I.A., Kikot V.V., Koshkin G.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: XXXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. conf. = Problems of automation and control in technical systems : XXXIV International scientific and technical conf.* Penza, 2021:98–103. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

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

Alexei 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)

Виктор Викторович Кикот

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kikot.v.v@mail.ru

Victor V. Kikot

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of rocket-space and aviation instrumentation,
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. Zbodnov

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

Станислав Олегович Забродин

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

Stanislav O. Zabrodin

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

Тимофей Олегович Жуков

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

Timofei O. Zhukov

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

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

Поступила в редакцию/Received 25.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2024

Принята к публикации/Accepted 16.02.2024

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 630

doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-5

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЗЕМНОГО ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПЛОЩАДИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Ф. Г. Агаев¹, М. Э. Омаров²

^{1,2} Институт космических исследований природных ресурсов
Национального аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджанская Республика

¹ director.tekti@mail.ru, ² meracomarov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сформирована задача оптимизации наземных измерений индекса листовой площади с учетом изменения зенитного угла Солнца в течение восхода и захода в противоположном порядке. *Материалы и методы.* Предложена среднеинтегральная модификации индекса LAI в виде некоторого функционала. *Результаты и выводы.* Определено, что предложенный функционал с учетом введенного ограничительного условия имеет экстремали в виде функциональных зависимостей поступающей оптической радиации и проходящей через крону растительности оптической радиации от зенитного угла Солнца. Показано, что первый из этих экстремалей обеспечивает максимум целевого функционала а второй минимум.

Ключевые слова: фотометрические измерения, валидация, индекс листовой площади, зенитный угол Солнца, оптическая радиация

Для цитирования: Агаев Ф. Г., Омаров М. Э. Оптимизация наземного фотометрического метода измерения индекса листовой площади растительности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 40–46. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-5

OPTIMIZATION OF GROUND PHOTOMETRIC METHOD OF MEASUREMENT OF VEGETATION LEAF AREA INDEX

F.G. Agaev¹, M.E. Omarov²

^{1,2} Institute of Space Research of Natural Resources
of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

¹ director.tekti@mail.ru, ² meracomarov@gmail.com

Abstract. *Background.* In the article, the problem of optimizing ground measurements of the sheet area index was formed taking into account the change in the Solz zenith angle during sunrise and approach in the opposite order. *Materials and methods.* A mid-integral modification of the LAI index in the form of some functionality is proposed. *Results and conclusions.* It is determined that the proposed functionality, taking into account the introduced limiting condition, has extremals in the form of functional dependencies of incoming optical radiation and optical radiation passing through the vegetation crown from the zenith angle of the Sun. It is shown that the first of these extremals provides the maximum target functionality and the second minimum.

Keywords: photometric measurements, validation, leaf area index, zenith angle of the Sun, optical radiation

For citation: Agaev F.G., Omarov M.E. Optimization of ground photometric method of measurement of vegetation leaf area index. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1): 40–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-5

Введение

Индекс листовой площади (LAI) определяется в качестве суммы односторонних площадей листьев, приходящейся на некоторую фиксированную площадь земли, и рассматривается в качестве основного биофизического параметра, влияющего на такие процессы, как фотосинтез, транспирация и энергодобавление на поверхности земли [1, 2]. Данные об индексе LAI изучались в таких космических проектах, как MODIS, POLDER, GLOBCARBON, CYCLOPS [3]. Для валидации космических данных, касающихся LAI, исследования по проведению наземных проксимальных измерений осуществлялись во многих научных центрах США, Канады и Европы [4, 5].

В целом методы измерения LAI делятся на прямые и косвенные методы. В прямом методе осуществляется измерение площадей листьев, приходящихся на некоторую фиксированную площадь земной поверхности. При этом существуют планиметрический и гравиметрический подход к реализации этого метода [6, 7].

Что касается косвенных методов, то согласно статье [6] эти методы разделяются на контактные и неконтактные. Контактные методы базируются на установлении связи этого индекса с измеряемыми аллометрическими показателями растений [1, 6]. Неконтактные косвенные методы основываются на измерении оптической радиации, поступающей на крону растения и прошедшей через нее. В этом отношении наиболее показателен измерительный эксперимент, суть которого подробно изложена в работе [7] и заключается в следующем. Под кроной растения были установлены 15 сенсоров для измерения фотосинтетически активной радиации (PAR).

Для вычисления поглощенной части PAR (FAPAR) использовалась формула

$$FAPAR = \frac{PAR_{in} - PAR_{out} - PAR_t}{PAR_{in}}, \quad (1)$$

где PAR_{in} – входящая PAR; PAR_{out} – отраженная часть PAR_{in} ; PAR_t – прошедшая через крону растения PAR, зависящая от зенитного угла Солнца.

Индекс LAI определялся по формуле [8]

$$LAI = \frac{-\ln\left(\frac{PAR_t}{PAR_{in}}\right)}{k}, \quad (2)$$

где k – коэффициент ослабления, определяемый по формуле

$$k(\theta) = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2(x)}}{x + 1,774(x + 1,182) - 0,733}, \quad (3)$$

где показатель x является функцией распределения угла эллипсоидальных листьев.

Вместе с тем, согласно работе [7], вышеуказанная методика была опробована в течение ограниченного интервала времени дня, между 10.00 и 14.00. Между тем зенитный угол θ изменяется как в процессе восхода, так и захода солнца, что дает все основания полагать наличие экстремума в функции временной зависимости $k(t)$. В течение восхода Солнца зенитный угол уменьшается, следовательно, в соответствии с формулой (3) уменьшается и $k(\theta)$. Следовательно, определенный интерес представляет следующий вопрос: в какое время суток следует осуществлять измерение LAI и какова разница между результатами измерений, проведенных в течение восхода и захода Солнца. Далее изложены результаты проведенных исследований авторов данной работы, посвященной указанному вопросу.

Материалы и методы

Прежде всего отметим, что в течение проведенных исследований использовали среднеинтегральную модель LAI_{cp} , определяемую как

$$LAI_{cp} = \frac{1}{k(\theta)_{max} - k(\theta)_{min}} \int_{k_{min}}^{k_{max}} \frac{\ln(PAR_{in} / PAR_t)}{k(\theta)} dk. \quad (4)$$

Далее с учетом зависимости (3), а также очевидной функциональной зависимости PAR_{in} от θ была введена функция

$$PAR_{in} = \varphi(k(\theta)) \quad (5)$$

или просто

$$PAR_{in} = f_1(k). \quad (6)$$

Была поставлена задача определения такого вида функции $f(k)$, при которой LAI_{cp} достиг бы экстремальной величины.

Также была сформулирована альтернативная задача, заключающаяся в поиске такой функциональной зависимости

$$PAR_t = f_2(k), \quad (7)$$

при которой LAI_{cp} достиг бы экстремальной величины.

Для решения вышеуказанных задач на искомые функции $f_1(k)$ и $f_2(k)$ были наложены следующие ограничительные условия:

$$\int_{k_{min}}^{k_{max}} f_1(k) dk = C_1; C_1 = \text{const}; \quad (8)$$

$$\int_{k_{min}}^{k_{max}} f_2(k) dk = C_2; C_2 = \text{const}. \quad (9)$$

Геометрическая интерпретация условий (8) и (9) показана на рис. 1, где группа кривых, обозначенных цифрой 1, соответствует измерительному эксперименту, проводимому при заходе Солнца, когда уменьшаются $f_1(k)$ и $f_2(k)$ с ростом θ и $k(\theta)$. Группа кривых, обозначенная цифрой 2, соответствует случаю проведения измерительного эксперимента в течение восхода Солнца.

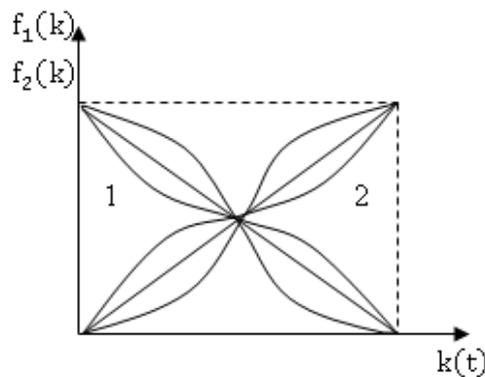


Рис. 1. Схематическая интерпретация ограничительных условий (8) и (9)

Рассмотрим процедуру решения первой сформулированной задачи. Для упрощения записи далее коэффициенты ослабления будем обозначать как k . С учетом уравнений (4) и (5) целевой функционал F_1 решаемой оптимизационной задачи определим как

$$F_1 = \frac{1}{k_{max} - k_{min}} \int_{k_{min}}^{k_{max}} \frac{\ln(f_1(k) / PAR_t)}{k} dk. \quad (10)$$

С учетом формул (8) и (10) составим целевой функционал F_{10} безусловной вариационной оптимизации:

$$F_{10} = \frac{1}{k_{\max} - k_{\min}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{\ln(f_1(k) / PAR_t)}{k} dk + \lambda_1 \left[\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} f_1(k) dk - C_1 \right], \quad (11)$$

где λ_1 – множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера – Лагранжа решение задачи (11) должно удовлетворить условию [8]

$$d \left\{ \frac{\ln(f_1(k) / PAR_t)}{k(k_{\max} - k_{\min})} + \lambda_1 f_1(k) \right\} / df_1(k) = 0. \quad (12)$$

Из условия (12) находим

$$\frac{1}{f_1(k)k(k_{\max} - k_{\min})} + \lambda_1 = 0. \quad (13)$$

Из уравнения (13) получаем

$$f_1(k) = -\frac{1}{\lambda_1 k(k_{\max} - k_{\min})}. \quad (14)$$

Для вычисления воспользуемся выражениями (8) и (14), имеем

$$-\frac{1}{\lambda_1} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{dk}{k(k_{\max} - k_{\min})} = C_1. \quad (15)$$

Из уравнения (15) находим

$$\lambda_1 = -\frac{1}{C_1 \Delta k} \ln \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \right), \quad (16)$$

где $\Delta k = k_{\max} - k_{\min}$.

С учетом выражений (14) и (16) получим

$$f_1(k) = \frac{C_1}{k \ln \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \right)}. \quad (17)$$

Таким образом, при $f_1(k)$ в виде (17) функционал F_{10} достигает экстремума. При этом решение (17) приводит F_{10} к максимуму, так как проверка по знаку второй производной подынтегрального выражения (11) по искомой функции показывает, что экстремум является максимумом. Указанный максимум с учетом (10) и (17) вычисляется как

$$F_{10} = \frac{1}{k \Delta k} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \ln \left[\frac{C}{k \ln \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \right) PAR_t} \right] dk. \quad (18)$$

Рассмотрим решение второй сформулированной задачи.

С учетом уравнений (4) и (7) сформируем следующий целевой функционал задачи оптимизации

$$F_1 = \frac{1}{k_{\max} - k_{\min}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{1}{k} \ln \left[\frac{PAR_{in}}{f_2(k)} \right] dk + \lambda_2 \left[\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} f_2(k) dk - C_2 \right], \quad (19)$$

где λ_1 – множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера – Лагранжа решение уравнения (19) должно удовлетворить условию (8)

$$-\frac{1}{(k_{\max} - k_{\min})kf_2(k)} + \lambda_2 = 0. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим

$$f_2(k) = \frac{1}{\lambda_2(k_{\max} - k_{\min})k}. \quad (21)$$

С учетом выражений (9) и (21) получим

$$\frac{1}{\Delta k \lambda_2} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{dk}{k} = C_2. \quad (22)$$

Из выражения (22) имеем

$$\lambda_2 = \frac{1}{C_2 \Delta k} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{dk}{k} = \frac{\ln \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \right)}{C_2 \Delta k}. \quad (23)$$

С учетом выражений (21) и (23) находим

$$f_2(k) = \frac{C_2}{k \ln \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} \right)}. \quad (24)$$

Таким образом, решение уравнения (24) обеспечивает экстремум функционала (19).

Обсуждение

Сравнивая решения (17) и (24), нетрудно увидеть, что они отличаются только величиной постоянных фигурирующих в числителе.

Однако в отличие от решения (17) выражение (24) приводит функционал (19) к минимуму. Чтобы убедиться в этом, достаточно вычислить вторую производную подынтегрального выражения функционала (19) и убедиться, что результат имеет положительный знак.

Таким образом, несмотря на то, что группа кривых 1 на рис. 1 качественно характеризует экстремали целевых функционалов рассматриваемых двух задач, в первой задаче эти кривые обеспечивают максимум функционала, а во втором случае – минимум.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимизации наземных проксимальных измерений индекса листовой площади. Исследованы экстремальные свойства предложенной среднеинтегральной модификации индекса LAI , в которой учитывается факт изменения зенитного угла в течение восхода и захода Солнца в противоположном порядке. Показано, что существуют экстремали в виде вновь введенных функциональных зависимостей поступающей оптической радиации и проходящей через растительность оптической радиации от зенитного угла Солнца. Однако в первом случае вычисленный экстремаль обеспечивает максимум целевого функционала в виде среднеинтегральной оценки LAI , а во втором случае – минимум.

Список литературы

1. Breda N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies // *Journal of experimental botany*. 2003. Vol. 54. P. 2403–2417.
2. Tian Y., Woodcock C. E., Wang Y. [et al.]. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product // I uncertainty assessment. *Remote Sensing of environment*. 2002. Vol. 83. P. 414–430.
3. Schaefer M. T., Farmer E., Soto-Berelov M. [et al.]. Overview of ground based techniques for estimating LAI // *AusCover Good practice guidelines: A technical handbook supporting calibration and validation activities of remotely sensed data product*. 2015. Version 1.2. P. 90–122.
4. Baret F., Weiss M., Allard D. [et al.]. Valeri: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products // *Remote Sensing Environment*. 2013. URL: <http://researchgate.net>
5. Cohen W. B., Maersperger T. K., Turner D. P. [et al.]. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere// *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2006. Vol. 44. P. 1843–1857.
6. Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K. [et al.]. Review of methods for in situ leaf area index determination part I theories, sensors and hemispherical photography // *Agricultural and forest meteorology*. 2004. Vol. 121. P. 19–35.
7. Soudani K., Delpierre N., Berveiller D. [et al.]. A survey of proximal methods for monitoring leaf phenology in temperate deciduous forests // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. P. 3391–3408.
8. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. 432 с.

References

1. Breda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of experimental botany*. 2003;54:2403–2417.
2. Tian Y., Woodcock C.E., Wang Y. et al. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of environment*. 2002;83:414–430.
3. Schaefer M.T., Farmer E., Soto-Berelov M. et al. Overview of ground based techniques for estimating LAI. *AusCover Good practice guidelines: A technical handbook supporting calibration and validation activities of remotely sensed data product*. 2015;(Vers.1.2):90–122.
4. Baret F., Weiss M., Allard D. et al. Valeri: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing Environment*. 2013. Available at: <http://researchgate.net>
5. Cohen W.B., Maersperger T.K., Turner D.P. et al. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2006;44:1843–1857.
6. Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*. 2004;121:19–35.
7. Soudani K., Delpierre N., Berveiller D. et al. A survey of proximal methods for monitoring leaf phenology in temperate deciduous forests. *Biogeosciences*. 2021;18:3391–3408.
8. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie = Differential equations and calculus of variations*. Moscow: Nauka, 1974:432. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Фахраддин Гюльали оглы Агаев**

доктор технических наук, профессор,
директор Института космических
исследований природных ресурсов
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: director.tekti@mail.ru

Fakhraddin G. Agaev

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Institute for Space Research
of Natural Resources of the National Aerospace
Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Azerbaijan Republic)

Мерадж Эддар оглы Омаров

аспирант,
Институт космических
исследований природных ресурсов
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: meracomarov@gmail.com

Meraj E. Omarov

Postgraduate student,
Institute for Space Research of Natural Resources
of the National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Azerbaijan Republic)

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

Поступила в редакцию/Received 11.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 12.01.2024

Принята к публикации/Accepted 09.02.2024

УДК 621.317
doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ ЖИДКОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ИЗ-ЗА ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

С. О. Ахмедова¹, Б. Р. Джаббарлы²

¹ Азербайджанский государственный экономический университет, Баку, Азербайджанская Республика

² Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджанская Республика

¹ Axmedovasevda111@gmail.com, ² Cabbarli.bibixanim@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Отмечено, что процесс оседания частиц приводит к разным результатам измерения мутности воды. Процесс оседания частиц создает методическую неопределенность при интерпретации результатов измерений. *Материалы и методы.* Предложены два метода проведения измерения мутности воды, в которых данная неопределенность частично устраняется. В первом методе, названном дифференциальным методом, рекомендуется измерения проводить на фиксированном коротком временном интервале. Оценена относительная погрешность дифференциального метода в сравнении с результатом, получаемым по базовой формуле, без учета оседания частиц. Показано, что указанная погрешность уменьшается с увеличением времени оседания. Также исследована относительная погрешность второго предлагаемого интегрального метода измерения мутности, суть которого заключается в проведении интегрального измерения мутности за весь период оседания частиц и дальнейшего усреднения за время проведения измерений. *Результаты и выводы.* Показано, что погрешность среднеинтегральных измерений уменьшается с увеличением регрессионного показателя. Определен порядок проверки достоверности полученных результатов оценки соответствующих погрешностей.

Ключевые слова: мутность, погрешность, измерения, методическая погрешность, седimentация

Для цитирования: Ахмедова С. О., Джаббарлы Б. Р. Исследование погрешности измерения мутности жидкости, возникающей из-за осаждения частиц // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 47–52. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-6

INVESTIGATION OF THE MEASUREMENT ERROR OF THE TURBIDITY OF THE LIQUID ARISING FROM THE DEPOSITION OF PARTICLES

S.O. Ahmedova¹, B.R. Jabbarli²

¹ Azerbaijan State Economic University, Baku, Republic of Azerbaijan

² Azerbaijan Technical University, Baku, Republic of Azerbaijan

¹ Axmedovasevda111@gmail.com, ² Cabbarli.bibixanim@mail.ru

Abstract. *Background.* It is noted that the process of settling of particles leads to different results of measuring the turbidity of water. The process of settling of particles creates methodological uncertainty in the interpretation of measurement results. *Materials and methods.* Two methods of measuring the turbidity of water are proposed, in which this uncertainty is partially eliminated. In the first method, called the differential method, it is recommended that measurements be carried out on a fixed short time interval. The relative error of the differential method is estimated in comparison with the result obtained by the basic formula, without taking into account the settling of particles. It is shown that this error decreases with increasing settling time. The relative error of the second proposed integral turbidity measurement method is also investigated, the essence of which is to carry out an integral turbidity measurement for the entire period of particle settling and further averaging during the measurements. *Results and conclusions.* It is shown that the error of the average integral measurements decreases with an increase in the regression index. The procedure for verifying the reliability of the obtained results of the assessment of the corresponding errors is determined.

Keywords: turbidity, error, measurements, methodological error, sedimentation

For citation: Ahmedova S.O., Jabbarli B.R. Investigation of the measurement error of the turbidity of the liquid arising from the deposition of particles. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):47–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-6

Введение

С увеличением населения планеты растет потребность в чистой воде, что в свою очередь выдвигает требование разработки более совершенных технологий очистки воды. Как отмечается в работах [1–3], в современном обществе проблема очистки использованных вод является одной из первоочередных задач, решение которой на терпит отлагательства.

Решение вышеуказанной задачи неразрывно связано с задачей оценки степени загрязненности воды, оценкой содержания в ней минеральных или органических веществ. Как отмечается в работе [4], минералы или органические вещества в воде могут содержаться в трех дисперсных состояниях:

- растворенные вещества,
- коллоидальная суспензия,
- взвешенная суспензия.

Весь технологический цикл очистки загрязненных вод неизбежным образом включает процедуру осаждения или седиментации указанных частиц [5]. Физически процесс осаждения может быть охарактеризован как удаление с воды частиц с более высокой плотностью, чем вода под воздействием гравитационных сил [6,7]. Если рассматривать некоторую колонну грязной воды, вследствие движения указанных частиц в направлении вниз концентрация этих веществ с приближением ко дну будет увеличиваться. Как результат, мутность воды в такой колонне будет увеличиваться с приближением ко дну колонны [8].

Для учета влияния оседания частиц на результат оценки мутности жидкости в настоящей работе предложены дифференциальный и среднеинтегральный методы измерений. Суть дифференциального метода заключается в проведении измерений в определенный короткий промежуток времени. Суть среднеинтегрального метода заключается в проведении интегральных измерений за время оседания частиц и дальнейшего усреднения за весь временной промежуток измерений.

Целью настоящего исследования является:

- исследование погрешности дифференциальных измерений мутности воды;
- исследование погрешности среднеинтегрального измерения мутности воды;
- определение порядка проверки достоверности полученных результатов измерений по предложенным методам.

Материалы и методы

В настоящее время широко применяется метод статической седиментации, который состоит из заполнения некоторой колонны грязной водой и наблюдения за процессом осаждения загрязняющих воду частиц [9–11]. Схематическое представление такой колонны приведено на рис. 1.



Рис. 1. Схематическое представление седиментационной колонны жидкости с указанием характерных зон [11]

Как видно из рис. 1, существует три зоны, которые формируются в процессе осаждения частиц: зона чистой воды, зона суспензии и зона концентрированной массы загрязнителя в направлении сверху вниз.

Основными физическими факторами, влияющими на процесс седиментации, являются плотность твердых частиц, форма и размеры этих частиц, температура и вязкость жидкости.

Как было показано в работе [11], мутность жидкости, содержащей CaCO_3 определенной концентрации и заполненной в колонну фиксированной высоты, изменяется по степенному закону

$$T_b = at^b, \quad (1)$$

где T_b – мутность, мг/мл; t – время, с; a, b – регрессионные постоянные.

Проанализируем погрешность дифференциального метода измерения мутности. С учетом выражения (1) имеем

$$\frac{dT_b}{dt} = abt^{(b-1)}. \quad (2)$$

Следовательно, заменив дифференциалы на приращения, запишем

$$\Delta T_b = abt^{(b-1)} \Delta t. \quad (3)$$

Относительную погрешность γ_g дифференциального метода измерения мутности определим как

$$\gamma_g = \frac{\Delta T_b}{T_b} = \frac{\Delta t}{t}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), относительная погрешность дифференциального метода обратно пропорциональна величине t . Таким образом, дифференциальные измерения целесообразно проводить при больших значениях t . Рассмотрим метод среднеинтегральных измерений мутности. С учетом (1) имеем

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} at^b dt = \frac{a}{t_0(b+1)} t_0^{b+1} = \frac{at_0^b}{b+1}. \quad (5)$$

Относительную погрешность интегрального метода вычислим как

$$\gamma_{ин} = \frac{1}{1+b}. \quad (6)$$

Сравним погрешности дифференциального и среднеинтегрального методов измерения. С учетом (4) и (6) условие преобладания дифференциальных измерений с позиции достижения высокой точности имеет вид

$$\frac{\Delta t}{t_0} < \frac{1}{1+b}. \quad (7)$$

Проанализируем взаимосвязь основных показателей вышеуказанных двух методов измерений при условии равенства относительных погрешностей. Логарифмируя выражение (1), получаем

$$\ln T_b = \ln a + b \ln t. \quad (8)$$

Из выражения (8) находим

$$b = \frac{\ln T_b - \ln a}{\ln t}. \quad (9)$$

С учетом уравнений (4) и (6) условие равенства относительных погрешностей имеет вид

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{1}{1+b}. \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$b = \frac{t_0}{\Delta t} - 1. \quad (11)$$

С учетом выражений (9) и (11) получаем

$$\frac{\ln T_b - \ln a}{\ln t_0} = \frac{t_0}{\Delta t} - 1. \quad (12)$$

Таким образом, контроль достоверности результатов проведенных дифференциальных и среднеинтегральных измерений может быть осуществлен по следующей методике:

- 1) определение мутности T_b ;
- 2) результаты дифференциальных и среднеинтегральных измерений могут быть сочтены верными при выполнении условия (12).

Результаты

Для вычисления численных значений вышеуказанных погрешностей воспользуемся некоторыми результатами экспериментального исследования динамики седиментации твердых частиц CaCO_3 , полученных в работе [11]. В этой работе была использована прозрачная колонна высотой 940 мм с вместимостью 1850 мл. В эту колонну была заполнена жидкость с определенной концентрацией CaCO_3 . Измерения мутности проводились на восьми высотных зонах: 1 – 940–840 мм; 2 – 840–740 мм; 3 – 740–640 мм; 4 – 640–540 мм; 5 – 540–440 мм; 6 – 440–340 мм; 7 – 340–240 мм; 8 – 240–140 мм.

В качестве примера на рис. 2 приведены графики уменьшения мутности в восьми высотных зонах в течение интервала (0–100 мин) при заполнении колонны жидкостью с концентрацией 2 % [11].

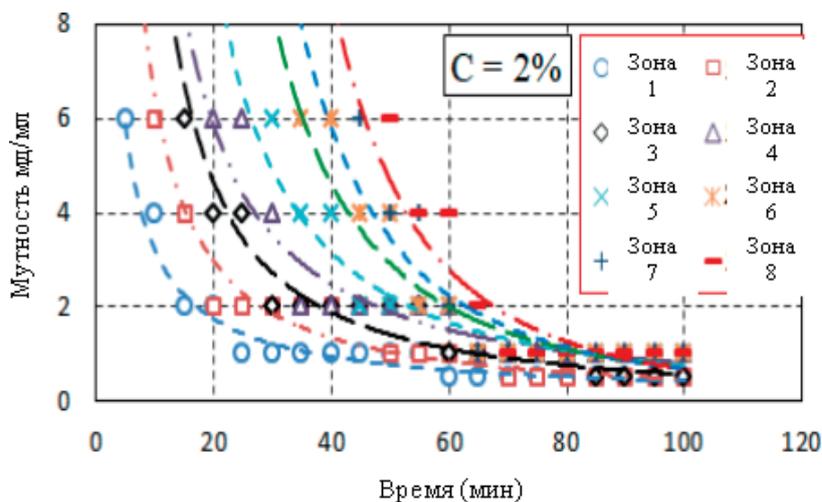


Рис. 2. Графики уменьшения мутности в восьми высотных зонах

Вычисленные значения относительных погрешностей a регрессионных показателей приведены на табл. 1.

Таблица 1

Зоны	Вычисленные показатели					
	a	b	t (мин)	$\gamma_{\text{инт}}$	$\gamma_{\text{г}}$	
$C_{2\%}$	1	24,008	0,875	85	0,5333	0,117
	2	87,203	1,13	80	0,4694	0,125
	3	222,82	1,294	77	0,4359	0,129
	4	226,24	1,223	74	0,4498	0,135
	5	979,49	1,556	67	0,3912	0,149
	6	8936	2,052	61	0,327	0,164
	7	31902	2,335	57	0,299	0,175
	8	234137	2,768	52	0,265	0,192

Обсуждение и заключение

Проведенный нами анализ известных экспериментальных результатов динамики временного изменения мутности воды из-за процесса оседания имеющихся в ней частиц показал, что процесс оседания приводит к разным результатам измерения мутности. Это в свою очередь приводит к методической неопределенности при интерпретации результатов измерений. Во избежание указанной неопределенности в данной статье были предложены два метода проведения измерения мутности воды. В первом методе рекомендуется измерения проводить на фиксированном коротком временном интервале. Оценена относительная погрешность дифференциального метода в сравнении с результатом, получаемым по базовой формуле. Показано, что указанная погрешность уменьшается с увеличением времени оседания частиц. Также исследована относительная погрешность второго предлагаемого среднеинтегрального метода измерения мутности. Согласно полученному результату указанная погрешность постоянна и определяется величиной регрессионного показателя. Разработана методика проверки достоверности полученных результатов по двум предложенным методам измерений.

Список литературы

1. Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G., Perrone D. Global groundwater sustainability, resources, and systems // *Anthropocene Ann. Rev. EarthPlanetary Sci.* 2020. Vol. 48. P. 431–463.
2. Jones E., Qadir M., Vliet M. T. H. [et al.]. The state of desalination and brine production // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 657.
3. Parkinson S. [et al.]. Balancing clean water-climate change mitigation trade-offs // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14.
4. Ciobanu M. G. *General chemistry. Vol. I.* Bucharest, RO : Performance publishing house, 2010.
5. Anjum M. N., Rasheed H. U., Ahmed W. Impact of waste water treatment on quality of influent & effluent water // *International journal of impotence research.* 2016. Vol. 2.
6. Von Sperling M. *Basic principles of wastewater treatment.* Brazil, Federal University of Minas Gerais, 2007.
7. Hasim A. M. H., El-Hafiz A. A., El Baz A. R., Farghaly S. M. Study the performance circular clarifier in existing potable water treatment plant by using computational fluid dynamics // *World water congress. Cancun, 2017.*
8. Gian J. Improving the testing of sedimentation processes development of a large column and observations of solid concentration using turbidity measurements // *Bachelor of engineering thesis. Queensland, Australia : The University of Queensland, 2016.*
9. Ipate G., Musuroi G., Constantin G. A. [et al.]. Experimental and numerical simulation research of sedimentation process in stationary column of aqueous suspension of solids // *Thermal Equipment. Renewable energy and rural development : web of conferences.* 2019. Vol. 112. P. 03028.
10. Safta V. V., Toma M. L., Ungureanu N. Experiments in the field of water treatment // *Durable Agriculture – Agriculture of the Future : Scientific International Conferences The 12th Annual Meeting.* Bucharest, RO : Printech publishing house, 2012.
11. Zabava B. S., Voice G., Tudor P. [et al.]. Variation of turbidity of liquid-solid mixtures in the wastewater settling process // *Earth observation & surveying, environmental engineering.* 2021. Vol X. URL: https://www.researchgate.net/publication/356388854_VARIATION_OF_TURBIDITY_OF_LIQUID-SOLID_MIXTURES_IN_THE_WASTEWATER_SETTLING_PROCESS

References

1. Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G., Perrone D. Global groundwater sustainability, resources, and systems. *Anthropocene Ann. Rev. EarthPlanetary Sci.* 2020;48:431–463.
2. Jones E., Qadir M., Vliet M.T.H. et al. The state of desalination and brine production. *Sci. Total Environ.* 2019;657.
3. Parkinson S. et al. Balancing clean water-climate change mitigation trade-offs. *Environ. Res. Lett.* 2019;14.
4. Ciobanu M.G. *General chemistry. Vol. I.* Bucharest, RO: Performance publishing house, 2010.
5. Anjum M.N., Rasheed H.U., Ahmed W. Impact of waste water treatment on quality of influent & effluent water. *International journal of impotence research.* 2016;2.
6. Von Sperling M. *Basic principles of wastewater treatment.* Brazil: Federal University of Minas Gerais, 2007.
7. Hasim A.M.H., El-Hafiz A.A., El Baz A.R., Farghaly S.M. Study the performance circular clarifier in existing potable water treatment plant by using computational fluid dynamics. *World water congress.* Cancun, 2017.

8. Gian J. Improving the testing of sedimentation processes development of a large column and observations of solid concentration using turbidity measurements. *Bachelor of engineering thesis*. Queensland, Australia: The University of Queensland, 2016.
9. Ipate G., Musuroi G., Constantin G.A. et al. Experimental and numerical simulation research of sedimentation process in stationary column of aqueous suspension of solids. *Thermal Equipment. Renewable energy and rural development: web of conferences*. 2019;112:03028.
10. Safta V.V., Toma M.L., Ungureanu N. Experiments in the field of water treatment. *Durable Agriculture – Agriculture of the Future: Scientific International Conferences The 12th Annual Meeting*. Bucharest, RO: Printech publishing house, 2012.
11. Zabava B.S., Voice G., Tudor P. et al. Variation of turbidity of liquid-solid mixtures in the wastewater settling process. *Earth observation & surveying, environmental engineering*. 2021;X. Available at: https://www.researchgate.net/publication/356388854_VARIATION_OF_TURBIDITY_OF_LIQUID-SOLID_MIXTURES_IN_THE_WASTEWATER_SETTLING_PROCESS

Информация об авторах / Information about the authors

Севда Омар гызы Ахмедова

старший преподаватель кафедры химии,
Азербайджанский государственный
экономический университет
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. Истиглалият, 6)
E-mail: Axmedovasevda111@gmail.com

Sevda O. Ahmedova

Senior lecturer of the sub-department of chemistry,
Azerbaijan State University of Economics
(6 Istiglaliyat street, Baku,
The Republic of Azerbaijan)

Бибиханым Раваят гызы Джаббарлы

докторант,
Азербайджанский технический университет
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
пр-кт Джавида, 25)
E-mail: Cabbarli.bibixanim@mail.ru

Bibikhanym R. Jabbarli

Doctoral student,
Azerbaijan Technical University
(25 Djavid avenue, Baku,
The Republic of Azerbaijan)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.01.2024

Принята к публикации / Accepted 16.02.2024

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

УДК 004.031

doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

Е. А. Алтай

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан
aeldos@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На точность и помехоустойчивость системы обработки электрокардиосигналов влияет множество факторов. Но значительное влияние при регистрации электрокардиосигналов оказывают узкополосная низкочастотная и широкополосная электрическая помехи. Эти помехи приводят к искажению информационных участков сигнала и снижению точности обработки сигнала. Для компенсации помех и повышения точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардиосигналов применяются методы фильтрации, где фильтры рассматриваются как элементы входа и выхода системы обработки кардиографической информации. Цель работы – анализ новых методов полиномиальной фильтрации зашумленных электрокардиосигналов, искаженных низкочастотной и высокочастотной аддитивными помехами, а также количественная оценка точности и помехоустойчивости системы обработки. *Материалы и методы.* Существующие методы фильтрации при влиянии электрической помехи, изменяющейся в широком диапазоне частоты электрокардиосигнала, не позволяют повысить помехоустойчивость и точность обработки. Получение новых методов фильтрации, более точных и устойчивых к помеховым воздействиям по сравнению с известными аналогами, позволит повысить результативность обработки электрокардиосигналов. *Результаты.* Представлены результаты реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помех применительно к задаче обработки электрокардиосигналов при помощи аппроксимирующих полиномиальных моделей. Выполнено компьютерное моделирование, иллюстрирующее идентичность отфильтрованной и исходной форм электрокардиосигнала при использовании процедуры двунаправленной обработки предложенными фильтрами в сравнении с известными фильтрами. Приводятся количественные оценки, полученные при использовании тестовых электрокардиосигналов и помех для оценки результативности обработки на выходе системы фильтрации. *Вывод.* Полученные результаты показали, что методы фильтрации, основанные на аппроксимирующих полиномах Ньютона, уменьшают значения ошибки фильтрации (повышают точность) и увеличивают значения отношения сигнал/помеха (повышает помехоустойчивость) системы обработки электрокардиосигнала при сравнении с известными фильтрами.

Ключевые слова: обработка электрокардиосигналов, фильтрация, помехи, полиномиальные цифровые фильтры, соотношения сигнал/помеха, двунаправленная фильтрация

Для цитирования: Алтай Е. А. Методы фильтрации для оценки точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардиосигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 53–64. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

NOISE-RESISTANCE AND ACCURACY ASSESSMENTS ECG SIGNAL PROCESSING SYSTEMS BASED ON FILTERING METHODS

Y.A. Altay

K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan
aeldos@inbox.ru

Abstract. *Background.* The accuracy and noise-resistance of an ECG signal processing system is influenced by many factors. But narrow-band low-frequency and broadband electrical interference have a significant impact when recording ECG signals. This interference leads to distortion of the information sections of the signal and a decrease in the accuracy of signal processing. To compensate for interference and increase the accuracy and noise-resistance of the ECG signal processing system, filtering methods are used, where filters are considered as input and output elements of the cardiographic data processing system. Aim of the research – analysis of new methods of polynomial filtering of noisy ECG signals distorted by low-frequency and high-frequency additive noise, as well as quantitative assessment of the accuracy and noise-resistance of the processing system. *Materials and methods.* Existing methods of filtering under the influence of electrical noise that varies over a wide frequency range of the ECG signal do not allow increasing noise-resistance and accuracy processing systems. Obtaining new filtering methods that are more accurate and resistant to interference compared to known analogues will improve the efficiency of ECG signal processing. *Results.* The results of the implementation of methods of polynomial digital filtering of low-frequency and high-frequency interference are presented in relation to the problem of processing ECG signals using approximating polynomial models. A computer simulation was performed to illustrate the identity of the filtered and original ECG signal forms when using the bidirectional processing procedure with the proposed filters in comparison with known filters. Quantitative estimates obtained by using test ECG signals and interference to assess the effectiveness of processing at the output of the filtering system is presented. *Conclusion.* The results obtained showed that filtering methods based on approximating Newton polynomials reduce the filtering error values (increase accuracy) and increase the signal-to-noise ratio (increases noise-resistance) of the ECG signal processing system when compared with known filters.

Keywords: ECG signal processing, filtering, interference, polynomial digital filters, signal-to-noise ratio, bi-directional filtering

For citation: Altay Y.A. Noise-resistance and accuracy assessments ecg signal processing systems based on filtering methods. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):53–64. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

Введение

Для решения задачи обработки электрокардиосигналов (ЭКС) широкое распространение получили системы фильтрации, основанные на методах полиномиальной цифровой фильтрации [1–9]. Актуальность применения полиномиальных методов фильтрации заключается в том, что такие фильтры во многом позволяют настраивать свои параметры к параметрам обрабатываемых ЭКС для выделения информационно и диагностически значимых параметров сигнала из аддитивной смеси низкочастотной и высокочастотной помех.

Низкочастотная и высокочастотная помехи относятся к основным факторам, снижающим точности и помехоустойчивости системы цифровой обработки ЭКС. Низкочастотная помеха (дрейф изолиний) возникает при плохом контакте электродов с биообъектом (человеком) во время дыхания человека и т.д. [5–7, 10]. Составляющие низкочастотной помехи расположены в диапазоне частоты не более чем 0,3 Гц [5, 7]. Высокочастотная помеха – узкополосная электрическая помеха, которая формируется от подключенных в сеть внешних электрических приборов и т.д. [5–7, 10]. Касательно электрической помехи в работах [8, 11] показано, что помимо влияния узкополосной электрической помехи (50 Гц) на информационно и диагностически значимые параметры ЭКС также могут влиять электрические помехи, изменяющиеся в широком диапазоне частоты сигнала (от 44 до 56 Гц). Влияние такой электрической помехи может быть эффектом, вызванным интерференцией электрической помехи 50 Гц, возникающей во время регистрации сигнала с помощью портативных систем и ноутбуков. Присутствие перечисленных помех приводит к искажению амплитудных и временных параметров сигнала [1–11] и,

следовательно, к снижению достоверности получаемых результатов анализа variability сердечного ритма [12–14].

Для компенсации влияния перечисленных классов помех необходима разработка и применение методов цифровой фильтрации, обеспечивающих устойчивость к помеховым воздействиям. В связи с этим в рамках данной статьи рассматривается реализация методов полиномиальной цифровой фильтрации на основе фильтра верхних частот (ФВЧ) и режекторного (РЖ) фильтра для ослабления влияния низкочастотной и высокочастотной помехи.

Анализ последних работ [1–11] выявил, что среди полиномиальных методов фильтрации для компенсации влияния низкочастотной и высокочастотной помехи применяют фильтры Баттерворта и реже полиномы Чебышева и Кауэра. Это обусловлено тем, что фильтры Чебышева и Кауэра как в полосе пропускания сигнала, так и в полосе подавления помех порождают заметные пульсации, которые при фильтрации вносят искажения на параметры сигнала [1–5, 7]. Из-за этой особенности фильтры Баттерворта являются рекомендуемыми для обработки ЭКС.

Несмотря на широкое использование фильтров Баттерворта, в работах [8, 9, 11, 15] на основе полиномиальных моделей разработаны ФВЧ и каскадный РЖ фильтр, отличающиеся высокой результативностью подавления низкочастотных и высокочастотных помех данного сигнала за счет введения аппроксимирующих полиномов Ньютона и обеспечивающие повышение результативности обработки ЭКС при минимальных искажениях параметров сигнала. В работах [8, 9, 11, 15] анализ эффективности предложенных методов цифровой полиномиальной фильтрации проведен на основе использования натуральных ЭКС с помощью портативного регистратора экспертного уровня (12-канального Холтер-монитор «КАРДИОТЕХНИКА-07-3/12» фирмы ИНКАРТ в Национальном медицинском исследовательском центре имени В. А. Алмазова, г. Санкт-Петербург).

Актуальность применения полинома Ньютона для синтеза и аппроксимации передаточной функции ФВЧ и РЖФ заключается в том, что в современной теории полиномиальной фильтрации ЭКС применение данного полинома является менее проработанным и освященным в научной литературе по рассматриваемой тематике. Необходимо подчеркнуть, что полиномы Ньютона являются объектами теории системы автоматического управления и применяются достаточно широко для решения задачи синтеза наблюдателей в силу того, что демонстрирует наилучшие результаты при решении задачи систем автоматического управления пьезоприводом [16].

Однако, несмотря на вышесказанное, в настоящее время вопросы количественной оценки точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардосигнала, исследованных и разработанных в научных работах [8, 9, 11, 15], методов фильтрации для незашумленных (чистых) ЭКС и помех недостаточно освящены в научной литературе. При этом следует также отметить, что применение незашумленных ЭКС дает значимое преимущество, заключающееся в возможности синтезировать помехи и формировать их аддитивные модели для получения расчетно-теоретических результатов обработки при оценке точности помехоустойчивости системы фильтрации.

Таким образом, в рассматриваемой статье представлены результаты реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помехи ЭКС на основе ФВЧ и РЖФ. Исследуется ФВЧ и РЖФ на основе аппроксимирующего полинома Ньютона и проведена количественная сравнительная оценка результативности обработки с хорошо зарекомендовавшими себя фильтрами Баттерворта для рассматриваемого вида полиномиальных цифровых фильтров.

Постановка задачи исследования

Рассматривается задача обработки ЭКС вида

$$x(q) = s(q) + \xi(q), \quad (1)$$

где q – отсчеты измерений ЭКС; $x(q)$ – зашумленный ЭКС; $s(q)$ – незашумленный сигнал; $\xi(q)$ – помехи. Для формирования аддитивной смеси сигнала и помех (1) рассматривается модель дрейфа изолиний $\xi_{\text{ди}}$ вида

$$\xi_{\text{ди}}(q) = A \sin\left(2\pi \frac{f_{\xi}}{f_{\text{д}}} k + \phi\right), \quad (2)$$

где A – амплитуда помехи; f_{ξ} – частота помехи; f_d – частота дискретизации электрической помехи; k – порядковый номер отсчетов помехи; ϕ – начальная фаза. Аналогично модели (2) рассматривается модель широкополосной электрической помехи $\xi_{\text{эл}}$ вида

$$\xi_{\text{эл}}(q) = \sum_{i=1}^m A_i \sin\left(2\pi \frac{f_i}{f_d} k + \phi_i\right), \quad (3)$$

где m – число гармоник помехи; A_i – амплитуда i -й гармоники помехи; f_i – частота помехи; f_d – частота дискретизации помехи; k – порядковый номер отсчетов помехи; ϕ_i – начальная фаза сигнала i -й гармоники помехи.

В качестве низкочастотной помехи рассматривается помеха дрейфа изолиний (2) с несущей частотой $f_{\xi} = 0,3$ Гц [5, 7], а в качестве высокочастотной помехи рассматривается электрическая помеха (3), изменяющаяся в широком диапазоне частоты от 44 до 56 Гц [8, 9, 11] при частоте дискретизации сигнала 250 Гц [17, 18].

Сформулируем цель полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помехи как решение задачи обработки ЭКС для компенсации влияния дрейфа изолиний и широкополосной электрической помехи на параметры сигнала.

Ставится задача выделения информационного сигнала $s(q)$ из аддитивной смеси $x(q)$, регистрируемого дискретными отсчетами q путем полиномиальной цифровой высокочастотной и режекторной фильтрации.

Данная задача решена при допущении, что амплитуда искажающих помех ЭКС вида (2) и (3) известна, что является типовым допущением при решении задачи обработки сигнала для представления результатов фильтрации.

Материал и метод исследования

Материал исследования. Исходным материалом исследований служат тестовые электрокардиосигналы и помехи, допущенные и описанные модели в разделе «Постановка задачи». Для формирования зашумленного сигнала тестовые сигналы получены из верифицированной международной базы Массачусетского института технологий (MIT). Выбор ЭКС из данной базы обосновывался тем, что на сегодняшний день она является верифицированной базой биосигналов для тестирования и оценки точности и помехоустойчивости методов обработки сигнала, а также для получения расчетных результатов обработки при вычислительном эксперименте [5, 6, 21].

Оценка точности и помехоустойчивости системы обработки ЭКС при реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации проводилась двумя способами: качественными и количественными. Качественные результаты демонстрировались визуально, т.е. результаты фильтрации сравнивались с исходными отфильтрованными сигналами. Количественные результаты демонстрируются числовыми значениями и позволяют оценить данные о вносимых искажающих воздействиях при фильтрации и компенсации помех, влияющих на сигнал ЭКС.

Количественная оценка точности и помехоустойчивости обработки ЭКС при реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации проведена на основе следующих показателей: отношения сигнал/помеха (SNR) до и после обработки сигнала (4) [21]:

$$SNR_{\text{до}}^{\text{фильтрации}} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{q=1}^N s(q)^2}{\sum_{q=1}^N (x(q) - s(q))^2} \right], \quad SNR_{\text{после}}^{\text{фильтрации}} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{q=1}^N s(q)^2}{\sum_{q=1}^N (s'(q) - s(q))^2} \right], \quad (4)$$

где $s(q)$ – исходный ЭКС; $x(q)$ – зашумленный ЭКС; $s'(q)$ – обработанный ЭКС.

Среднеквадратичная ошибка фильтрации сигнала до обработки ($MSE_{\text{до}}$) между зашумленным и не зашумленным сигналом, а также после обработки ($MSE_{\text{после}}$) между исходным (не зашумленным) и отфильтрованным сигналом (5) [21]:

$$MSE_{\text{до фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (x(q) - s(q))^2, \quad MSE_{\text{после фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (s(q) - s'(q))^2, \quad (5)$$

Вычисление вышеперечисленных количественных показателей в общей совокупности позволяет одновременно оценить помехоустойчивость, точность обработки сигнала ЭКС при реализации методов фильтрации.

Метод исследования. Синтез полиномиальных методов фильтрации ЭКС осуществлен с помощью передаточной функции нормированного фильтра-аналога нижних частот, т.е. фильтра с частотой среза $\omega = 1$ рад/с. Передаточная функция такого фильтра-аналога определяется следующим образом [19, 20]:

$$W_{\text{норм}}(s) = \frac{\omega_c^n}{A(s)} = \frac{1}{A(s)}, \quad (6)$$

где s – комплексная переменная; ω_c – частота среза; n – порядок фильтра; $A(s)$ – аналитическое выражение полинома для аппроксимации передаточной функции фильтров.

Передаточная функция непрерывного ФВЧ и каскада РЖФ с частотой среза ω_c и шириной полосы подавления помехи B находится из передаточной функции ФНЧ нормированного вида (6)

путем замены оператора s оператором для верхних частот $\frac{\omega_c}{s}$ и $\frac{Bs}{s^2 + \omega_c^2}$ для режекторного

фильтра [19]. При синтезе фильтров для уменьшения вносимого искажающего воздействия фильтрами высоких порядков на параметры обрабатываемых сигналов и упрощения громоздкости вычислений выбраны полиномы второго ($n = 2$) и четвертого ($n = 4$) порядка. Для компенсации влияния помехи широкополосным РЖФ фильтром, характеризующимся низкой добротностью, предложено использовать каскад фильтров. Синтез каскада фильтров Ньютона и Баттерворта осуществлен последовательным соединением фильтрующих звеньев $n = 2$ и $n = 4$, а расчет общей передаточной функции – произведением двух этих звеньев. Передаточные функции синтезированных полиномиальных фильтров Ньютона и Баттерворта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Передаточные функции фильтров

Фильтр	Преобразование	Передаточная функция фильтров $W(s)$	
ФВЧ	$s \rightarrow \frac{\omega_c}{s}$	Ньютон, $n = 2$	$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2}$
		Баттерворт, $n = 2$	$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 1,414\omega_c s + \omega_c^2}$
РЖФ	$s \rightarrow \frac{Bs}{s^2 + \omega_c^2}$	Ньютон, $n = 2$	$\frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Bs + \omega_c^2}$
		Ньютон, $n = 4$	$\frac{s^4 + 2\omega_c^2 s^2 + \omega_c^4}{s^4 + 2Bs^3 + (B^2 + 2\omega_c^2)s^2 + 2B\omega_c^2 s + \omega_c^4}$
		Баттерворт, $n = 2$	$\frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Bs + \omega_c^2}$
		Баттерворт, $n = 4$	$\frac{s^4 + 2\omega_c^2 s^2 + \omega_c^4}{s^4 + 1,414Bs^3 + (B^2 + 2\omega_c^2)s^2 + 1,414B\omega_c^2 s + \omega_c^4}$

Преобразование параметров фильтра-аналога сопровождается удвоением порядка непрерывной передаточной функции РЖФ, а полиномы первого порядка Ньютона и Баттерворта совпадают между собой [8]. В результате непрерывные передаточные функции РЖФ Ньютона и Баттерворта для $n = 2$ аналогичны друг другу.

Расчет общей передаточной функции двух последовательно соединенных широкополосных РЖФ Ньютона приводит к выражению

$$W_{\text{общРЖФ_Ньютон}}(s) = \frac{s^6 + 3\omega_c^2 s^4 + 3\omega_c^4 s^2 + \omega_c^6}{s^6 + 3Bs^5 + 3(\omega_c^2 + B^2)s^4 + (6B\omega_c^2 + B^3)s^3 + 3(B^2\omega_c^2 + \omega_c^4)s^2 + 3B\omega_c^4 s + \omega_c^6}. \quad (7)$$

Общая передаточная функция широкополосного каскада фильтров Баттерворта будет иметь вид

$$W_{\text{общРЖФ_Бат.}}(s) = s^6 + 3\omega_c^2 s^4 + 3\omega_c^4 s^2 + \omega_c^6 \times \frac{1}{s^6 + 2,414Bs^5 + (3\omega_c^2 + 2,414B^2)s^4 + (4,828B\omega_c^2 + B^3)s^3 + (2,414B^2\omega_c^2 + 3\omega_c^4)s^2 + 2,414B\omega_c^4 s + \omega_c^6}. \quad (8)$$

Настройка параметров ФВЧ и РЖФ осуществлена нормировкой и трансформацией частоты среза помехи фильтра как [15]

$$\begin{cases} \omega_c = \left(\frac{f_{c1,2}}{f_d} \right) 2\pi, \Omega_{c1,2} = \left(\frac{2}{T} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_{c1,2}}{2} \right), \\ \Omega_c = \sqrt{\Omega_{c1} \Omega_{c2}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\omega_{c1,2}$, $\Omega_{c1,2}$ – нижняя и верхняя границы частоты среза для настройки фильтров; Ω_c – центральная частота среза. Настройка параметров фильтра вида (9) позволяет сохранить непрерывную частоту сигнала при цифровой обработке измерительных сигналов [15, 20].

Частота среза ФВЧ выбирается исходя из результатов [15, 21], где методом частотной селекции установлен оптимальный порог в 1 Гц для фильтрации дрейфа при минимальных искажениях информационных составляющих ЭКС. На основе значений частоты среза 1 Гц ФВЧ и частоты дискретизации 250 Гц [15, 17, 18] рассчитаны непрерывные передаточные функции ФВЧ и РЖФ. Затем с помощью билинейного преобразования непрерывные передаточные функции ФВЧ и РЖФ преобразованы в дискретную передаточную функцию для цифровой обработки сигнала. Данное преобразование реализовано с помощью программы MATLAB на основе

функции `bilinear()`, как $s = \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)$ при $T = 1$ с.

Согласно опубликованным работам [8, 9, 11, 15] синтезированные ФВЧ и РЖФ на основе аппроксимирующего полинома Ньютона так же, как и фильтры класса бесконечно-импульсной характеристики, обладают нелинейной фазовой характеристикой. Данную особенность крайне необходимо учитывать при фильтрации ЭКС. Нелинейность фазовой характеристики синтезированных полиномиальных фильтров могут исказить амплитудные и временные параметры сигнала (например, появление фазовых искажений).

Способом устранения (или компенсации) фазовых искажений, вносимых системой фильтрации, является двунаправленная фильтрация [8, 9, 11, 15]. В отличие от однонаправленной (обычной) фильтрации сигнала в виде «вход–выход», под двунаправленной фильтрацией понимается обработка сигнала «в обе стороны». При такой обработке сигнал фильтруется в прямом направлении, затем в обратном направлении. В результате возникающие фазовые сдвиги компенсируются. Структурная схема двунаправленной реализации ФВЧ и широкополосных РЖФ Ньютона и Баттерворта, а также их свертка в частотной области для фильтрации ЭКС представлены в работах [9, 11].

Результаты исследований

Получены результаты синтеза полиномиальных фильтров на основе аппроксимирующих полиномов Ньютона для решения задачи цифровой фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех ЭКС.

Для фильтрации низкочастотной помехи исходный ЭКС был зашумлен сигналом с частотой помехи дрейфа изолиний. На рис. 1 представлены результаты зашумления исходного сигнала с моделью помехи (2) и его фильтрации.

Анализ полученных результатов позволяет выдвинуть утверждение о том, что синтезированные ФВЧ с применением полиномов Ньютона и Баттерворта, настроенные на частоту среза помехи 1 Гц, позволяют отфильтровать низкочастотную помеху ЭКС (рис. 1,а). Из-за наличия переходного процесса в самих фильтрах при обработке ЭКС искажается участок первого кардиоцикла сигнала ЭКС (рис. 1,б,в). При использовании ФВЧ Ньютона данное искажение

меньше, чем для фильтра Баттерворта. Разработанный фильтр позволяет компенсировать влияние низкочастотной составляющей дрейфа изолиний при минимальных искажениях участков сигнала. При визуальной оценке результата обработки также можно заметить, что результаты двунаправленной фильтрации обеспечивают сходство отфильтрованной формы ЭКС с исходной формой сигнала (черная и красная линия на рис. 1,б), т.е. двунаправленная обработка позволяет точнее отфильтровать низкочастотную помеху и устранить вносимые фильтрами искажения.

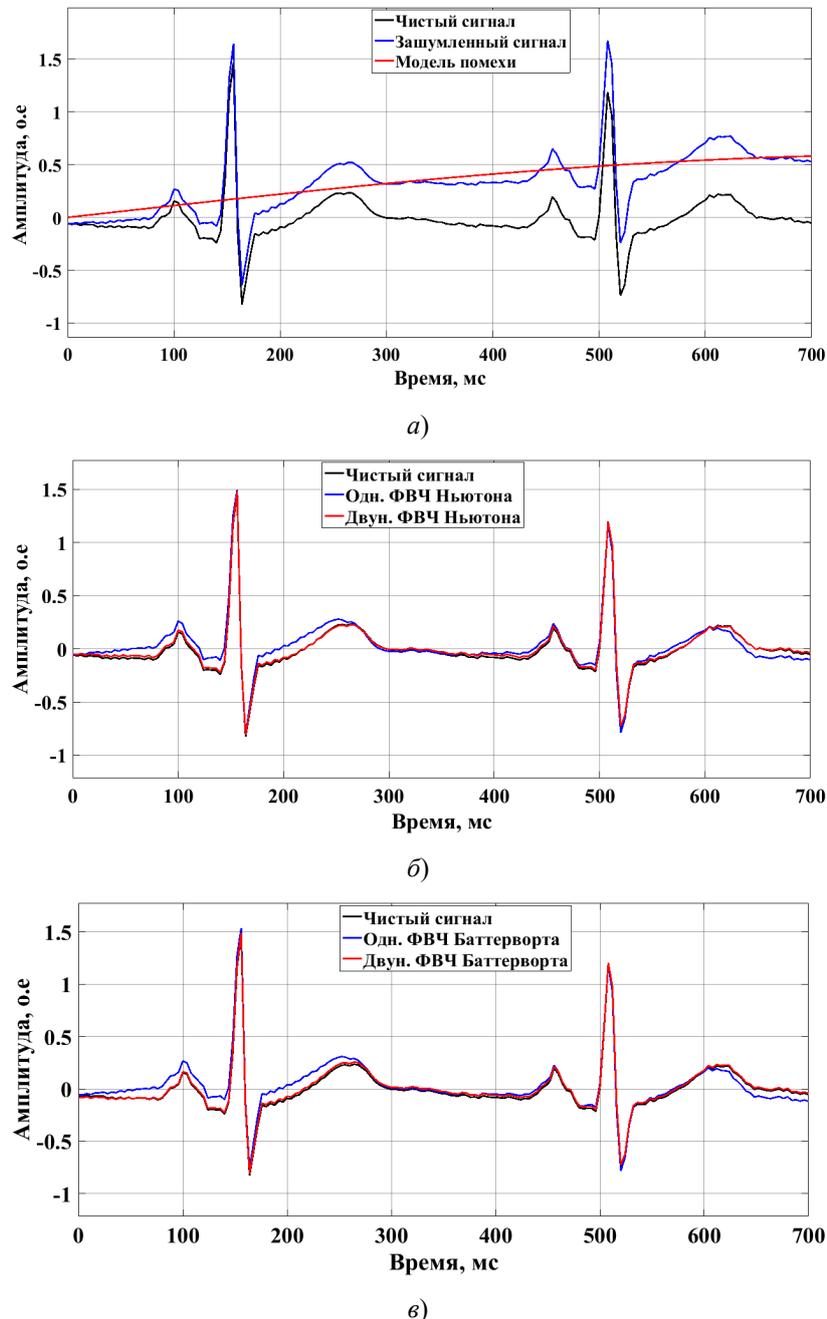
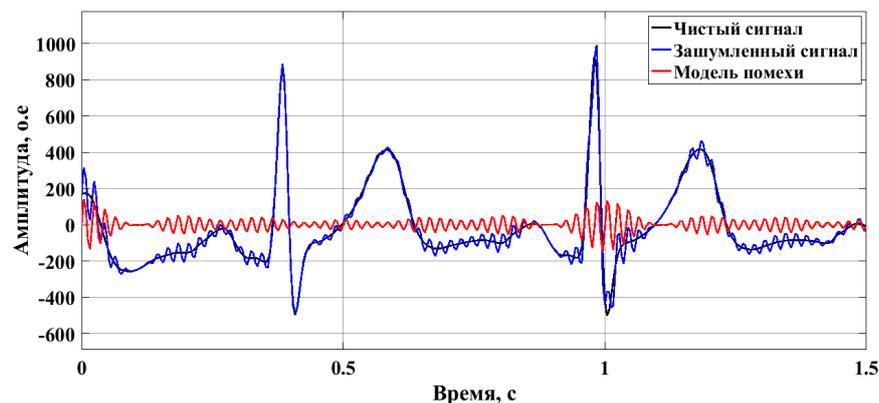


Рис. 1. Результаты однонаправленной и двунаправленной обработки зашумленного ЭКС: а – зашумление ЭКС (из базы MIT); б – ФВЧ Ньютона; в – ФВЧ Баттерворта

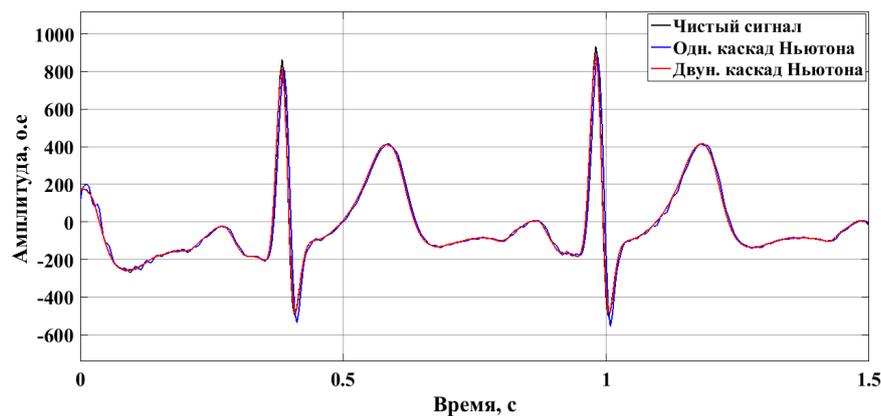
Для фильтрации высокочастотной помехи исходный ЭКС был зашумлен сигналом с частотой электрической помехи. На рис. 2 представлены результаты зашумления исходного электрокардиосигнала с моделью помехи (3) и его фильтрации.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что синтезированный полиномиальный каскад широкополосных РЖФ с применением полиномов Ньютона и Баттерворта, настроенных на частоту среза помехи от 44 до 56 Гц, позволяет отфильтровать электрическую

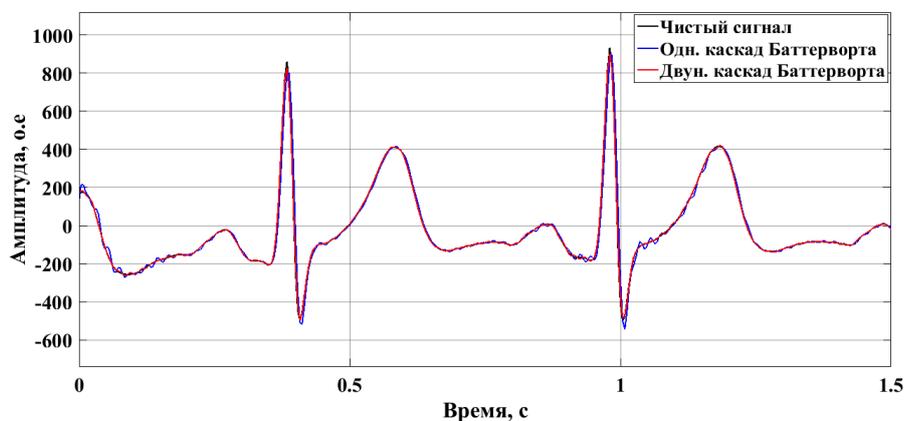
помеху ЭКС (рис. 2,*а*). Анализ обработки также показал, что из-за особенностей самих синтезированных РЖФ и нелинейности их фазовой характеристики в каждом кардиоцикле сигнала наблюдаются искажения в виде низкоамплитудных затухающих колебаний. Это связано с тем, что из-за наличия в числителе передаточной функции РЖФ, составляющей $s^2 + \omega^2$ [22], режекторные фильтры вносят характерные собственные искажения в сигналы при фильтрации в виде низкоамплитудных затухающих колебаний [22]. Однако из рис. 2,*б* можно заметить, что для разработанного каскада данное искажение меньше, чем для каскада фильтров с полиномом Баттерворта.



а)



б)



в)

Рис. 2. Результаты однонаправленной и двунаправленной обработки зашумленного ЭКС:
а – зашумление ЭКС (из базы МИТ); б – РЖФ Ньютона; в – РЖФ Баттерворта

Компенсация низкоамплитудных затухающих колебаний, вносимых каскадом РЖФ, в частности в каждом кардиоцикле сигнала, минимизирована при двунаправленной фильтрации

(черная и красная линия на рис. 2,б,в). При визуальной оценке результата обработки также можно заметить, что результаты двунаправленной фильтрации подтверждают сходство отфильтрованной формы ЭКС с исходной формой сигнала.

Результаты полиномиальной цифровой фильтрации ЭКС показали, что разработанные алгоритмы обработки позволяют компенсировать влияние низкочастотной помехи дрейфа изолиний и высокочастотной электрической помехи.

В табл. 2 представлена сравнительная количественная оценка точности и помехоустойчивости обработки ЭКС при двух режимах системы обработки: однонаправленная и двунаправленная фильтрация помехи. Для развернутой оценки различия количественных показателей при двух режимах фильтрации все числовые значения рассчитанных показателей представлены с точностью до третьего знака после запятой.

Таблица 2

Результаты оценки точности и помехоустойчивости методов фильтрации

Фильтры	Показатели			
	$SNR_{до}$, дБ	$SNR_{после}$, дБ	$MSE_{до}$, усл. ед.	$MSE_{после}$, усл. ед.
Разработанный ФВЧ (однаправл. реализация)	0,105	14,056	0,237	0,013
ФВЧ Баттерворта (однаправл. реализация)		13,562		0,022
Разработанный ФВЧ (двунаправл. реализация)		17,255		0,0063
ФВЧ Баттерворта (двунаправл. реализация)		16,839		0,0071
Разработанный каскад (однаправл. реализация)	0,327	16,076	1,128	0,389
Каскад Баттерворта (однаправл. реализация)		11,425		0,446
Разработанный каскад (двунаправл. реализация)		17,922		0,044
Каскад Баттерворта (двунаправл. реализация)		14,288		0,101

Вычисленные количественные оценки обработки показывают, что значения ошибки (MSE) на выходе фильтров на основе полиномов Ньютона (при однонаправленной и двунаправленной фильтрации) уменьшаются, при этом показатель отношения сигнал/помеха (SNR) повышается. Отметим, что из наименьшего значения MSE относительно к исходному значению данного показателя следует минимальность искажения параметров сигнала во время фильтрации, и это способствует повышению результативности обработки по точности и помехоустойчивости при выделении информативных составляющих из аддитивной смеси ЭКС и помехи. Высокие значения показателя SNR относительно его исходного значения демонстрирует помехоустойчивость методов, т.е. устойчивость фильтров к помеховым воздействиям при сравнении с фильтрами Баттерворта.

Ранее повышение результативности обработки ЭКС при реализации полиномиального цифрового фильтра Ньютона впервые было выявлено в работах [9, 11, 15] только при обработке натуральных (экспериментальных) записей сигнала 12-канального Холтер-монитора, что также не противоречит расчетно-теоретическому результату, полученному в рассматриваемой статье.

Необходимо подчеркнуть, что на повышение результативности обработки ЭКС в значительной степени оказывают влияние наделяемые свойства фильтров Ньютона, а именно его прямые и косвенные показатели качества, к которым, как правило, относятся [23]: время переходного процесса, переуправление и корневые локусы и далее. Так, фильтры с полиномами Ньютона в отличие от фильтров Баттерворта менее наделяют переуправление в переходных характеристиках системы фильтрации ЭКС за счет наличия корневых локусов на мнимой оси комплексной плоскости.

Научная новизна рассматриваемой работы заключается в том, что при реализации цифрового фильтра аппроксимирующим полиномом Ньютона впервые выявлено повышение избирательности системы обработки ЭКС по точности и помехоустойчивости. Ранее исследование для обоснования выбора и разработки системы обработки ЭКС на основе данной полиномиальной модели не рассматривалось.

Заключение

Разработаны новые методы фильтрации ЭКС при наличии помех. Методы фильтрации основаны на аппроксимации характеристик фильтров при помощи полиномов Ньютона. Представлены результаты расчета передаточной функции ФВЧ и каскада РЖФ для однонаправленной и двунаправленной фильтрации ЭКС. Результаты фильтрации подтверждает сходство отфильтрованной формы сигнала с исходной формой. Это достигается за счет использования двунаправленной обработки для компенсации фазовых сдвигов и минимизации низкоамплитудных затухающих колебаний, вносимых фильтрами. Результаты количественных оценок показали минимизацию ошибки фильтрации для фильтра верхних частот 0,0063 усл. ед. и режекторного фильтра 0,044 усл. ед., а также максимизацию отношения сигнал/помеха для фильтра верхних частот 17 дБ и режекторного фильтра 18 дБ соответственно, что способствует повышению результативности обработки сигнала ЭКС.

Список литературы

1. Bui N. T. Real-Time Filtering and ECG Signal Processing Based on Dual-Core Digital Signal Controller System // *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 12. P. 6492–6503.
2. Malghan P. G., Hota M. K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis // *Research on Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 2. P. 171–182.
3. Ozkan H. A Portable Wearable Tele-ECG Monitoring System // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 1. P. 173–182.
4. Li J., Deng G., Wei W., Wang H. Design of a real-time ECG filter for portable mobile medical systems // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 696–704.
5. Rangayyan R. M. *Biomedical signal analysis*. John Wiley & Sons, 2015. 707 p.
6. Немирко А. П., Манило Л. А., Калиниченко А. Н. Математический анализ биомедицинских сигналов и данных. М. : Физматлит, 2017. 242 с.
7. Fedotov A. A. Selection of Parameters of Bandpass Filtering of the ECG Signal for Heart Rhythm Monitoring Systems // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 2. P. 114–118.
8. Altay Y. A., Kremlev A. S., Zimenko K. A. A new ECG signal processing method based on wide-band notch filter // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. P. 1464–1469.
9. Altay Y. A., Kremlev A. S. Polynomial filtering of low- and high- frequency noise for improving the accuracy of ECG signal processing: new data // *Cardiometry*. 2020. Vol. 16. P. 85–96.
10. Altay Y. A., Kremlev A. S. Analysis and systematization of noise arising by long-term recording of ECG signal // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018. P. 1053–1057.
11. Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // *Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление*. 2020. № 2. P. 18–28.
12. Лямин А. В., Разыграева В. А., Скшидлевский А. А. Модель формирования обучающего воздействия на основе анализа функционального состояния студента // *Открытое и дистанционное образование*. 2011. № 2. С. 12–18.
13. Lisitsyna L., Lyamin A., Skshidlevsky A. Estimation of Student Functional State in Learning Management System by Heart Rate Variability Method // *Smart digital futures*. 2014. Vol. 262. P. 726–731.
14. Berdnikova E. A., Lyamin A. V., Skshidlevsky A. A. Analysis of Heart Rate Monitors for Evaluating Student's Mental Working Capacity // *Lecture Notes in Computer Science*. 2016. Vol. 9584. P. 13–22.
15. Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка взаимосвязи низкочастотных помех при многоканальной регистрации электрокардиосигнала // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. № 7. С. 626–633.
16. Быстров С. В., Вундер Н. А., Ушаков А. В. Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезоприводом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. № 3. С. 451–459.
17. Калиниченко А. Н., Юрьева О. Д. Влияние частоты дискретизации ЭКГ на точность вычисления спектральных параметров variability сердечного ритма // *Информационно-управляющие системы*. 2008. № 2. С. 46–49.
18. Kwon O., Jeong J. Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis // *Healthcare informatics research*. 2018. Vol. 3. P. 198–206.
19. Paarman L. D. *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*. New York : Kluwer academic publishers, 2003. P. 625.
20. Лайонс Р. *Цифровая обработка сигналов*. М. : Бином, 2006. 655 с.

21. Алтай Е. А., Кремлев А. С., Зименко К. А., Маргун А. А. Влияние параметров фильтра на точность измерения электрокардиографического сигнала // Медицинская техника. 2019. № 3. С. 19–22.
22. Ellis G. Filters in control systems // Control system design guide. 2012. Vol. 9. P. 165–183.
23. Altay Y. A., Lyamin A. V., Skakov D. M., Kelemseit N. E. Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response // V IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS). 2023. P. 217–220.

References

1. Bui N.T. Real-Time Filtering and ECG Signal Processing Based on Dual-Core Digital Signal Controller System. *IEEE Sensors Journal*. 2020;12:6492–6503.
2. Malghan P.G., Hota M.K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis. *Research on Biomedical Engineering*. 2020;2:171–182.
3. Ozkan H.A. Portable Wearable Tele-ECG Monitoring System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019;1:173–182.
4. Li J., Deng G., Wei W., Wang H. Design of a real-time ECG filter for portable mobile medical systems. *IEEE Access*. 2017;5:696–704.
5. Rangayyan R.M. *Biomedical signal analysis*. John Wiley & Sons, 2015:707.
6. Nemirko A.P., Manilo L.A., Kalinichenko A.N. *Matematicheskiy analiz biomeditsinskikh signalov i dannykh = Mathematical analysis of biomedical signals and data*. Moscow: Fizmatlit, 2017:242. (In Russ.)
7. Fedotov A.A. Selection of Parameters of Bandpass Filtering of the ECG Signal for Heart Rhythm Monitoring Systems. *Biomedical Engineering*. 2016;2:114–118.
8. Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A. A new ECG signal processing method based on wide-band notch filter. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2020:1464–1469.
9. Altay Y.A., Kremlev A.S. Polynomial filtering of low- and high- frequency noise for improving the accuracy of ECG signal processing: new data. *Cardiometry*. 2020;16:85–96.
10. Altay Y.A., Kremlev A.S. Analysis and systematization of noise arising by long-term recording of ECG signal. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018:1053–1057.
11. Altay E.A., Kremlev A.S. Evaluation of the accuracy of electrocardiosignal processing by cascade broadband notch filtration method. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2020;(2):18–28. (In Russ.)
12. Lyamin A.V., Razygraeva V.A., Skshidlevskiy A.A. A model for the formation of educational impact based on the analysis of the student's functional state. *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie = Open and distance education*. 2011;(2):12–18. (In Russ.)
13. Lisitsyna L., Lyamin A., Skshidlevskiy A. Estimation of Student Functional State in Learning Management System by Heart Rate Variability Method. *Smart digital futures*. 2014;262:726–731.
14. Berdnikova E.A., Lyamin A.V., Skshidlevskiy A.A. Analysis of Heart Rate Monitors for Evaluating Student's Mental Working Capacity. *Lecture Notes in Computer Science*. 2016;9584:13–22.
15. Altay E.A., Kremlev A.S. Evaluation of the relationship of low-frequency interference in multichannel recording of an electrocardiosignal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2020;(7):626–633. (In Russ.)
16. Bystrov S.V., Vunder N.A., Ushakov A.V. Solving the problem of signal uncertainty in the analytical design of a sequential compensator in the piezo drive control problem. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016;(3):451–459. (In Russ.)
17. Kalinichenko A.N., Yur'eva O.D. The influence of the ECG sampling rate on the accuracy of calculating the spectral parameters of heart rate variability. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*. 2008;(2):46–49. (In Russ.)
18. Kwon O., Jeong J. Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis. *Healthcare informatics research*. 2018;3:198–206.
19. Paarman L.D. *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*. New York: Kluwer academic publishers, 2003:625.
20. Layons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. Moscow: Binom, 2006:655. (In Russ.)
21. Altay E.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A., Margun A.A. Influence of filter parameters on the accuracy of electrocardiographic signal measurement. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2019;(3):19–22. (In Russ.)
22. Ellis G. Filters in control systems. *Control system design guide*. 2012;9:165–183.
23. Altay Y.A., Lyamin A.V., Skakov D.M., Kelemseit N.E. Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response. *V IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. 2023:217–220.

*Информация об авторах / Information about the authors***Ельдос Алтайұлы Алтай**

доктор Ph.D., кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры робототехники
и технических средств автоматизации,
Институт автоматизации
и информационных технологий,
Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева
(Республика Казахстан, г. Алматы,
ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: aeldos@inbox.ru

Yeldos A. Altay

Doctor Ph.D., candidate of technical science,
senior lecturer of the sub-department
of robotics and automation equipment,
Institute of Automation
and Information Technologies,
K.I. Satbayev Kazakh National
Research Technical University
(22a Satbaev street, Almaty, Republic of Kazakhstan)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 22.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024

ЗНАЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А. Д. Селина¹, А. С. Венецианский²

^{1,2} Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

¹bstm-221_272492@volsu.ru, ²alven79@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования выступают дорожно-транспортные происшествия в России. Предметом являются причины дорожно-транспортных происшествий, в частности, ухудшение здоровья водителя. Целью работы является повышение безопасности на дорогах путем предупреждения несчастных случаев, в частности, связанных с состоянием водителя. *Материалы и методы.* Для наглядности использованы официальные данные Федеральной службы государственной статистики по количеству дорожно-транспортных происшествий, заболеваемости кровеносной системы. *Результаты.* Одним из серьезных и сложноуправляемых факторов ДТП является здоровье водителя, в частности, заболевания, связанные с кровообращением. С каждым годом количество таких заболеваний растет. В то же время количество происшествий по неосторожности или невнимательности уменьшается, поскольку в России задействован проект «Безопасные качественные дороги», давая водителям условия для отдыха на дороге. *Выводы.* Проанализированы причины дорожно-транспортных происшествий. Причины, касающиеся качества дорожного покрытия, освещенности и площадок для отдыха активно прорабатываются на государственном уровне. Для сведения к минимуму причин аварий, связанных со здоровьем водителя, необходимо ввести непрерывный мониторинг здоровья водителя транспортного средства. Также для улучшения статистических данных рекомендуется замотивировать водителей регистрировать все ДТП, даже с незначительными последствиями.

Ключевые слова: здоровье водителя, негативные факторы, болезни системы кровообращения, ДТП

Для цитирования: Селина А. Д., Венецианский А. С. Значение мониторинга здоровья водителя транспортного средства // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 65–71. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-8

THE IMPORTANCE OF MONITORING THE HEALTH OF A VEHICLE DRIVER

A.D. Selina¹, A.S. Venetsiansky²

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

¹bstm-221_272492@volsu.ru, ²alven79@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is road traffic accidents in Russia. The subject is the causes of road accidents, in particular, the deterioration of the driver's health. The goal of the work is to reduce morbidity in the circulatory system and minimize severe consequences for drivers of any vehicles through timely diagnosis of changes with a special monitoring device. *Materials and methods.* For clarity, official data from the Federal State Statistics Service on the number of road accidents and morbidity of the circulatory system were used. *Results.* One of the serious and difficult to control factors in road accidents is the health of the driver, in particular diseases associated with blood circulation. The number of such diseases is growing every year. At the same time, the number of accidents due to negligence or inattention is decreasing, since the "Safe Quality Roads" project is being implemented in Russia, giving drivers conditions to rest on the road. *Conclusions.* The causes of road accidents are analyzed. Reasons related to the quality of road surfaces, lighting and recreation areas are being actively studied at the state level. To minimize driver health-related causes, it is necessary to introduce continuous health monitoring of the vehicle driver. Also, to improve statistical data, it is recommended to motivate drivers to register all traffic accidents, even with minor consequences.

Keywords: driver's health, negative factors, diseases of the circulatory system, road accidents

For citation: Selina A.D., Venetsiansky A.S. The importance of monitoring the health of a vehicle driver. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):65–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-8

Введение

Здоровье водителя – крайне важная составляющая для безопасного движения на дороге, причем как для людей, пользующихся машиной в личных целях каждый день, так и для водителей дальнего следования и других транспортных средств, например, поездов или самолетов.

Если водитель чувствует себя неудовлетворительно, то это подвергает опасности его самого, пассажиров и других участников движения (включая прохожих). Нередко бывали случаи, когда водитель засыпал, терял бдительность из-за утомляемости, терял сознание и т.д. во время движения, и подобные ситуации обычно не остаются без жертв. Таким образом, для водителей особенно важен мониторинг здоровья, поскольку от этого зависит не одна жизнь. Усугубляет ситуацию и состояние окружающей среды, которое имеет негативную тенденцию.

Материалы и методы

Для наглядности использованы официальные данные Федеральной службы государственной статистики по количеству дорожно-транспортных происшествий, заболеваемости кровеносной системы.

Недостаточная или недобросовестная очистка отработавших газов с заводов, предприятий и транспорта повышает уровень вредных веществ в атмосферном воздухе, провоцируя плохое самочувствие у жителей, заболевания дыхательных путей, затрудненное дыхание и сонливость [1–5].

Воздействие таких негативных факторов на здоровье человека может быть эффективно снижено при одновременном выполнении двух условий: соблюдение норм и осуществление добросовестного контроля за опасными объектами, а также теми, которые имеют неблагоприятное влияние на компоненты окружающей среды (например, автомобильный транспорт).

Забота о своем здоровье, его мониторинг, подбор оптимального режима дня, обращение внимания на любые изменения и своевременное обращение за помощью.

Если ситуация на дороге зависит от многих факторов, то ответственность за личное здоровье водитель несет сам. Так, одними из самых распространенных заболеваний, влияющих на возможность вождения, являются сердечно-сосудистые заболевания, которые напрямую связаны с системой кровообращения.

Если рассматривать российскую статистику диагнозов, поставленных впервые с 2000 по 2021 г. по болезням системы кровообращения, то получаются следующие данные (рис. 1).

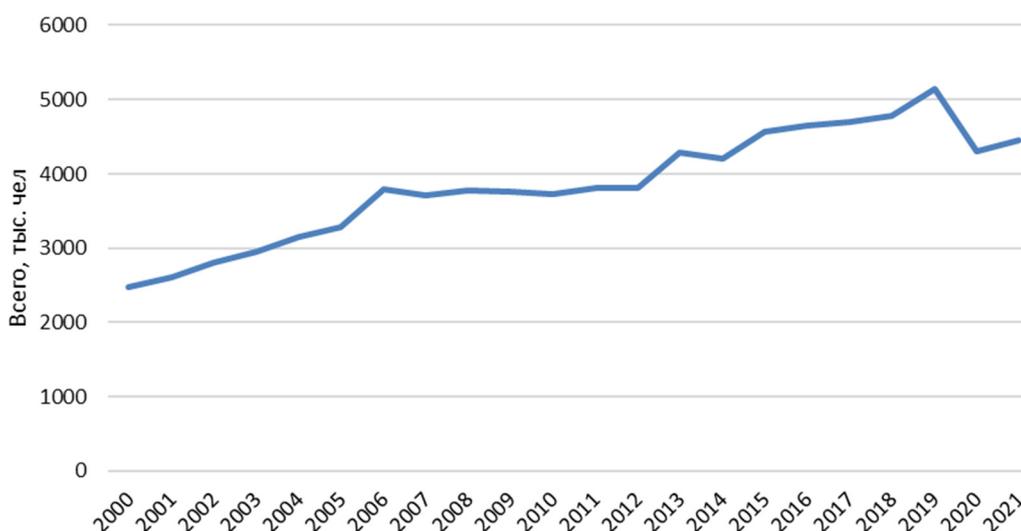


Рис. 1. Заболевания системы кровообращения с 2000 по 2021 г. [6]

По данному графику количество болезней системы кровообращения растет в период с 2000 по 2019 г., имея небольшие отклонения от общей тенденции графика. Резкий спад наблюдается в период 2019–2020 гг., что может быть связано с количеством летальных исходов, вызванных инфекцией COVID-19 («Coronavirus disease 2019»), поскольку данные представлены из расчета на 1000 человек [6].

Показатели заболеваемости меняются в зависимости от региона России. Так, статистика по федеральным округам будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

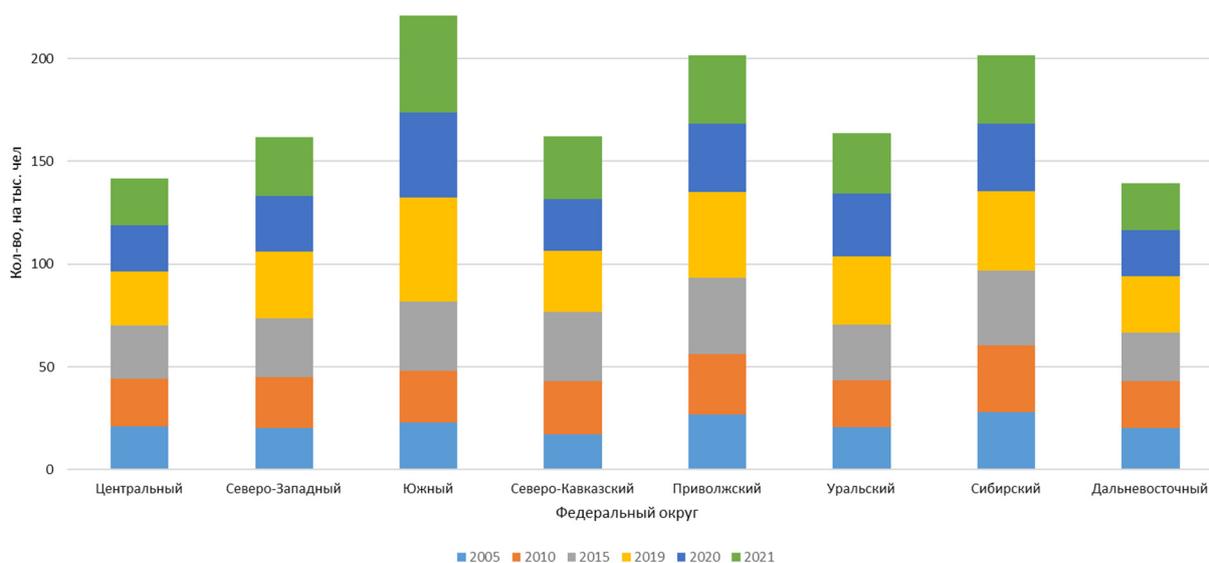


Рис. 2. Заболеваемость на 1000 человек населения, связанная с системой кровообращения с 2005 по 2021 г. на территории России [7]

Нарушение системы кровообращения наиболее распространено в Южном федеральном округе, далее – в Приволжском и Сибирском. Наименьшее количество исследуемых заболеваний у Центрального федерального округа. Следует отметить, что для Южного федерального округа самыми «больными» годами являлись 2019 и 2021 гг.

Статистика Южного федерального округа имеет вид (рис. 3).

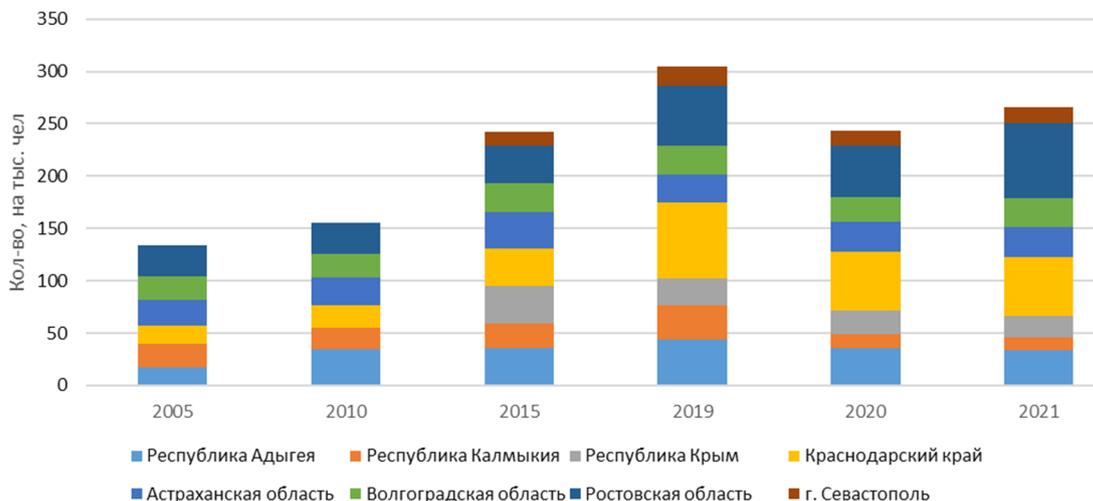


Рис. 3. Заболеваемость на 1000 человек населения, связанная с системой кровообращения с 2005 по 2021 г. по Южному федеральному округу России [7]

Самое большое количество заболевших в Южном федеральном округе зафиксировано в Ростовской области и Краснодарском крае (их показатели находятся в диапазоне 260–272).

Причем по результатам рис. 2–3 наблюдается следующее: в 2019 г. было поставлено самое большое количество диагнозов, связанных с системой кровообращения, как во всей России (показатель составляет 279,4 единицы), так и по Южному федеральному округу (показатель равен 304,2). В 2021 г. показатель по России равен 247,9, по Южному федеральному округу – 266,1, но есть основания прогнозировать повышение данного числа.

Принимая во внимание смертность от болезней системы кровообращения на 100 000 человек населения по территории Российской Федерации, средний показатель составляет 640,3. Касательно каждого федерального округа данные представлены на рис. 4.

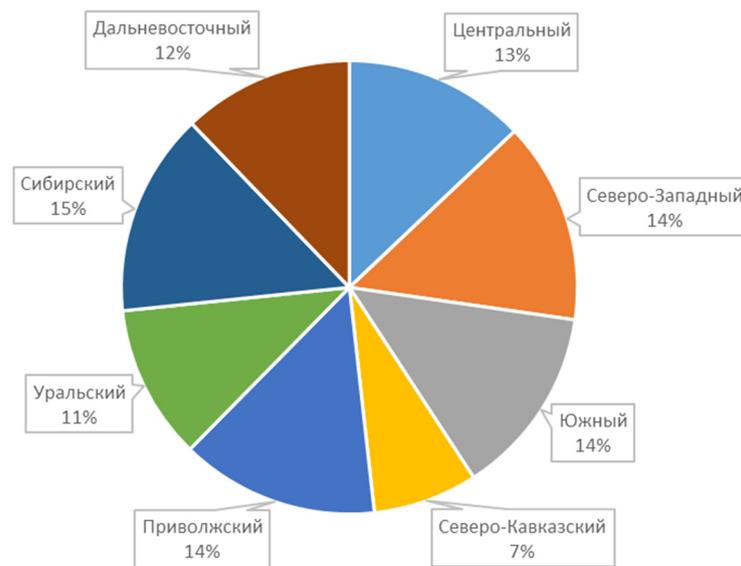


Рис. 4. Смертность от болезней системы кровообращения на 100 000 человек населения по территории Российской Федерации [7]

Таким образом, на рис. 4 видно, что наибольшая смертность от болезней системы кровообращения на 2021 г. в Сибирском федеральном округе, далее – Северо-Западный, Приволжский и Южный.

Дорожно-транспортное происшествие (ДТП) – это событие, возникшее в процессе движения по дороге транспортного средства и с его участием, при котором погибли или ранены люди, повреждены транспортные средства, груз, сооружения либо причинен иной материальный ущерб [7].

Включая сведения только о дорожно-транспортных происшествиях, в которых погибли или были ранены люди, данные имеют вид (рис. 5).

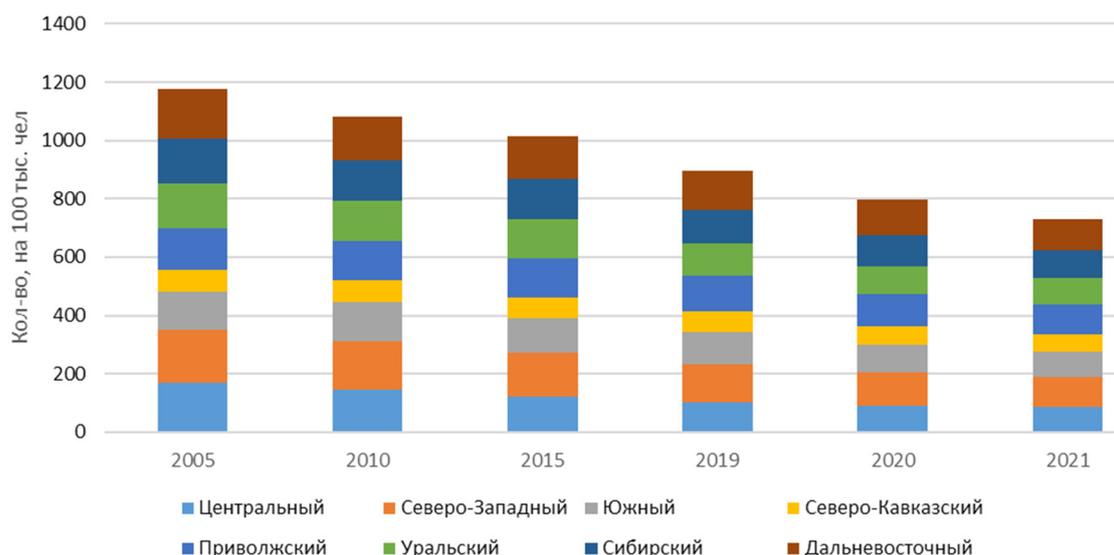


Рис. 5. Число ДТП с пострадавшими в России на 100 000 человек населения с 2005 по 2021 г. [7]

С каждым годом количество дорожно-транспортных происшествий уменьшается. Тем не менее у Северо-Западного и Дальневосточного федеральных округов показатели самые большие (общие коэффициенты за 17 лет – 847,7 и 836,6 соответственно), а у Северо-Кавказского практически в два раза меньше (общий показатель за 17 лет – 421,8).

Такая динамика может быть связана с отсутствием пострадавших, решением не документировать ДТП, более добросовестным соблюдением правил безопасности на дороге водителями транспортных средств и др.

Что касается смертности в произошедших дорожно-транспортных происшествиях, то Федеральная служба государственной статистики предоставляет следующие данные (рис. 6).

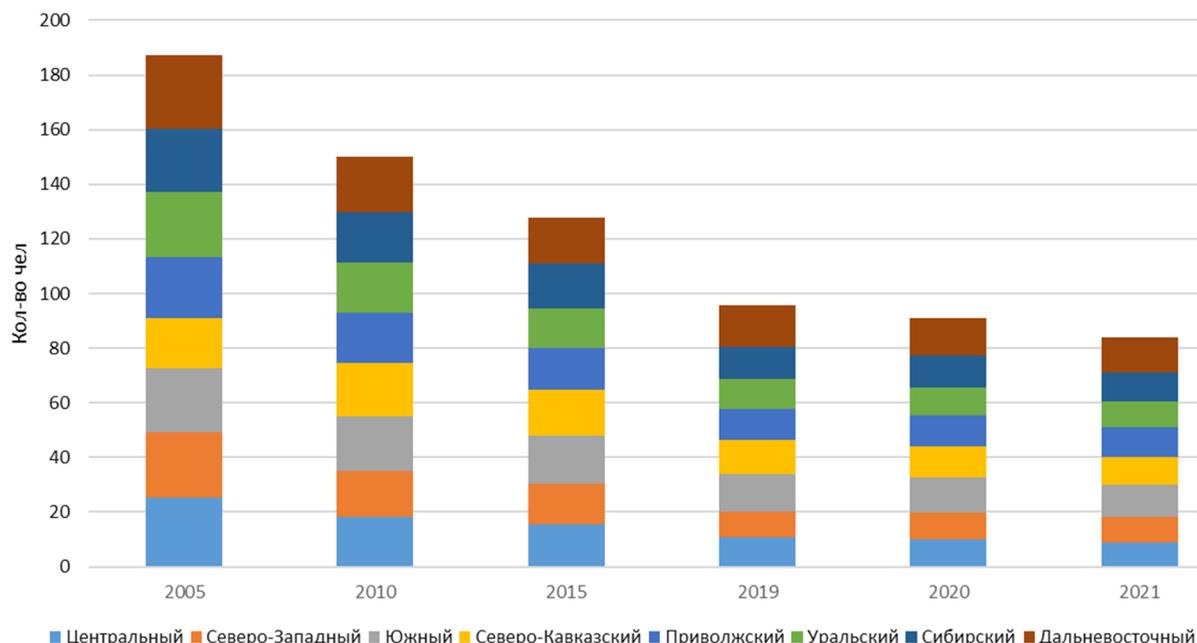


Рис. 6. Смертность в ДТП на территории России с 2005 по 2021 г. [7]

Как можно видеть по рис. 6, наибольшая смертность зафиксирована в Дальневосточном федеральном округе, наименьшая – в Северо-Западном округе [7].

Количество смертельных ситуаций в дорожно-транспортном происшествии уменьшается с каждым годом (как и количество аварий). Стоит учитывать, что с 2017 г. существует национальный проект «Безопасные качественные дороги», включающий в себя федеральные проекты: «Региональная и местная дорожная сеть», «Безопасность дорожного движения», «Развитие общественного транспорта», «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства», «Автомобильные дороги Минобороны России», «Развитие федеральной магистральной сети». Проектом предусмотрено: устройство объектов электроосвещения, установка осевого барьерного ограждения, обустройство комплексами фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения, строительство площадок отдыха, устройство табло переменной информации, устройство светофорных объектов. А также уменьшение показателей может происходить из-за увеличения новых машин на дорогах (чем новее машина и меньше ее пробег, тем она безопаснее для участников дорожного движения и для окружающей природной среды).

В программу включены все регионы Российской Федерации, всего будет сделано 5584 объекта, 5539 из которых уже законтрактовано.

При изучении данного национального проекта рассматривались разные решения проблемы с автотранспортом и высокой смертностью: как устройство различных элементов на дороге, изменение политики штрафов за нарушения, пересмотр учебной программы для водителей и др. Одним из предложенных вариантов было применение современных технологий для автоматизации контроля транспортного средства и водителя, но главным он выбран не был.

Проект отдельно рассматривает данные касательно аварийно-опасных участков дорог, где только в 2018 г. на таких участках погибло 494 человека и ранено 2243. Так, необходима смена подхода, направленная на своевременное выявление потенциальных аварийно-опасных участков и исключение их образования. Если брать статистику за 2017 и 2021 гг., то количество погибших в ДТП на 100 000 человек равно 13 и 10,2 чел соответственно.

На данный момент очень важной частью для обустройства безопасного вождения являются площадки для отдыха. Ввиду отсутствия разветвленной сети площадок отдыха 10 % аварий случается по причине усталости водителей и 4 % – по причине остановки транспортного средства на обочине. Существующие площадки отдыха не соответствуют современным критериям комфортного времяпрепровождения на них (теплый туалет, столы и скамейки для отдыха и приема пищи и т. д.).

Государственная программа планирует разработать современные площадки для отдыха в соответствии с необходимыми нормативными документами, а также информировать водителей о наличии таких площадок [10].

Таким образом, по анализируемым данным количество заболеваний, связанных с кровообращением растет, а количество аварий с пострадавшими и коэффициент смертности падает ввиду продуктивной работы национального проекта «Безопасные качественные дороги». Необходимо учитывать факт, что статистика по незарегистрированным дорожно-транспортным происшествиям не ведется. Такие «легкие» ДТП часто происходят по невнимательности водителя, неосторожности, утомлению и других симптомах, связанных с нарушениями кровеносной системы.

Для происшествий с незначительными последствиями рекомендуется ввести облегченный бланк регистрации ДТП с возможностью электронной подачи документа в соответствующие органы. Таким образом, статистические данные по количеству дорожно-транспортных происшествий и их причинам будут более достоверны.

Необходимо отметить, что программа «Безопасные качественные дороги» предусматривает строительство новых площадок для отдыха водителей, значительно сокращающее количество ДТП из-за ухудшения здоровья водителя. Учитывая, что человек не всегда может вовремя заметить негативные изменения в сфере своего здоровья, особенно во время ведения автомобиля, то предлагается проводить мониторинг изменений независимым устройством.

Результаты и обсуждение

Одним из серьезных и сложноуправляемых факторов ДТП является здоровье водителя, в частности, заболевания, связанные с кровообращением. С каждым годом количество таких заболеваний растет. В то же время количество происшествий по неосторожности или невнимательности уменьшается, поскольку в России задействован проект «Безопасные качественные дороги», давая водителям условия для отдыха на дороге.

Заключение

Проанализированы причины дорожно-транспортных происшествий. Причины, касающиеся качества дорожного покрытия, освещенности и площадок для отдыха активно прорабатываются на государственном уровне. Для сведения к минимуму причин, связанных со здоровьем водителя, необходимо ввести непрерывный мониторинг здоровья водителя транспортного средства. Также для улучшения статистических данных рекомендуется замотивировать водителей регистрировать все ДТП, даже с незначительными последствиями.

Список литературы

1. Абдурахманова Э. Г. Влияние выхлопных газов на организм человека // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. №1. С. 53–57.
2. Бабусяк Б., Хайдуцик А., Медвецкий С. [и др.]. Дизайн интеллектуального рулевого колеса для навязчивого мониторинга состояния здоровья и сонливости // Датчики. 2021. №1. С. 52–85. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-515-524
3. Белялов Ф. И. Подходы к персонализированной терапии // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2018. № 3. С. 418–424. doi: 10.20996/1819-6446-2018-14-3-418-424
4. Лашков И. Б. Определение опасных состояний водителя транспортного средства на основе информации устройств носимой электроники // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. № 4. С. 515–524. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-515-524
5. Huang C. Potential Cardiovascular and Total Mortality Benefits of Air Pollution Control in Urban China // Circulation : CIRCULATION-ANA. 2017. № 136 (17). С. 1575–1584. doi: 10.1161/circulationaha.116.026487
6. Moody J., Bailey N., Zhao J. Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison // Safety Science. 2020. Vol. 121. P. 634–650. doi: 10.1016/j.ssci.2019.07.022
7. Официальная статистика // Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. 2023. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (дата обращения: 07.08.2023).
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2022 // Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. 2023. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ Region_Pokaz_2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2022.pdf) (дата обращения: 07.08.2023).

9. Шулаев А. В., Якупов Э. З., Мардиев А. А. Влияние условий труда и образа жизни водителей на структуру нарушений сна // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2020. № 3. С. 54–75. doi 10.24411/2312-2935-2020-00059
10. Безопасные качественные дороги // Национальные проекты России : официальный сайт. 2023. URL: <https://bkdrf.ru/> (дата обращения: 04.08.2023).

References

1. Abdurakhmanova E.G. The effect of exhaust gases on the human body. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy = Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies*. 2015;(1):53–57. (In Russ.)
2. Babusyak B., Khaydutsik A., Medvetskiy S. et al. Design of an intelligent steering wheel for unobtrusive monitoring of health and drowsiness. *Datchiki = Sensors*. 2021;(1):52–85. (In Russ.). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-515-524
3. Belyalov F.I. Approaches to personalized therapy. *Ratsional'naya farmakoterapiya v kardiologii = Rational pharmacotherapy in cardiology*. 2018;(3):418–424. (In Russ.). doi: 10.20996/1819-6446-2018-14-3-418-424
4. Lashkov I.B. Determination of dangerous conditions of a vehicle driver based on information from wearable electronics devices. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, mechanics and Optics*. 2021;(4):515–524. (In Russ.). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-515-524
5. Huang C. Potential Cardiovascular and Total Mortality Benefits of Air Pollution Control in Urban China. *Circulation: CIRCULATION-AHA*. 2017;(136):1575–1584. doi: 10.1161/circulationaha.116.026487
6. Moody J., Bailey N., Zhao J. Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison. *Safety Science*. 2020;121:634–650. doi: 10.1016/j.ssci.2019.07.022
7. Official statistics. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: ofitsial'nyy sayt = Federal State Statistics Service : official website*. 2023. (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (accessed 07.08.2023).
8. Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2022. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: ofitsial'nyy sayt = Federal State Statistics Service : official website*. 2023. 2023. (In Russ.). Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2022.pdf (accessed 07.08.2023).
9. Shulaev A.V., Yakupov E.Z., Mardiev A.A. The influence of working conditions and lifestyle of drivers on the structure of sleep disorders. *Sovremennyye problemy zdravookhraneniya i meditsinskoy statistiki = Modern problems of healthcare and medical statistics*. 2020;(3):54–75. (In Russ.). doi: 10.24411/2312-2935-2020-00059
10. Safe high-quality roads. *Natsional'nye proekty Rossii: ofitsial'nyy sayt = National projects of Russia : official website*. 2023. (In Russ.). Available at: <https://bkdrf.ru/> (accessed 04.08.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Дмитриевна Селина

магистрант,
Волгоградский государственный университет
(Россия, г. Волгоград, пр-кт Университетский, 100)
E-mail: bstm-221_272492@volsu.ru

Aleksandra D. Selina

Master degree student,
Volgograd State University
(100 Universitetskiy avenue, Volgograd, Russia)

Алексей Сергеевич Венецианский

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
заместитель директора по науке
и внешним связям,
Волгоградский государственный университет
(Россия, г. Волгоград, пр-кт Университетский, 100)
E-mail: alven79@mail.ru

Aleksey S. Venetsianskiy

Candidate of agricultural sciences, associate
professor, deputy director for science
and external relations,
Volgograd State University
(100 Universitetskiy avenue, Volgograd, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 25.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 22.01.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ОСЛОЖНЕНИЙ ПРИ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ

Н. И. Терешин¹, А. В. Кузьмин²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹nexiq1337@gmail.com, ²a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Широкое распространение и опасность сердечно-сосудистых заболеваний определяют актуальность разработки и применения новых программных средств для прогнозирования их течения и оценки соответствующих рисков. При проектировании и разработке *web*-приложения, позволяющего оценивать риск развития ишемического инсульта по шкале на основе соответствующих факторов, решается ряд задач, а именно: анализ и разработка комплекса программ для применения на базе мобильных устройств, отработка взаимодействия отдельных программных модулей и экспериментальное исследование разработанного программного решения. *Материалы и методы.* В качестве основы для создания программной системы использована известная шкала оценки риска ишемического инсульта при фибрилляции предсердий. Программная система реализована с использованием среды программирования *WebStorm*. Для реализации интерфейсной части использован язык *HTML* и *CSS*. Для реализации функциональной части использован язык *JavaScript*. *Результаты.* Разработан программный комплекс для оценки риска осложнений при фибрилляции предсердий для использования на стандартных мобильных устройствах, позволяющих организовывать обмен данными. Универсальность обеспечивается использованием *web*-интерфейса. *Выводы.* В современных условиях важным фактором удобства и эффективности использования программных решений является ориентация на мобильные устройства. По этой причине было решено реализовать оценочную шкалу в виде *web*-приложения. На примере шкалы *CHA₂DS₂VASc* была опробована методика создания *web*-ориентированных программных средств. Преимуществами *web*-приложений является их универсальность и возможность использования на мобильных устройствах.

Ключевые слова: *web*-приложение, кардиология, оценка риска, анализ данных, программирование

Для цитирования: Терешин Н. И., Кузьмин А. В. Разработка *web*-приложения для оценки риска осложнений при фибрилляции предсердий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 72–77. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-9

DEVELOPMENT OF A STROKE RISK SCALE WEB APPLICATION

N.I. Tereshin¹, A.V. Kuzmin²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia
¹nexiq1337@gmail.com, ²a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* When designing and developing a web application that allows you to get stroke risk factors on a scale of data, you have to solve a number of tasks, namely: analysis and development of a portable software package based on mobile devices, with API support for client mobile devices, experimental research of the developed methodology of portable solutions, models and technologies of interaction, implementation of a portable system with API support. *Materials and methods.* The methodological basis of the research is system analysis, methods of information processing and optimization of models, methods of operational calculus, automatic control theory. The research was carried out using mathematical modeling and using software, including the *WebStorm* programming environment and *MySQL* information processing software. *Results.* A software package has been developed and a new approach related to the use of standard mobile devices for organizing data transmission has been proposed. This method, unlike the considered analogues, uses a mobile device as a server, and works autonomously and without additional network devices. *Conclusions.* In modern conditions, an important factor in the convenience and efficiency of using software solutions is orientation to mobile devices. For this reason, it was decided to implement the evaluation scale in the form of a web application. Using the example of the *CHA₂DS₂VASc* scale, a technique for creating web-oriented software tools was tested. The advantages of web applications are their versatility and the ability to use them on mobile devices.

Keywords: web application, cardiology, risk evaluation, data analysis, programming

For citation: Tereshin N.I., Kuzmin A.V. Development of a stroke risk scale web application. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):72–77. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-9

Введение

Одна из важнейших задач в развитии здравоохранения – это создание новых инструментов взаимодействия лечебно-профилактических учреждений, специалистов с их профессиональными компетенциями, пациентов и современных информационных технологий. Такое взаимодействие позволит предоставлять медицинские услуги в новых формах, независимо от фактического положения участников взаимодействия. На фоне развития информационных технологий образовался новый способ оказания медицинских услуг населению – телемедицина [1].

Термин «телемедицина» был внедрен еще в 1972 г. Томасом Бердом. Телемедицина совместила в себе значимое количество информационно-технологических методов, используемых в здравоохранении.

В настоящее время благодаря научному и технологическому прогрессу «телемедицина» применяется во многих областях, не только в медицинских учреждениях, но и в труднодоступных местах, также позволяет поднять эффективность диагностики и лечения на более высокий уровень.

Новейшие информационные технологии и части телемедицинских систем в ежедневной врачебной практике встречаются довольно часто, достаточно иметь под рукой любой современный «гаджет» [2]. Благодаря чему можно провести первичный анализ состояния пациента, не прибегая к помощи специалиста.

Целью работы является создание *web*-приложения, позволяющего оценить риск развития инсульта и тромбоэмболических осложнений. Важной составляющей работы *web*-приложения является доступ к сети Интернет, что позволяет постоянно передавать информацию в специальные медицинские учреждения. При этом приложение должно быть универсальным, поддерживать работу в любом браузере и на мобильных устройствах.

Материалы и методы

В данной работе выбрана шкала, используемая кардиологами для оценки рисков ишемического инсульта при фибрилляции предсердий. Она называется *CHA₂DS₂VASc* [3]. Название представляет собой аббревиатуру, сформированную из первых букв английских названий, объясняющая: сердечную недостаточность, гипертонию, возраст более 75 лет, диабет, инсульт, поражение сосудов, возраст в промежутке 65–74 лет и женский пол.

Данная шкала применяется для оценивания риска ишемического инсульта и тромбоэмболий, а также может быть полезна для работы с пациентами, страдающими сердечной недостаточностью. Авторы европейского исследования сделали подобный вывод, что определяло наличие связи между показателями по *CHA₂DS₂-VASc* и риском ишемического инсульта, тромбоэмболий и смерти у пациентов с сердечной недостаточностью [3].

Данная шкала оценивания является основой для других подобных шкал, используемых кардиологами в более специфических случаях, а также для сравнения разработки более детальных методик оценки риска, включающих большее количество входных параметров и более сложные методы обработки данных, такие как, например, нейронные сети [4].

Разработка *web*-приложения производилась в среде *WebStorm* с использованием *CSS* (каскадных таблиц стилей, описывающий внешний вид документа или *web*-страницы, написанных с использованием *HTML*)[5], *HTML* (язык гипертекстовой разметки, стандартный язык гипертекстовой разметки документов)[6, 7], *JavaScript* (мультипарадигменный язык программирования, поддерживает объектно ориентированный, императивный и функциональный стили).

С помощью *CSS* и *HTML* описывается основной интерфейс программы, а за функциональную часть отвечает *JavaScript* [8].

Результаты

В представленном приложении для того, чтобы получить данные о состоянии пациента, необходимо опросить пациента и заполнить тестовую анкету. Форма ввода данных показана на рис. 1. Для наглядности каждый пункт в опросе отмечен количеством баллов за положительный ответ.

В зависимости от выбранных вариантов программа выведет результат с вероятностью инсульта в течение года и рекомендованным лечением.

Нажав кнопку «Очистить», можно пройти тест неограниченное количество раз, такие опросы может проводить любой человек независимо от его квалификации.

Шкала CHA₂DS₂VASc.

Шкала CHA₂DS₂VASc является простым и доступным методом для оценки риска развития инсульта и тромбоэмболических осложнений у пациентов с трепетанием и фибрилляцией предсердий. Шкала является дальнейшим развитием шкалы CHADS₂, в которую добавлены дополнительные факторы риска развития инсульта.

Шкала CHA₂DS₂VASc

- Сердечная недостаточность или систолическая дисфункция левого желудочка+1
- Артериальная гипертония+1
- Возраст 75 лет и старше+2
- Сахарный диабет+1
- Инсульт, транзиторная ишемическая атака или другие эмболические осложнения+2
- Сосудистое заболевание (перенесенный инфаркт миокарда, атеросклероз периферических артерий и аорты)+1
- Возраст от 65 до 74 лет+1
- Женский пол+1

Набрано: **4 балла**. Ожидаемая частота инсультов за год: **4.0%**.
Рекомендуется прием витамина К (например, варфарин) с целевым МНО 2.5 (2.0-3.0)

Рис. 1. Форма ввода данных

Формирование итоговой оценки риска проходит в соответствии с баллами, определенными для каждого показателя. Данная таблица с расшифровкой параметров и баллами также может выводиться пользователю в виде отдельной формы, показанной на рис. 2.

Фактор риска	Баллы
Инсульт, транзиторная ишемическая атака или артериальная тромбоэмболия в анамнезе	2
Возраст ≥75 лет	2
Артериальная гипертензия	1
Сахарный диабет	1
Инсульт, транзиторная ишемическая атака или другие эмболические осложнения	1
Сосудистое заболевание (инфаркт миокарда в анамнезе, периферический атеросклероз, атеросклеротические бляшки в аорте)	1
Возраст 65-74 года	1
Женский пол	1

Рис. 2. Форма факторов риска

После прохождения опроса производится подсчет баллов. В соответствии с суммой баллов производится оценка ожидаемого риска ишемического инсульта в течение года. Форма с данными представлена на рис. 3.

Подключенный файл *JavaScript* необходим для осуществления математических операций, с помощью которого и производится обработка баллов, набранных при прохождении опроса [6]. Логика программы подразумевает создание нескольких переменных для присвоения им «*id*» элементов из *HTML*-документа [7]. Благодаря условному оператору «*if*» выполняется инструкция, если указанное условие истинно. Если условие не выполняется (ложно), то может быть выполнена другая инструкция по ветви «*else if*» [8]. Таким образом и выполняется суммирование баллов за каждый отмеченный «*checkbox*».

При нажатии каждого «*checkbox*» происходит проверка условия «*if*», если истинно, то к переменной прибавляется *n*-е количество баллов за ответ. На каждом шаге проверки для финальной оценки состояния пациента, программа сравнивает *i*-е количество набранных баллов с *j*-м количеством баллов установленным в программе для распределения пациента по группам и назначения лечения (профилактики) [9]. Пункт 3 (возраст 75 лет и старше) и пункт 7 (возраст от 65 до 74 лет) выбрать одновременно нельзя, так как нарушается логика выполнения.

После нажатия кнопки «очистить» все «*checkbox*» возвращаются в состояние по умолчанию, далее цикл начинает проверку на состояние «*checkbox*» с самого начала.

Обсуждение

На данном примере была опробована методика создания *web*-ориентированных программных средств, позволяющих реализовывать алгоритмы оценки состояния здоровья человека. Преимуществами *web*-приложений являются их универсальность и возможность использования на мобильных устройствах. Так, следующей оценочной шкалой, которую планируется реализовать по сходной методике, является широко используемая кардиологами совместно с *CHA₂DS₂VASc* шкала оценки риска кровотечения *HAS-BLED*.

Подобные системы требуется подключать к базам данных для структурированного сбора статистики и персональных данных (ФИО, дата рождения, вес, рост и т.д.). Это позволит контролировать динамику состояния человека, что позволит строить более точные прогнозы. Также это позволит получать доступ к другим, уже имеющимся в базе данным, что избавит пользователя от необходимости ввода одних и тех же данных и их дублирования, повысит скорость работы и удобство использования [10].

Заключение

Актуальность представленной разработки продиктована широким распространением и опасностью сердечно-сосудистых заболеваний. Важным элементом кардиологической помощи при определении курса лечения является прогнозирование и оценка рисков осложнений. Для реализации выбрана шкала *CHA₂DS₂VASc*, позволяющая оценить риск ишемического инсульта и тромбоемболий. Подобные шкалы, как *CHA₂DS₂VASc*, могут использоваться как дополнительный инструмент для оценки риска осложнений со стороны сердечно-сосудистой системы у пациентов [10, 11].

В современных условиях важным фактором удобства и эффективности использования программных решений является ориентация на мобильные устройства. По этой причине было решено реализовать оценочную шкалу в виде *web*-приложения. На примере шкалы *CHA₂DS₂VASc* была опробована методика создания *web*-ориентированных программных средств. Преимуществами *web*-приложений являются их универсальность и возможность использования на мобильных устройствах [11].

Список литературы

1. Владимирский А. В., Лебедев Г. С. Телемедицина: Curatio Sine Tempora et Distantia. М. : Aegitas, 2016. 663 с.
2. Владимирский А. В., Лебедев Г. С. Телемедицина. Руководство. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. 576 с.
3. Joundi R. A., Cipriano L. E., Sposato L. A., Saposnik G. Ischemic stroke risk in patients with atrial fibrillation and *CHA₂DS₂VASc* score of 1: systematic review and meta-analysis // *Stroke: A Journal of Cerebral Circulation*. 2016. Vol. 47 (5). P. 1364–1367. doi: 10.1161/strokeaha.115.012609
4. Sheina A., Burmistrova L., Kuzmin A. [et al.]. Development of the Intelligent Method and Software for Prediction of the Risk of Cardiovascular Complications in Patients with Atrial Fibrillation and Heart Failure // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol 231. P. 583–592. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_48
5. Duckett J. *HTML and CSS: Design and Build Websites*. Indianapolis : John Wiley & Sons, 2011. 512 p.
6. Verou L. *CSS Secrets. Better Solutions to everyday web design problems*. Sevastopol : O'Reilly Media, 2015. 392 p.

7. Pisters R., Lane D. A., Nieuwlaat R. [et al.]. A novel user-friendly score (HAS-BLED) to assess 1-year risk of major bleeding in patients with atrial fibrillation // *Chest*. 2010. Vol. 138, № 5. P. 1093–1100. doi: 10.1378/chest.10-0134
8. Haverbeke M. *Выразительный JavaScript*. 3-е изд. СПб. : Питер, 2019.
9. JavaScript book // Официальный сайт Javascript. URL: <https://learn.javascript.ru/> (дата обращения: 17.11.2022).
10. Кудряшов Ю. Ю., Атьков О. Ю. Цифровое здравоохранение: технологии персональной телемедицины для реабилитации, профилактики и активного долголетия // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2018. № 4. С. 15–22.
11. Лукина Е. А. *Общественное здоровье и здравоохранение*. СПб. : Лань, 2023. 120 с.

References

1. Vladzimirskiy A.V., Lebedev G.S. *Telemitsina: Curatio Sine Tempora et Distantia = Telemedicine: Curatio Sine Tempora et Distantia*. Moscow: Aegitas, 2016:663. (In Russ.)
2. Vladzimirskiy A.V., Lebedev G.S. *Telemitsina. Rukovodstvo = Telemedicine. Guide*. Moscow: GEOTAR-Media, 2018:576. (In Russ.)
3. Joundi R.A., Cipriano L.E., Sposato L.A., Saposnik G. Ischemic stroke risk in patients with atrial fibrillation and CHA2DS2-VASc score of 1: systematic review and meta-analysis. *Stroke: A Journal of Cerebral Circulation*. 2016;47(5):1364–1367. doi: 10.1161/strokeaha.115.012609
4. Sheina A., Burmistrova L., Kuzmin A. et al. Development of the Intelligent Method and Software for Prediction of the Risk of Cardiovascular Complications in Patients with Atrial Fibrillation and Heart Failure. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;231:583–592. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_48
5. Duckett J. *HTML and CSS: Design and Build Websites*. Indianapolis: John Wiley & Sons, 2011:512.
6. Verou L. *CSS Secrets. Better Solutions to everyday web design problems*. Sevastopol: O'Reilly Media, 2015:392.
7. Pisters R., Lane D.A., Nieuwlaat R. et al. A novel user-friendly score (HAS-BLED) to assess 1-year risk of major bleeding in patients with atrial fibrillation. *Chest*. 2010;138(5):1093–1100. doi: 10.1378/chest.10-0134
8. Haverbeke M. *Vyrazitel'nyy JavaScript. 3-e izd. = Expressive JavaScript. 3rd ed.* Saint Petersburg: Piter, 2019. (In Russ.)
9. JavaScript book. *Ofitsial'nyy sayt Javascript = Official Javascript website*. (In Russ.). Available at: <https://learn.javascript.ru/> (accessed 17.11.2022).
10. Kudryashov Yu.Yu., At'kov O.Yu. Digital healthcare: personal telemedicine technologies for rehabilitation, prevention and active longevity. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technology and computing systems*. 2018;(4):15–22. (In Russ.)
11. Lukina E.A. *Obshchestvennoe zdorov'e i zdavoookhranenie = Public health and healthcare*. Saint Petersburg: Lan', 2023:120. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Игоревич Терешин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nexiq1337@gmail.com

Nikita I. Tereshin

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

Андрей Викторович Кузьмин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
вычислительных систем
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin

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

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

Поступила в редакцию/Received 19.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.01.2024

Принята к публикации/Accepted 12.02.2024

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАРУЧНОГО ТРЕХОСЕВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

И. С. Карташов¹, С. В. Привалова², А. В. Кузьмин³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹promgodpn@gmail.com, ²sofia.privalova@mail.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность тематики определяется все более широким применением данных акселерометрии в области медицины, а также в повседневной жизни. В работе поднимается проблема автоматизированного определения типа физической активности человека по данным, собранным с помощью наручного трехосевого акселерометра. *Материалы и методы.* Для решения проблемы был использован метод анализа частотного спектра сигнала. В качестве источника исходных данных использовался акселерометр, встроенный в smart-часы. Для разработки программы анализа данных был использован пакет прикладных математических программ Scilab. *Результаты.* С целью анализа показателей физической активности человека была разработана программа, позволяющая обрабатывать и исследовать данные, полученные от трехосевого акселерометра. Для анализа данных реализована функция скользящего окна, смещающая графики по нажатию кнопки. *Выводы.* Сравнительный анализ графиков частотных спектров и разностей спектров показал, что наряду с типом физической активности на результаты влияют индивидуальные особенности, что может осложнять идентификацию активностей.

Ключевые слова: физическая активность, носимый акселерометр, частотный спектр, скользящее окно, Scilab

Для цитирования: Карташов И. С., Привалова С. В., Кузьмин А. В. Спектральный анализ данных наручного трехосевого акселерометра для определения физической активности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 78–84. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-10

SPECTRAL ANALYSIS OF DATA FROM A WRIST-WORN THREE-AXIS ACCELEROMETER TO DETERMINE PHYSICAL ACTIVITY

I.S. Kartashov¹, S.V. Privalova², A.V. Kuzmin³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹promgodpn@gmail.com, ²sofia.privalova@mail.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is determined by the increasingly widespread use of accelerometry data in the field of medicine, as well as in everyday life. The work raises the problem of automated determination of the type of human physical activity based on data collected using a wrist three-axis accelerometer. *Materials and methods.* To solve the problem, the method of analyzing the frequency spectrum of the signal was used. The accelerometer built into the smart watch was used as a source of initial data. To develop the data analysis program, the Scilab package of applied mathematical programs was used. *Results.* In order to analyze indicators of human physical activity, a program was developed that allows one to process and study data obtained from a three-axis accelerometer. For data analysis, a sliding window function has been implemented that shifts graphs at the touch of a button. *Conclusions.* A comparative analysis of graphs of frequency spectra and spectral differences showed that, along with the type of physical activity, the results are influenced by individual characteristics, which can complicate the identification of activities.

Keywords: physical activity, wearable accelerometer, frequency spectrum, sliding window, Scilab

For citation: Kartashov I.S., Privalova S.V., Kuzmin A.V. Spectral analysis of data from a wrist-worn three-axis accelerometer to determine physical activity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):78–84. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-10

Введение

Мониторинг движения в режиме реального времени является актуальной задачей здравоохранения. Анализ показателей движения позволяет определить состояние здоровья человека и

выявить предпосылки развития заболеваний. Постоянные физические перегрузки создают риск появления сердечно-сосудистых, психоэмоциональных и сопутствующих заболеваний, что вынуждает повышать качество диагностики [1].

Так, мониторинг и анализ физической активности человека открывают широкие возможности в научных исследованиях, в медицинских приложениях и в повседневной жизни при мониторинге совместно с ЭКГ или автономно. Определение движения и оценка перемещений являются задачей актуальной также для различных технических систем [2]. Важным элементом для получения первичных данных является акселерометр. Для определения движения человека используется много разных средств, но здесь особое место занимают акселерометры. За счет своей портативности и легкости в использовании они все чаще начинают применяться как средства для отслеживания не только положения в пространстве, но и как средство для оценки движения человека в повседневной жизни [3].

Акселерометры широко используются в медицинских целях [4]. Так, они помогают в распознавании самоповреждающих действий [5], при обнаружении припадков [6], составлении количественной оценки особенностей тремора на основе нервно-мышечной усталости у здоровых и диабетических взрослых [7], при обнаружении ночных расчесывающих движений у пациентов с атопическим дерматитом [8]. Еще одним перспективным направлением применения носимых акселерометров является оценка движений человека в среде виртуальной реальности [9].

Акселерометр позволяет определить, чем в данный момент человек занят, а именно, к какому виду можно отнести текущую физическую активность, а также какова ее интенсивность. Поскольку акселерометры могут считывать данные ускорения по нескольким осям, то наиболее информативным является использование акселерометров, которые обрабатывают информацию об ускорении по трем координатным осям: X , Y , Z .

На текущий момент времени на рынке товаров присутствует большой выбор часов со встроенным акселерометром, и функции данных устройств очень обширны. Так, на основе анализа спектра товаров были выделены четыре экземпляра часов и фитнес-трекеров от разных производителей, а именно: MI Smart Band 6 от компании Xiaomi [10], HUAWEI Band 7 от компании HUAWEI [11], HONOR Watch ES от компании HONOR [12] и Apple Watch Series 7 от компании Apple [13]. Проанализировав данные девайсы, можно сказать, что технологии определения физической активности представлены в том или ином виде, пользователю доступны разные функции, которые помогают улучшить и облегчить процесс тренировок.

Информацию, получаемую с акселерометра, необходимо обрабатывать и хранить для того, чтобы использовать эти данные в дальнейшем, как пример можно использовать при анализе движения людей, подверженных разным заболеваниям, влияющим на координацию и физическую активность.

В настоящее время одной из больших проблем в сфере диагностики заболеваний является определение типов физической активности по данным акселерометрии. Основной задачей данной работы является сравнительный анализ частотных спектров сигналов трехосевого акселерометра и их разностей.

Анализ сигналов акселерометра дает возможность идентифицировать вид физической активности, однако индивидуальные особенности людей также оказывают сильное влияние. В ходе данной работы будет рассмотрена проблема автоматизированного определения типа физической активности методом анализа частотного спектра сигнала наручного акселерометра.

Материалы и методы

В исследовании используется разработанная программа для получения и хранения сигналов, посылаемых трехосевым акселерометром [14]. Данная программа помогает подключиться к акселерометру, преобразовать получаемые данные и сохранить их в файл. Данное программное обеспечение получает данные и сохраняет в формате CSV, что является удобным при работе с файлом.

Так, с помощью данной программы была собрана база данных, в которой хранятся данные о физической активности пользователей [15]. В базе находятся 144 уникальных сигнала, которые были получены с разных рук при разных видах физической активности. Время записи одного сигнала составляет примерно пять минут.

Были использованы значения физической активности десяти человек: пятерых мужчин и женщины в возрасте 20 лет, причем информация снималась как с левой, так и с правой руки. Все испытуемые являются правшами. В общей сложности было задействовано 40 записей. Данные были зафиксированы с помощью трехосевого акселерометра, встроенного в смарт-часы.

В рамках исследования сравнивались как показатели разных видов активностей, снятых с одного индивида, так и показатели одного вида активности, снятые с разных индивидов. Для анализа использовались графики частотных спектров и их разностей. Спектральный анализ сигнала позволяет сравнить частотный состав сигналов. Предполагается, что частотный спектр сигнала при различных видах активности будет отличаться. Для получения частотного спектра применялось быстрое преобразование Фурье.

Пример разности спектров приведен на рис. 1.

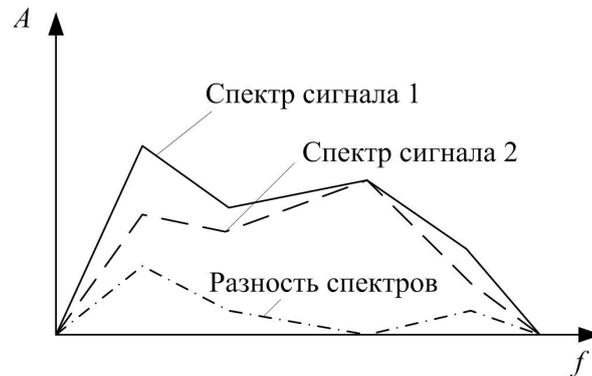


Рис. 1. Разность спектров

График разностей частотных спектров позволяет однозначно определить разницу между спектрами различных сигналов. Далее приведена формула вычисления дифференциального спектра:

$$\partial = \sum_{k=1}^n |x_{2,k} - x_{1,k}|, \quad (1)$$

где n – общее количество отсчетов; k – номер отсчета сигнала; x_1, x_2 – частотные спектры сигналов 1 и 2 соответственно.

Для решения поставленной задачи использовалась одна из мощнейших и наиболее функциональных программ – Scilab. Она является аналогом Matlab и представляет собой интерпретируемый язык программирования и предоставляет необходимый набор инструментов для решения задач исследования: средства загрузки исходных данных, обработки сигналов, отображения графиков, работы с массивами и др.

Данные каждого испытуемого были собраны с двух рук при выполнении разных видов активности с использованием трехосевого акселерометра, встроенного в смарт-часы. Итого, для каждого вида активности было собрано по четыре набора данных.

Для выявления разницы между сигналами различных видов активности, полученными от одного человека, были построены графики частотного спектра бега легкой интенсивности, работы за ПК и их графики разностей спектров для мужчины и женщины.

Для выявления разницы между сигналами одного вида активности, полученными от разных людей, были построены графики частотных спектров бега легкой интенсивности, работы за ПК и графики разницы этих спектров. Общий алгоритм спектрального анализа приведен на рис. 2.

Результаты

Алгоритм, приведенный на рис. 2, программно реализован в среде SciLab. Смещение скользящего окна при анализе выполняется по команде пользователя. В интерфейсе программы предусмотрена соответствующая кнопка. При ее нажатии диапазоны всех построенных графиков смещаются на заданное число отсчетов. В рамках примера использовалось смещение графиков на 50 отсчетов. Такое значение было выбрано для более детального анализа сигнала. Ширина окна задается в зависимости от особенностей исследуемых сигналов. В рамках данного исследования ширина окна была задана диапазоном значений от 0 до 20 Гц. При использовании скользящего окна появляется возможность детально проанализировать отдельные диапазоны графиков.

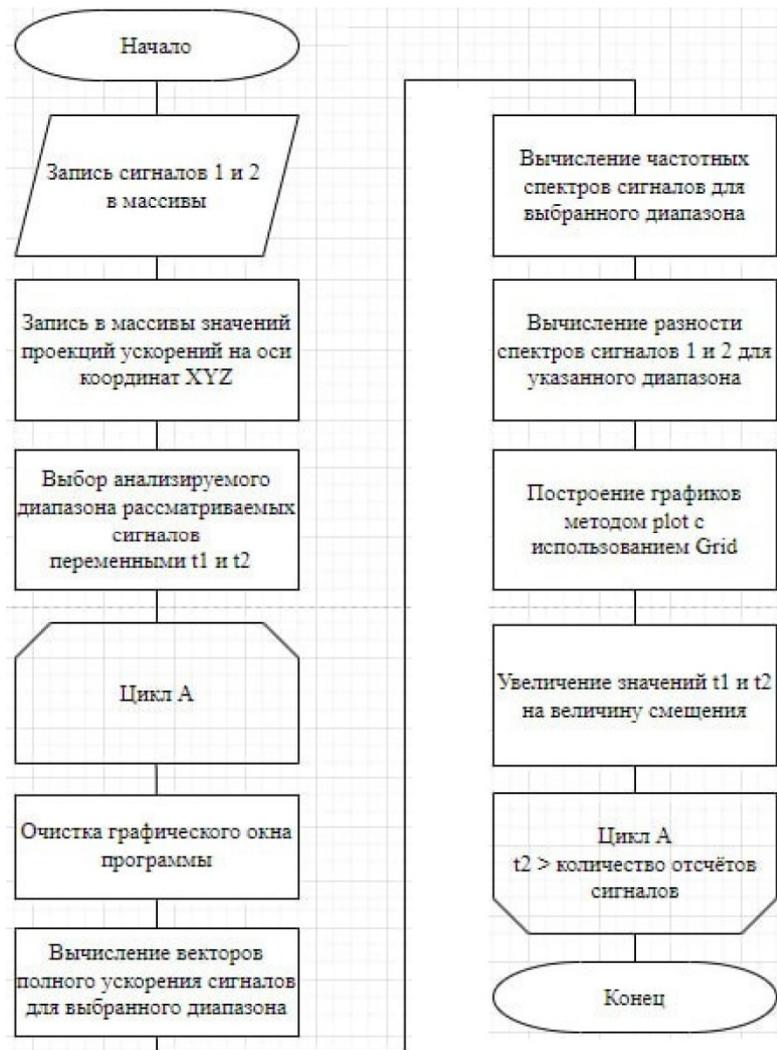


Рис. 2. Алгоритм анализа данных

В вышеописанном пакете прикладных математических программ были построены 2D-графики частотных спектров и их разностей. Графики частотного спектра бега легкой интенсивности, работы за ПК и их разницы для мужчины и женщины представлены на рис. 3.

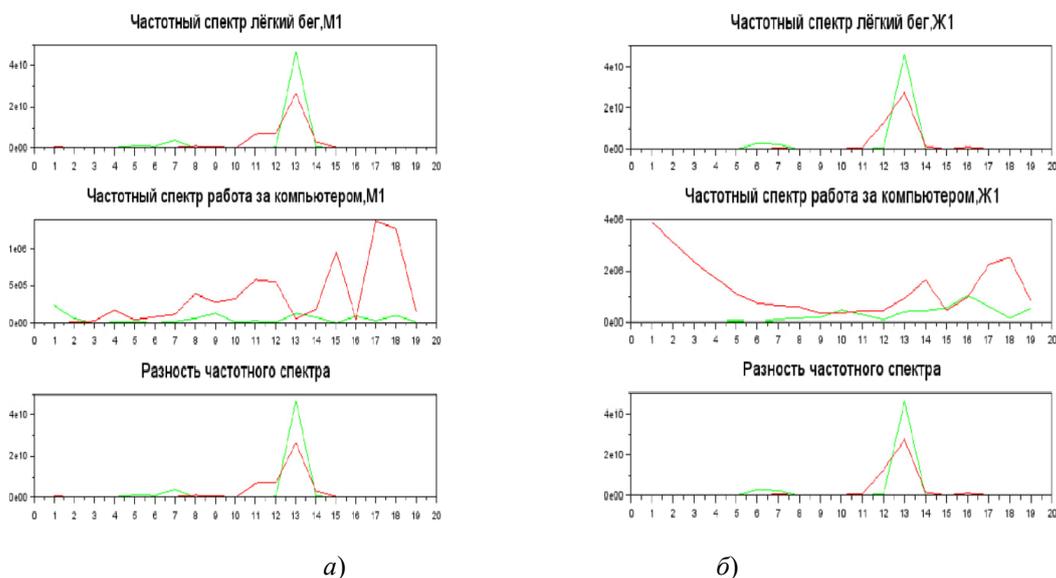


Рис. 3. Графики анализа сигналов легкого бега и работы за ПК:
a – мужчины; *б* – женщины

На каждом рисунке представлены скриншоты с программы, которая отображает в столбик три графических окна. В верхнем ряду построены графики, соответствующие показаниям, снятым с левой (график зеленого цвета) и правой (график красного цвета) рук мужчины (рис. 3,а) и женщины (рис. 3,б) при беге легкой интенсивности. Во втором ряду построены графики, соответствующие показаниям, снятым с левой (график зеленого цвета) и правой (график красного цвета) рук мужчины (рис. 3,а) и женщины (рис. 3,б) при работе за персональным компьютером. В нижнем ряду расположены графики разностей этих спектров.

Обсуждение

Из представленных выше графиков можно заметить, что графики частотных спектров и их разностей, построенных на основе данных, собранных у мужчины и женщины, имеют общий характер. Из графиков разности спектров можно сделать вывод, что сигналы разных активностей имеют различия. При анализе графиков частотных спектров было выявлено, что при беге легкой интенсивности и у мужчин и у женщин преобладают частоты в от 11 до 14 Гц. При работе на персональном компьютере разноименные руки выполняют разные функции, и соответственно, данные, снятые с разных рук, различны, поэтому анализ данных для разных рук был произведен независимо друг от друга. Наблюдается следующая закономерность при анализе данных, снятых с правой руки: преобладание частот в диапазоне от 14 до 17 Гц, для левой руки – преобладание частот равным 13–16 Гц.

Несмотря на то, что в сигналах определенных деятельности имеются закономерности, при анализе данных, полученных от разных испытуемых, было выявлено, что индивидуальные особенности людей сильно влияют на показатели активности. Следовательно, для точного анализа нужно учитывать дополнительные параметры. Исследовав другие методы анализа сигнала, также можно добиться более высоких результатов, что значительно упростит точную идентификацию различных видов активностей. В первую очередь следует исследовать такие методы анализа сигналов, как машинное обучение, вейвлет, разложение на эмпирические моды, сингулярное разложение и др.

Заключение

В рамках этой статьи мы проанализировали частотные спектры сигналов и их разности двух испытуемых (женщины и мужчины). Произведено сравнение спектров при одинаковых активностях между мужчиной и женщиной, а также сравнение спектров при разных активностях между испытуемыми.

В ходе работы было выявлено, что способ анализа физической активности средствами анализа частотного спектра сигналов акселерометра имеет потенциал, так как позволяет выделить некоторые закономерности исходных данных. Однако индивидуальные особенности людей достаточно сильно влияют на показания, поэтому для успешного применения требуются дополнительные действия, такие как персонализация и настройка на параметры конкретного пользователя.

Список литературы

1. Тычков А. Ю., Бутров Н. А., Алимуратов А. К., Назарычев А. П. Многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 3–14.
2. Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. Многофункциональный растровый датчик перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 24–30. doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-3
3. Weiss G. M., Yoneda K., Hayajneh T. Smartphone and Smartwatch-Based Biometrics Using Activities of Daily Living // IEEE Access. Vol. 7. 2019. P. 133190–133202. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940729
4. Kuzmin A. V., Ivashchenko A. V., Ryabova E. P. Biomedical applications of accelerometers: general directions and publication trends // Biomedical Engineering. 2023. № 57. P. 300–304. doi: 10.1007/s10527-023-10320-9
5. Bharti P., Panwar A., Gopalakrishna G., Chellappan S. Watch-Dog: Detecting Self-Harming Activities From Wrist Worn Accelerometers // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2018. Vol. 22, № 3. P. 686–696. doi: 10.1109/JBHI.2017.2692179. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7894267>
6. Kusmakar S., Karmakar C. K., Yan B. [et al.]. Automated Detection of Convulsive Seizures Using a Wearable Accelerometer Device // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2019. Vol. 66, № 2. P. 421–432. doi: 10.1109/TBME.2018.2845865

7. Moreau A., Anderer P., Ross M. [et al.]. Detection of Nocturnal Scratching Movements in Patients with Atopic Dermatitis Using Accelerometers and Recurrent Neural Networks // in *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2018. Vol. 22, № 4. P. 1011–1018. doi: 10.1109/JBHI.2017.2710798.
8. Zhu Y., Mehta R. K., Erraguntla M. [et al.]. Quantifying Accelerometer-Based Tremor Features of Neuromuscular Fatigue in Healthy and Diabetic Adults // *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, № 19. P. 11183–11190. doi: 10.1109/JSEN.2020.2996372. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9097885/>
9. Иванов А. Д., Тычков А. Ю., Чернышов Д. С. [и др.]. Интеллектуальная система программного управления многоосевой платформой для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2023. № 2. С. 97–103. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12
10. Mi.com // Официальный сайт компании Xiaomi: <https://www.mi.com/ru/product/mi-smart-band-6/> (дата обращения: 06.01.2024).
11. Huawei.com // Официальный сайт компании Huawei: <https://consumer.huawei.com/ru/wearables/band7/> (дата обращения: 06.01.2024).
12. Honor.ru // Официальный сайт компании Honor: <https://www.honor.ru/wearables/honor-watch-es/> (дата обращения: 06.01.2024).
13. Apple.com // Официальный сайт компании Apple: <https://www.apple.com/ru/apple-watch-series-7/> (дата обращения: 06.01.2024).
14. Прусс Д. И., Рябова Е. П., Кузьмин А. В. Разработка мобильного приложения для приема и отображения данных от акселерометра смарт-часов в среде MITAppInventor // *Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике* : сб. ст. XXI Междунар. науч.-техн. конф. (2021, Пенза). Пенза : Приволжский Дом знаний, 2021. С. 217–221.
15. Прусс Д. И., Рябова Е. П., Сафронов М. И., Кузьмин А. В. База данных физической активности человека // *Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2022»)* : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. с элементами науч. шк. и конкурсом науч.-исслед. работ для студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Пенза, 24–26 октября 2022 г.) / под ред. д-ра техн. наук Е. А. Печерской. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 237–240.

References

1. Tychkov A.Yu., Butrov N.A., Alimuradov A.K., Nazarychev A.P. Multichannel monitoring system of basic human health indicators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2021;(2):3–14. (In Russ.)
2. Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. Multifunctional raster displacement sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):24–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-3
3. Weiss G.M., Yoneda K., Hayajneh T. Smartphone and Smartwatch-Based Biometrics Using Activities of Daily Living. *IEEE Access*. 2019;7:133190–133202. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940729
4. Kuzmin A.V., Ivashchenko A.V., Ryabova E.P. Biomedical applications of accelerometers: general directions and publication trends. *Biomedical Engineering*. 2023;(57):300–304. doi: 10.1007/s10527-023-10320-9
5. Bharti P., Panwar A., Gopalakrishna G., Chellappan S. Watch-Dog: Detecting Self-Harming Activities From Wrist Worn Accelerometers. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2018;22(3):686–696. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7894267> doi: 10.1109/JBHI.2017.2692179
6. Kusmakar S., Karmakar C.K., Yan B. et al. Automated Detection of Convulsive Seizures Using a Wearable Accelerometer Device. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2019;66(2):421–432. doi: 10.1109/TBME.2018.2845865
7. Moreau A., Anderer P., Ross M. et al. Detection of Nocturnal Scratching Movements in Patients with Atopic Dermatitis Using Accelerometers and Recurrent Neural Networks. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2018;22(4):1011–1018. doi: 10.1109/JBHI.2017.2710798
8. Zhu Y., Mehta R.K., Erraguntla M. et al. Quantifying Accelerometer-Based Tremor Features of Neuromuscular Fatigue in Healthy and Diabetic Adults. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(19):11183–11190. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9097885/> doi: 10.1109/JSEN.2020.2996372
9. Ivanov A.D., Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S. et al. Intelligent software control system for a multi-axis platform for virtual reality with simulated environmental effects and feedback. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):97–103. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12
10. Mi.com. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Xiaomi = Xiaomi's official website*. (In Russ.). Available at: <https://www.mi.com/ru/product/mi-smart-band-6/> (accessed 06.01.2024).
11. Huawei.com. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Huawei = Huawei's official website*. (In Russ.). Available at: <https://consumer.huawei.com/ru/wearables/band7/> (accessed 06.01.2024).

12. Honor.ru. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Honor = Honor's official website*. (In Russ.). Available at: <https://www.honor.ru/wearables/honor-watch-es/> (accessed 06.01.2024).
13. Apple.com. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Apple = Apple's official website*. (In Russ.). Available at: <https://www.apple.com/ru/apple-watch-series-7/> (accessed 06.01.2024).
14. Pruss D.I., Ryabova E.P., Kuz'min A.V. Development of a mobile application for receiving and displaying data from accelerometer of smart watches in the MITAppInventor environment. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. st. XXI Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. (2021, Penza) = Problems of computer science in education, management, economics and technology : collection of Articles XXI International Scientific and Technical conf. (2021, Penza)*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2021:217–221. (In Russ.)
15. Pruss D.I., Ryabova E.P., Safronov M.I., Kuz'min A.V. Database of human physical activity. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2022»): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. s elementami nauch. shk. i konkursom nauch.-issled. rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (g. Penza, 24–26 oktyabrya 2022 g.) = Methods, tools and technologies for obtaining and processing measurement information ("Shlyandinsky Readings – 2022") : materials of the XIV International Scientific and Technical a conference with elements of a scientific school and a scientific research competition. works for students, postgraduates and young scientists (Penza, October 24-26, 2022)*. Ed. by E.A. Pecherskaya. Penza: Izd-vo PGU, 2022:237–240. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Сергеевич Карташов

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

Ilya S. Kartashov

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

Софья Владимировна Привалова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: w8ohh@yandex.ru

Sofya V. Privalova

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

Андрей Викторович Кузьмин

доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой информационно-вычислительных
систем
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 22.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.01.2024

Принята к публикации / Accepted 12.02.2024