

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

№ 4, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Слепцов В. В., Мостовской М. В., Малышев И. Ю.,

Соколов И. А., Куличенков А. П., Сотников Г. К.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ

И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

5

Пузанков С. В., Афонин Г. И., Емельянов Д. В.

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

МОБИЛЬНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

16

Трофимов В. Ю., Шахмейстер А. Е.

ЦИФРОВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ В АВТОНОМНЫХ

ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

22

Сашина А. Д., Березина А. О., Майданов Н. А., Алимуратов А. К.

ОБЗОР СПОСОБОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

32

Козлов В. В., Трофимов А. А., Фокина Е. А., Пономарев В. Н., Жуков Т. О.

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

43

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Волков А. В., Ивлиев С. Н., Венчаков П. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТОКОПРИЕМНИКА

МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

50

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Потехин Д. С., Комаров П. В.

СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ С УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ
В МЕДИЦИНСКОЙ СФЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

56

Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Кривоногов А. Ю.,

Сержантова Н. А., Чыонг Тхи Лан Нхи

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ
ПОМЕХ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА СЕГМЕНТАЦИИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

64

Костенкова М. Ю., Сидорова М. А.

ПРИМЕНЕНИЕ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ КОГНИТИВНОЙ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ

72

Бодин О. Н., Жигачев В. М.

АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО МЕДИАКОНТЕНТА

81

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 4, 2023

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V., Malyshev I.Yu.,

Sokolov I.A., Kulichenkov A.P., Sotnikov G.K.

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM
OF THE ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATORS

5

Puzankov S.V., Afonin G.I., Emelyanov D.V.

MODEL OF EVALUATION OF MOBILE METROLOGICAL
COMPLEX FUNCTIONING EFFICIENCY ON THE BASIS
OF RISK-ORIENTED APPROACH

16

Trofimov V.Yu., Shakhmeyer L.E.

DIGITAL FREQUENCY DIVIDERS IN AUTONOMOUS
INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

22

Sashina A.D., Berezina A.O., Maydanov N.A., Alimuradov A.K.

A REVIEW OF METHODS AND DEVELOPMENT PERSPECTIVES
FOR INFORMATION-MEASURING AND CONTROL
SYSTEMS FOR URBAN PLANTING

32

Kozlov V.V., Trofimov A.A., Fokina E.A., Ponomarev V.N., Zhukov T.O.

METHODS OF PREPROCESSING SPEECH SIGNALS

43

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Volkov A.V., Ivliev S.N., Venchakov P.V.

STUDY OF TRANSIENT PROCESSES OF THE CURRENT
COLLECTOR OF MOTOR-CAR ROLLING STOCK

50

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Potekhin D.S., Komarov P.V.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR RECEIVING AND PROCESSING
DATA FROM ULTRASOUND SENSORS IN THE MEDICAL FIELD

56

Bodin A.Yu., Kramm M.N., Krivonogov L.Yu.,

Serzhantova N.A., Truong Thi Lan Nhi

CLASSIFICATION OF ELECTROCARDIOGRAPHIC INTERFERENCE
AND REVIEW OF METHODS FOR NOISE-INSTANT PROCESSING
OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL

64

Kostenkova M.Yu., Sidorova M.A.

APPLICATION OF IT-TECHNOLOGIES FOR COGNITIVE
VISUALIZATION OF MEDICAL DATA

72

Bodin O.N., Zhigachev V.M.

ALGORITHM FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF THE PSYCHOEMOTIONAL STATE OF A SOCIAL NETWORK
USER BASED ON ANALYSIS OF ITS MEDIA CONTENT

81

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 62-589.2

doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

**В. В. Слепцов¹, М. В. Мостовской², И. Ю. Малышев³,
И. А. Соколов⁴, А. П. Куличенков⁵, Г. К. Сотников⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹vsleptsov@gmail.com, ²mvmost@yandex.ru, ³igor-malysh2013@yandex.ru,

⁴kozpova11@gmail.com, ⁵anton.kulichnikov5@gmail.com, ⁶goshasot@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальное направление совершенствования промышленных роботов-манипуляторов – снижение себестоимости информационно-измерительных и управляющих систем электроприводов. *Материалы и методы.* Приведена структурная и разработана принципиальная электрическая схема информационно-измерительных и управляющих систем электроприводов, отличающаяся минимальным количеством элементов. Разработана имитационная компьютерная модель электропривода с предлагаемой информационно-измерительной и управляющей системой в программе Matlab Simulink. *Результаты и выводы.* Приведены результаты исследования имитационной модели электропривода, соответствующие требованиям, предъявляемым к промышленным роботам-манипуляторам.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, электропривод, промышленные роботы, синхронный двигатель с постоянными магнитами, робот-манипулятор

Для цитирования: Слепцов В. В., Мостовской М. В., Малышев И. Ю., Соколов И. А., Куличенков А. П., Сотников Г. К. Информационно-измерительная и управляющая система электропривода промышленных роботов-манипуляторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATORS

**V.V. Sleptsov¹, M.V. Mostovskoy², I.Yu. Malyshev³,
I.A. Sokolov⁴, A.P. Kulichenkov⁵, G.K. Sotnikov⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹vsleptsov@gmail.com, ²mvmost@yandex.ru, ³igor-malysh2013@yandex.ru,

⁴kozpova11@gmail.com, ⁵anton.kulichnikov5@gmail.com, ⁶goshasot@mail.ru

Abstract. *Background.* The current direction of improving industrial robotic manipulators is considered – reducing the cost of information, measuring and control systems of electric drives. *Materials and methods.* A structural diagram and a basic electrical diagram of information-measuring and control systems of electric drives, characterized by a minimum

number of elements, are presented. A computer simulation model of an electric drive with the proposed information, measuring and control system has been developed in the Matlab Simulink program. *Results and conclusions.* The results of a study of a simulation model of an electric drive that meet the requirements for industrial robotic manipulators are presented.

Keywords: information-measuring and control system, electric drive, industrial robots, permanent magnet synchronous motor, robot manipulator

For citation: Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V., Malyshev I.Yu., Sokolov I.A., Kulichenkov A.P., Sotnikov G.K. Information-measuring and control system of the electric drive of industrial robot manipulators. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1

Введение

Одним из основных элементов автоматизированных производственных систем является робот-манипулятор. Промышленные роботы-манипуляторы входят в состав конвейеров (перемещение заготовок, деталей и др.), станков с ЧПУ для выполнения различных технологических операций (сверление, фрезерование, сварка и др.), а также применяются для работы с крупногабаритными изделиями. Использование роботов-манипуляторов позволяет повысить качество и производительность выполняемых работ, при этом не требует большого количества ресурсов на поддержание и обслуживание. Главным преимуществом данных устройств является возможность выполнения работы, на которую физически не способен человек. Именно это является основной причиной роста их использования и популярности. Поскольку человек управляет роботами-манипуляторами дистанционно, количество производственных травм значительно сокращается, что, безусловно, увеличивает безопасность работ. Помимо производства роботы-манипуляторы могут использоваться как отдельные модули в составе различных технических устройств, начиная от управляемых дронов и заканчивая различными протезами [1].

Основные подвижные части робота-манипулятора (рабочий орган, локоть, запястье, кисть и др.) управляются с помощью встроенных электроприводов. Известно, что электроприводы промышленных роботов и станков состоят из электрического двигателя (встроенного в составные части манипулятора) и информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС).

Позиционирование в пространстве робота-манипулятора (как правило, по четырем осям) осуществляется дистанционно по отдельно выведенным проводам связи. Комплект датчиков для измерения параметров положения (угловое положение) и скорости перемещения (угловая скорость) рабочего инструмента робота-манипулятора может устанавливаться непосредственно на электрическом двигателе либо в специальных местах технологической машины. Расстояние между отдельными узлами робота манипулятора и системой управления может достигать нескольких десятков метров.

При проектировании электропривода для промышленных роботов и станков все чаще поднимаются вопросы, связанные со снижением массогабаритных показателей, уменьшением себестоимости изделия, упрощением алгоритмов управления и настройки, повышением надежности [2] и т.д.

Одно из наиболее распространенных решений, связанных с упрощением принципов функционирования ИИУС электропривода, связано с отказом в использовании измерительной информации о токах, протекающих в обмотках электродвигателя. Благодаря данному решению исчезает необходимость в использовании датчиков тока в схеме силового инвертора, аппаратного интерфейса преобразования и передачи данных, а также отдельных элементов управления (регулятор тока), реализуемых как аппаратно, так и программно.

В настоящее время разработка высокопроизводительных, компактных, надежных и экономичных электроприводов промышленного назначения является приоритетным направлением развития современной техники. Так, например, отказ от канала коррекции тока в структурной схеме ИИУС электропривода может существенно повысить надежность, а также снизить себестоимость и время настройки изделия при незначительной потере в быстродействии.

Для проверки работоспособности разрабатываемой ИИУС электропривода и снижения затрат на макетирование и отладку часто применяются компьютерные технологии, в основе которых лежат специальные среды для разработки. К таким средам можно отнести Matlab Simulink, SimInTach, LabVIEW, PSIM и др.

Среди инженеров-разработчиков электроприводов, силовой электроники, механики, систем управления и другое большую популярность приобрела система блочного моделирования динамических систем Simulink, являющаяся подсистемой пакета прикладных программ Matlab.

В рамках данной статьи рассматривается процесс построения имитационной модели электропривода с ИИУС без контура тока, применимого в составе промышленных роботов-манипуляторов. Данная статья будет полезна инженерам-разработчикам и научным сотрудникам, занимающимся вопросами проектирования электроприводов в системе динамического моделирования Simulink.

Структурная схема ИИУС электропривода без контура тока

В составе подвижных элементов роботов-манипуляторов чаще всего применяются двигатели постоянного тока (ДПТ) и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). По сравнению с ДПТ СДПМ является наиболее перспективной машиной в диапазоне малых и средних мощностей благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам. СДПМ применяют в двух режимах: режиме бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ) и вентильного двигателя (ВД). С точки зрения технической реализации электропривод с дискретной коммутацией фазных обмоток (режим работы БДПТ) значительно проще электропривода с позиционной модуляцией фазных напряжений по синусоидальному закону (режим работы ВД). Это объясняется тем, что управление коммутацией фаз может быть реализовано по простым алгоритмам на простейшей аналого-цифровой элементной базе, а частота ШИМ при управлении двигателем может быть существенно снижена (5–10 кГц), так как нет необходимости формирования их по синусоидальному закону.

Структурная схема предлагаемой ИИУС электропривода без контура коррекции тока представлена на рис. 1.

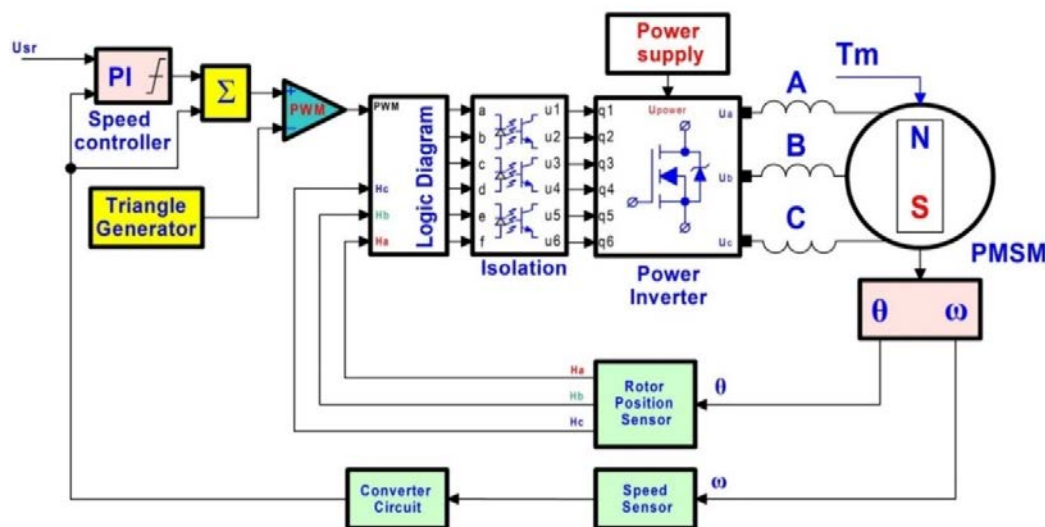


Рис. 1. Структурная схема электропривода с ИИУС без контура тока

Структурная схема ИИУС электропривода без контура тока (рис. 1) содержит следующие блоки: регулятор скорости, блок суммирования, широтно-импульсный модулятор (ШИМ), генератор треугольных импульсов, логическая схема управления силовыми транзисторами, масштабирующий усилитель, гальваническая развязка, силовой преобразователь, источник питания, синхронный двигатель с постоянными магнитами, датчик положения ротора (ДПР), датчик скорости. Отличительной особенностью данной ИИУС электропривода является введение в схему блока суммирования выходного сигнала регулятора скорости выходного сигнала датчика скорости [3].

ИИУС электропривода без контура тока (рис. 1) работает следующим образом. Входной сигнал задания скорости в виде постоянного или переменного напряжения (гармонический сигнал) в диапазоне $\pm 10\text{В}$ (при аналоговой реализации) задает необходимое значение скорости вращения СДПМ. Согласно ГОСТ 27803-91 амплитуда входного напряжения задания скорости

должна быть пропорциональна скорости вращения электродвигателя. Заданное значение скорости в виде амплитуды входного сигнала поступает на вход регулятора скорости, где оценивается рассогласование действующего значения скорости вращения (выходной сигнал датчика скорости) и формируется сигнал задания момента двигателя. Регулятор скорости настраивается на симметричный оптимум.

Для устранения контура коррекции тока (регулятора тока и др.) в схему вводится блок суммирования выходного сигнала задания момента и выходного сигнала датчика скорости. Выходной сигнал блока суммирования поступает на вход схемы ШИМ. Частота модуляции управляющего сигнала задается генератором треугольных сигналов. Выходной сигнал широтно-импульсного модулятора 5 подается на вход логической схемы, управляющей 3-фазным силовым преобразователем. Управление 3-фазным силовым преобразователем осуществляется через гальваническую развязку (оптроны). Алгоритм включения транзисторов схемы силового преобразователя определяется выходным сигналом ДПР.

На выходе логической схемы с гальванической развязкой генерируется серия выходных сигналов, поступающих на вход силового преобразователя, который преобразует входные импульсы в напряжение на обмотках статора электродвигателя. Длительность управляющих импульсов логической схемы с гальванической развязкой определяется широтно-импульсным модулятором. ДПР на основе эффекта Холла имеет шесть логических комбинаций, каждая из которых соответствует 60 электрическим градусам. Выходные импульсы в измерительном канале сдвинуты на 120°. Логические комбинации датчика положения ротора необходимо преобразовать в шестиступенчатую комбинацию логической коммутации силового преобразователя.

Порядок переключения силовых транзисторов VT1, VT2, VT3...VT6 относительно выходных сигналов можно представить в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Порядок приключения силовых транзисторов

	Dз	Hc	Hb	Ha	q1	q2	q3	q4	q5	q6
CW	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0
	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
CCW	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0

Для реализации алгоритма переключения силовых транзисторов на логических элементах табл. 1 можно представить в виде уравнений (1)–(6):

$$Q_1 = D_3 \cdot \overline{H_B} \cdot H_A + \overline{D_3} \cdot H_B \cdot \overline{H_A}; \quad (1)$$

$$Q_2 = D_3 \cdot \overline{H_C} \cdot H_B + \overline{D_3} \cdot H_C \cdot \overline{H_B}; \quad (2)$$

$$Q_3 = D_3 \cdot H_C \cdot \overline{H_A} + \overline{D_3} \cdot \overline{H_C} \cdot H_A; \quad (3)$$

$$Q_4 = D_3 \cdot H_B \cdot \overline{H_A} + \overline{D_3} \cdot \overline{H_B} \cdot H_A; \quad (4)$$

$$Q_5 = D_3 \cdot H_C \cdot \overline{H_B} + \overline{D_3} \cdot \overline{H_C} \cdot H_B; \quad (5)$$

$$Q_6 = D_3 \cdot \overline{H_C} \cdot H_A + \overline{D_3} \cdot H_C \cdot \overline{H_A}. \quad (6)$$

Представленное техническое решение приводит к упрощению схемы ИИУС электропривода, уменьшению себестоимости изделия и времени настройки, а также повышению надежности (снижение количества элементов).

Разработка имитационной модели ИИУС электропривода

Разработку имитационной модели ИИУС электропривода без контура тока выполним для ДПТ и СДПМ в среде разработки Matlab Simulink с применением блоков библиотек Simscape и SimPowerSystems.

В качестве объектов управления используются блоки Simulink библиотеки SimPowerSystems, а именно DC Machine и Permanent Magnet Synchronous Machine, представленные на рис. 2.

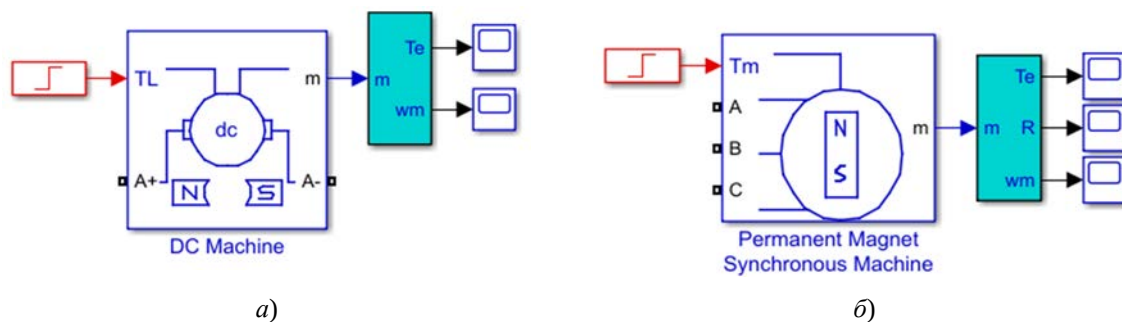


Рис. 2. Модели объектов управления (Matlab Simulink):

а – двигатель постоянного тока; б – синхронный двигатель с постоянными магнитами

Математические модели блоков DC Machine (рис. 2,а) и Permanent Magnet Synchronous Machine (рис. 2,б) описаны в литературе [4–7].

Для проведения имитационного моделирования используем параметры двигателей ДПУ-200–550-3-Д41 (DC Machine) и КМ-090-32-02 (Permanent Magnet Synchronous Machine). Основные характеристики двигателей представлены в табл. 2.

Таблице 2

Характеристики используемых двигателей

Характеристики двигателей	ДПУ-200–550-3-Д41	КМ-090-32-02
Номинальная мощность электродвигателя, Вт	550	600
Номинальная частота вращения, об/мин	3000	1500
Напряжение питания электродвигателя, В	92	150
Номинальный ток якоря электродвигателя, А	7,4	4.2
Номинальный вращающий момент, Н·м	1,7	3
Момент инерции электродвигателя, кг·м ²	0,00005	0,00075
Сопротивление обмотки якоря электродвигателя, Ом	1,2	3,5
Индуктивность обмотки якоря электродвигателя, Гн	0,001	0,0034
Количество пар полюсов	–	6
Коэффициент передачи по моменту, Н·м/А	0,29	1

Согласно структурной схеме (см. рис. 1) управление моделями двигателей (рис. 2) осуществляется идентично реальной принципиальной схеме, т.е. с помощью схемы силового инвертора (включая источник постоянного напряжения), трехпозиционного ДПР (для СДПМ), логической схемы управления силовыми транзисторами, аналоговой схемы ШИМ (включая генератор пилообразных сигналов) и блока задания управляющего напряжения.

Имитационная модель логической схемы управляющей силовыми транзисторами повторяет логические уравнения (1)–(6) и выполнена на базе блоков Logical Operator, From и Goto. При проектировании принципиальной электрической схемы РЭП логическая схема может быть реализована на программно-запоминающем устройстве (ПЗУ), отдельных логических микросхемах или микроконтроллере. На вход имитационной модели логической схемы управления транзисторами подаются выходные импульсы трехпозиционного ДПР (Ha, Hb, Hc). Выходные импульсы трехпозиционного ДПР поступают с модели 3-фазного СДПМ с трапецеидальной ЭДС (Permanent Magnet Synchronous Machine).

Модель логической схемы управления силовыми транзисторами представлена на рис. 3.

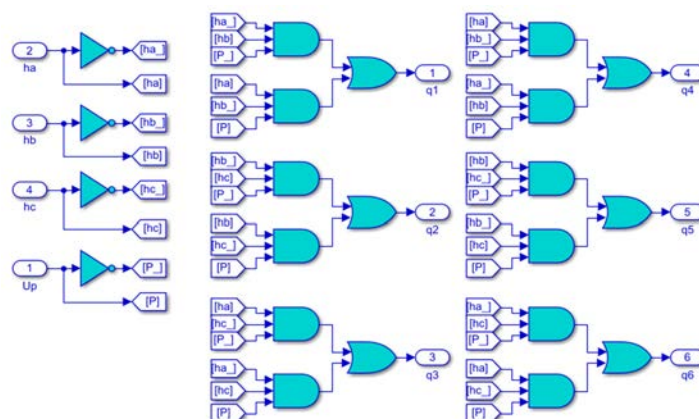


Рис. 3. Модель логической схемы (Matlab Simulink)

В случае управления ДПТ логическая схема управления силовыми транзисторами ограничивается одним инвертором.

Для проверки параметров электродвигателей и корректности работы логической схемы (рис. 3) соберем в программе Matlab Simulink схемы прямого пуска для блоков DC Machine и Permanent Magnet Synchronous Machine (рис. 4).

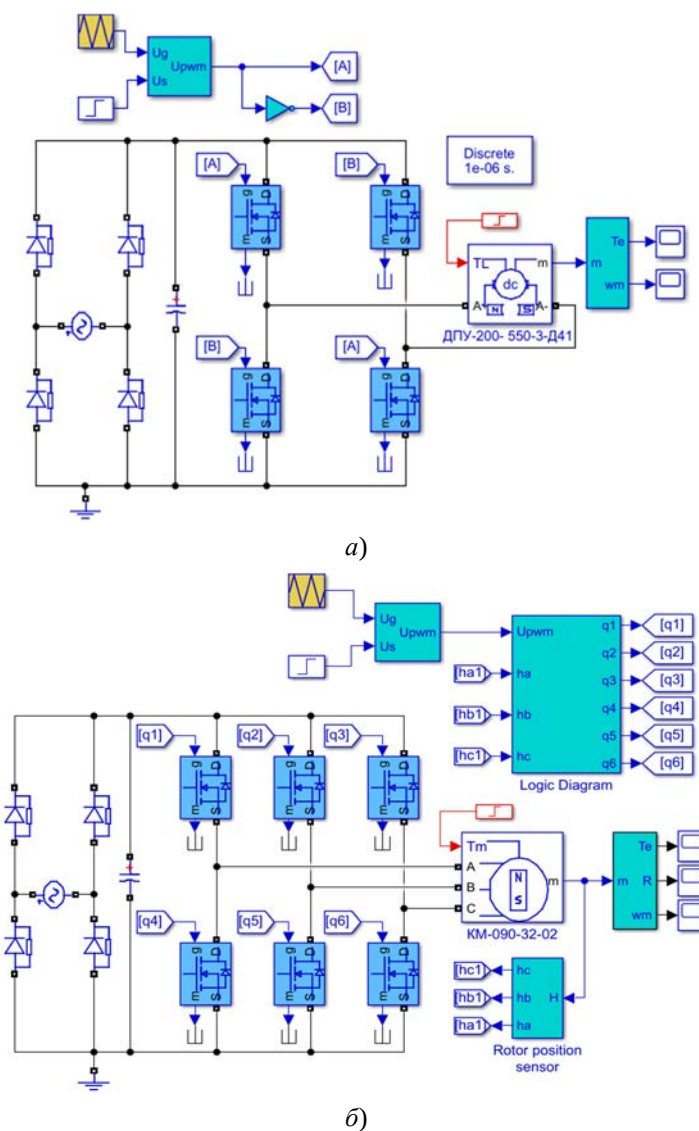


Рис. 4. Схемы прямого пуска ДПТ (а) и СДПМ (б)

Схемы прямого пуска (рис. 4) состоят из элементов типа Step, Mosfet, Diode, Series RLC Branch, Triangle Generator и др.

Исследование схем прямого пуска ДПТ и СДПМ (рис. 4) проведем при входном сигнале типа ступенька с амплитудой 10 В, частотой ШИМ равной 10 кГц и отсутствии внешнего момента. Моделирование проводилось дискретным методом интегрирования (Discrete) с шагом $0,5 \cdot 10^{-6}$. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

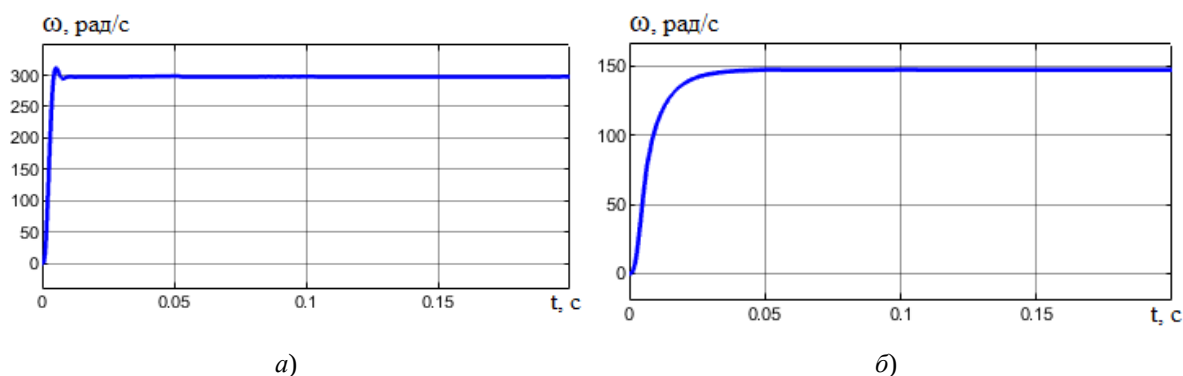


Рис. 5. Переходные процессы схем прямого пуска ДПТ (а) и СДПМ (б)

Согласно полученным результатам (рис. 5) можно сделать вывод, что модели силовых преобразователей, логических схем и другого обеспечивают корректную работу двигателей.

Используя модели схем прямого пуска (рис. 4), составим общие имитационные модели электроприводов с ИИУС без контура тока с ДПТ и СДПМ. Регулятор скорости ИИУС настраивается согласно условиям симметричного оптимума [8–10]. Разработанные имитационные модели представлены на рис. 6, 7.

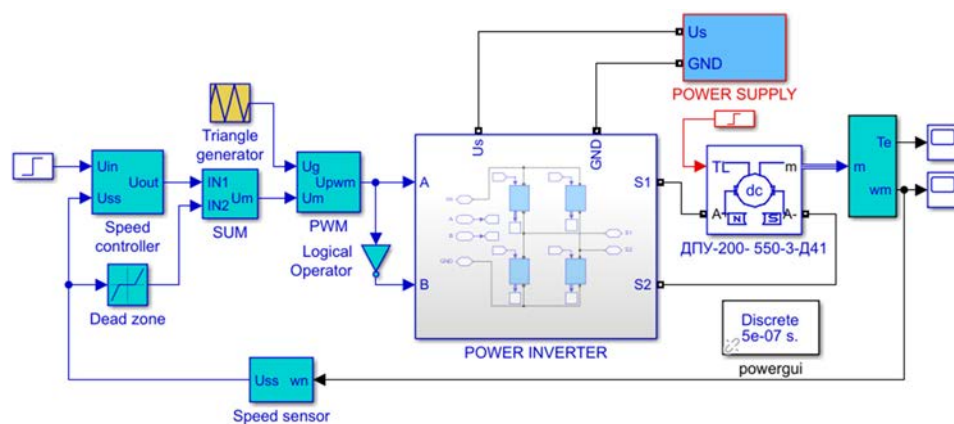


Рис. 6. Имитационная модель электропривода с ДПТ

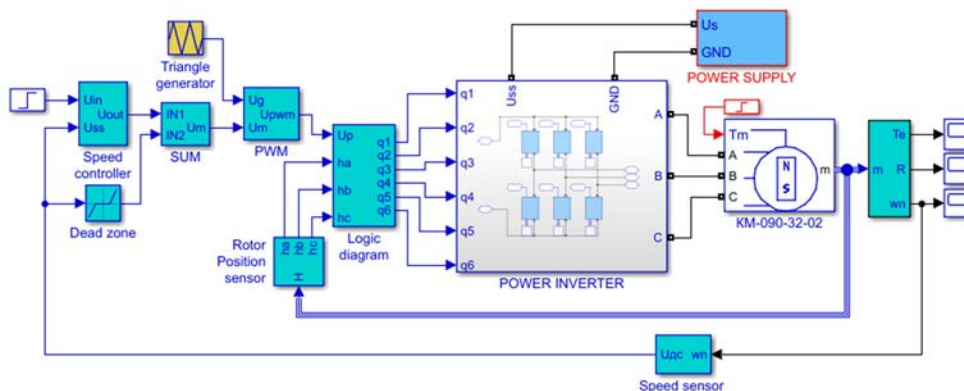


Рис. 7. Имитационная модель электропривода с СДПМ

Далее проведем исследования разработанных имитационных моделей электроприводов с ИИУС без контура тока (рис. 6, 7). Подадим на вход моделей электроприводов импульсные воздействия с амплитудами 10; 1; 0,1; 0,01 В и снимем графики переходных процессов скорости вращения электродвигателя. Результаты моделирования представлены на рис. 8–11.

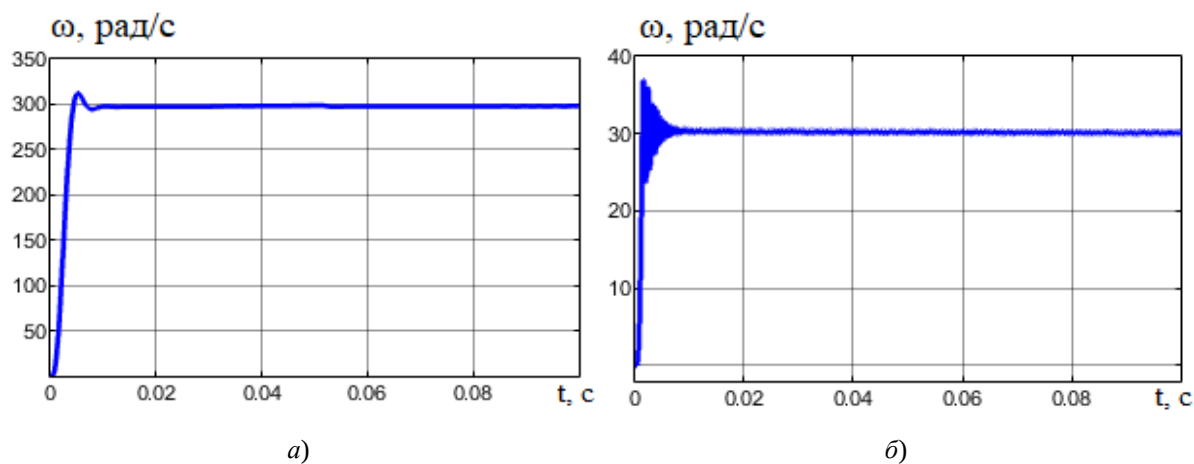


Рис. 8. Результаты моделирования электропривода с ДПТ при входном импульсе амплитудой 10 В (а) и 1 В (б)

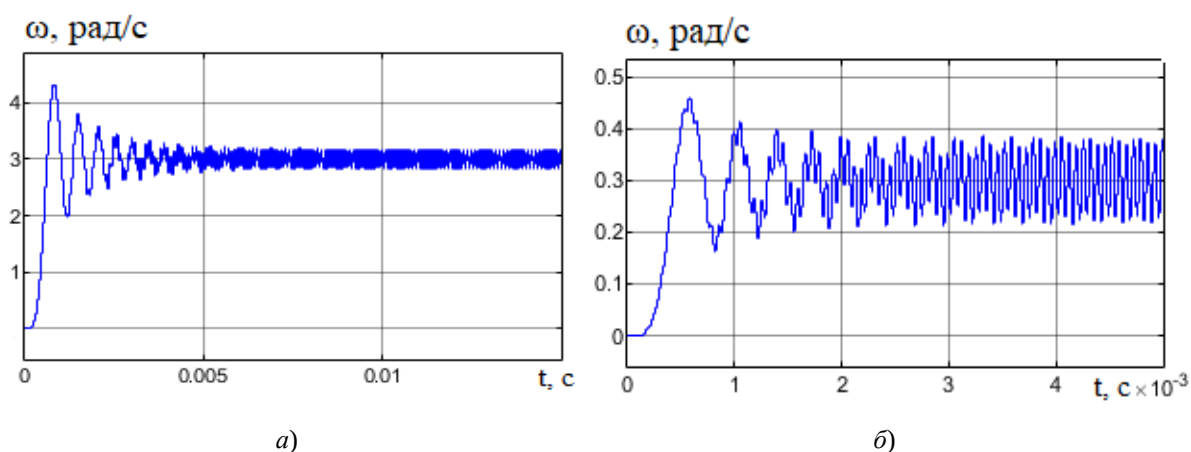


Рис. 9. Результаты моделирования электропривода с ДПТ при входном импульсе амплитудой 0,1 В (а) и 0,01 В (б)

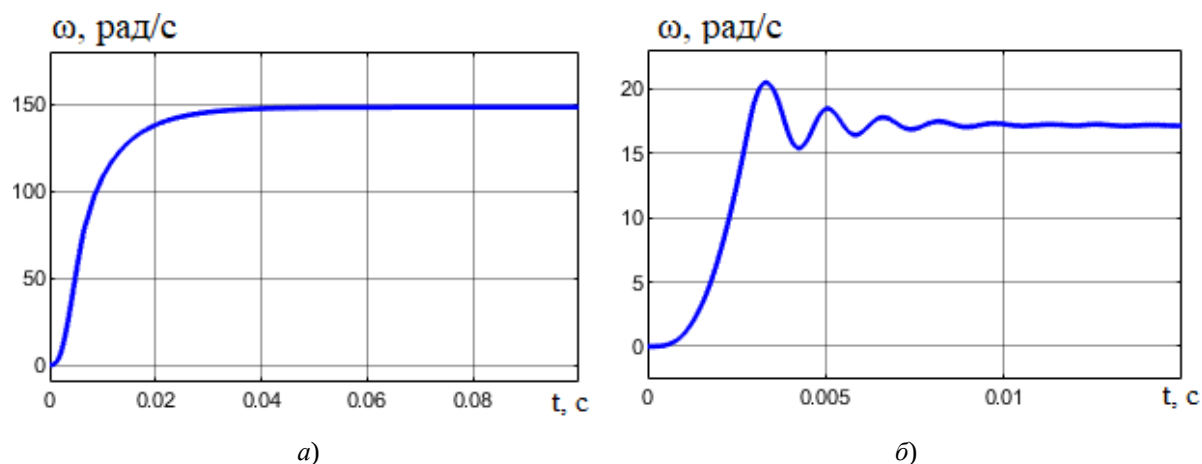


Рис. 10. Результаты моделирования электропривода с СДПМ при входном импульсе амплитудой 10 В (а) и 1 В (б)

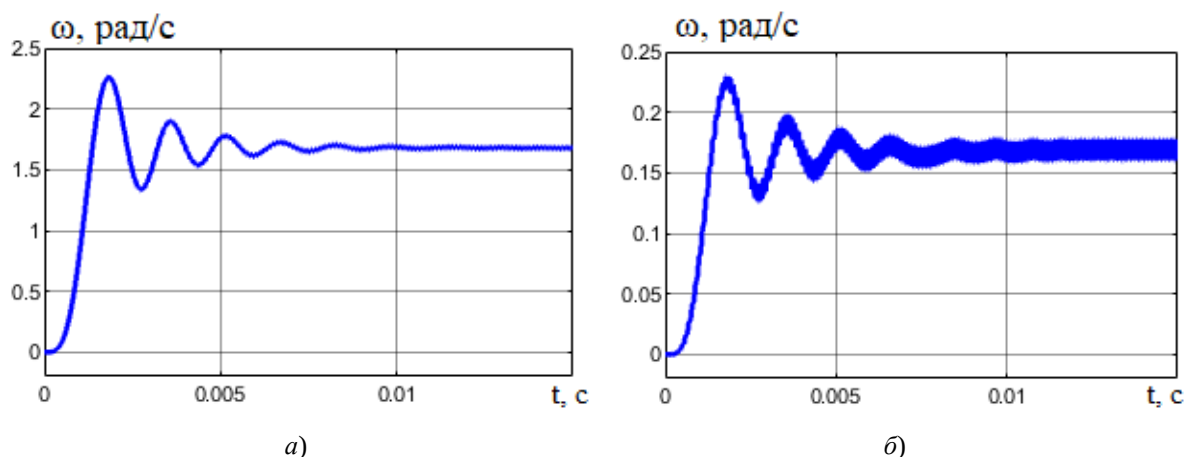


Рис. 11. Результаты моделирования электропривода с СДПМ при входном импульсе амплитудой 0,1 В (а) и 0,01 В (б)

Исходя из полученных графиков переходных процессов скорости вращения электродвигателей (см. рис. 8–11), можно сделать вывод, что представленная ИИУС электропривода без контура тока (см. рис. 1) может обеспечить диапазоны регулирования скорости от 5000 до 10000 (см. ГОСТ 27803-91).

Заключение

На основании результатов, полученных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

- разработка простых и надежных электроприводов для промышленных роботов является важной технической задачей;
- важным направлением повышения надежности электроприводов является отказ от применения контуров тока;
- наиболее перспективные электродвигатели и соответственно приводы на их основе, применяемые в составе промышленных роботов-манипуляторов, являются ДПТ и СДПТ;
- предлагаемая ИИУС электропривода без контуров тока обеспечивает в достаточной мере требования, предъявляемые к электроприводам промышленных роботов (см. ГОСТ 27803-91).

Список литературы

1. Гараев Р. А., Рогожников А. О. Перспектива использования роботов манипуляторов в различных отраслях // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы пятой Междунар. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский : Изд-во КамчатГТУ, 2022. С. 57–60.
2. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Куликова Н. Н. Повышение надежности информационно-измерительной и управляющей системы электропривода лазерных установок // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 62–71.
3. Вегера Ж. Г., Слепцов В. В. Автоматизированный электропривод. Москва : МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. 107 с.
4. Черных И. В. Моделирование электромеханических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. 288 с.
5. Aptel A., Walambe R., Joshi V. [et al.]. Simulation of a Permanent Magnet Synchronous Motor using Matlab-Simulink // Annual IEEE India Conference (INDICON). 2014.
6. Apostoia C. M. AC machines and drives simulation platform // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) : IEEE International. 2013. P. 1295–1299.
7. Chavhan M. P., Shinde S. M. Modeling and Simulation of a Controller of Brushless DC Motor for Electric Vehicle Application // National Conference on Innovation Trends in Science and Engineering. 2016. Vol. 4, iss. 7.
8. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16.
9. Мостовской М. В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схмотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–11.

10. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схематехнического моделирования // ЗиПМ. 2021. № 1. С. 22–26.

References

1. Garaev R.A., Rogozhnikov A.O. The prospect of using robotic manipulators in various industries. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: materialy pyatoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Technical operation of water transport: problems and ways of development : materials of the Fifth International scientific and technical conference*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Izd-vo KamchatGTU, 2022:57–60. (In Russ.)
2. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Kulikova N.N. Improving the reliability of the information-measuring and control system of the electric drive of laser installations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):62–71. (In Russ.)
3. Vegera Zh.G., Sleptsov V.V. *Avtomatizirovannyi elektroprivod = Automated electric drive*. Moscow: MIREA – Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet, 2022:107. (In Russ.)
4. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektromekhanicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink = Modeling of electromechanical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow: DMK Press; Saint Petersburg: Piter, 2008:288. (In Russ.)
5. Aptel A., Walambe R., Joshi V. et al. Simulation of a Permanent Magnet Synchronous Motor using Matlab-Simulink. *Annual IEEE India Conference (INDICON)*. 2014.
6. Apostoia C.M. AC machines and drives simulation platform. *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC): IEEE International*. 2013:1295–1299.
7. Chavhan M.P., Shinde S.M. Modeling and Simulation of a Controller of Brushless DC Motor for Electric Vehicle Application. *National Conference on Innovation Trends in Science and Engineering*. 2016;4(7).
8. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical assessment of metrological characteristics of information-measuring and control systems of electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):5–16. (In Russ.)
9. Mostovskoy M.V. Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit modeling. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(2):8–11. (In Russ.)
10. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing the metrological characteristics of an adjustable electric drive by the method of circuit modeling. *ZiPM = ZiPM*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Слепцов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Михаил Владимирович Мостовской

старший преподаватель кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Mikhail V. Mostovskoy

Senior lecturer of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Игорь Юрьевич Малышев

студент,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: igor-malysh2013@yandex.rus

Igor Yu. Malyshev

Student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Иван Алексеевич Соколов

студент,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: kozpova11@gmail.com

Ivan A. Sokolov

Student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Антон Павлович Куличенков

студент,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: anton.kulichenkov5@gmail.com

Anton P. Kulichenkov

Student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Георгий Константинович Сотников

студент,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: goshasot@mail.ru

Georgy K. Sotnikov

Student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 28.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 29.09.2023

Принята к публикации/Accepted 23.10.2023

УДК 629.7.017

doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-2

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

С. В. Пузанков¹, Г. И. Афонин², Д. В. Емельянов³

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

^{1, 2, 3} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важной составляющей метрологического обеспечения технических систем является поверка средств измерений, выполняемая в поверочных подразделениях, входящих в состав метрологических служб. Процедура поверки средств измерений может осуществляться как стационарно, так и в местах их эксплуатации с применением мобильных метрологических комплексов. От эффективности функционирования мобильных метрологических комплексов зависит качество функционирования технических систем в целом. Одним из процессов жизненного цикла мобильных метрологических комплексов является процесс управления рисками, который должен быть непрерывным и итерационным. Управление рисками позволяет выбирать рациональные варианты комплектования и применения мобильных метрологических комплексов по назначению с учетом вероятности и размеров возможных последствий от неблагоприятных факторов. Целью работы является оценивание влияния риска на результативность метрологического обеспечения средств измерений с применением мобильных метрологических комплексов. Актуальность темы обусловлена важностью задач обеспечения эффективности поверочной деятельности при организации работ метрологических служб. *Материалы и методы.* Исследования основываются на использовании теории вероятностей и математической статистики, теории надежности и квалиметрии применительно к задачам оценки эффективности функционирования мобильных метрологических комплексов. *Результаты.* Представлен краткий анализ управления рисками на стадиях жизненного цикла, описание мероприятий по снижению показателей риска на каждой из стадий, выбор и реализация которых может обеспечить снижение величины возможного ущерба и выполнение предъявляемых требований. *Вывод.* Представленная модель может быть использована при оценивании эффективности функционирования мобильных метрологических комплексов при организации хозяйственной деятельности ведомственных метрологических служб.

Ключевые слова: мобильный метрологический комплекс, жизненный цикл, эффективность, риск, ущерб

Для цитирования: Пузанков С. В., Афонин Г. И., Емельянов Д. В. Модель оценивания эффективности функционирования мобильного метрологического комплекса на основе риск-ориентированного подхода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 16–21. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-2

MODEL OF EVALUATION OF MOBILE METROLOGICAL COMPLEX FUNCTIONING EFFICIENCY ON THE BASIS OF RISK-ORIENTED APPROACH

S.V. Puzankov¹, G.I. Afonin², D.V. Emelyanov³

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

^{1, 2, 3} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* An important component of metrological support of technical systems is verification of measuring instruments, performed in verification departments, which are part of metrological services. Verification procedure of measuring instruments can be carried out both stationary and in places of their operation with the use of mobile metrological complexes. The efficiency of functioning of mobile metrological complexes essentially determines the quality of functioning of technical systems as a whole. One of the processes of the life cycle of mobile metrological complex is the process of risk management, which should be continuous and iterative. Risk management allows to choose rational variants of acquisition and application of mobile metrological complex by purpose taking into account probability and sizes of possible consequences from unfavorable factors. The purpose of the work is to assess the impact of risk on the performance of metrological services. The relevance of the topic is due to the importance of the tasks of ensuring the

effectiveness of verification activities in the organization of metrological services work. *Materials and methods.* The research is based on the use of probability theory and mathematical statistics, reliability theory and qualimetry as applied to the tasks of assessing the efficiency of mobile metrological complexes. *Results.* A brief analysis of risk management at the stages of the life cycle is presented, description of measures to reduce risk indicators at each of the stages, selection and implementation of which can ensure a reduction in the amount of possible damage and fulfillment of requirements. *Conclusion* The presented model can be used at estimation of efficiency of functioning of mobile metrological complexes at the organization of economic activity of departmental metrological services.

Keywords: mobile metrological complex, life cycle, efficiency, risk, damage

For citation: Puzankov S.V., Afonin G.I., Emelyanov D.V. Model of evaluation of mobile metrological complex functioning efficiency on the basis of risk-oriented approach. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):16–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-2

Введение

В условиях наличия неопределенности и неполноты информации, используемой для принятия управленческого решения, необходимо рассматривать множество вариантов развития событий и учитывать влияние большого количества факторов для выбора оптимального плана действий, что неизбежно приводит к возникновению рисков. Оценивание риска является основой для принятия управленческих решений, в том числе на разработку, проектирование и эксплуатацию сложных технических систем. Под риском понимается следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей, в случае функционирования мобильных метрологических комплексов (ММК) – невыполнение запланированного объема работ по метрологическому обслуживанию средств измерений.

Одним из возможных направлений преодоления данного затруднения является переход к моделям функционирования ММК, базирующихся на риск-ориентированном подходе. Данный подход находит в последние годы достаточно широкое применение, как в нашей стране, так и за рубежом. Все больший интерес риск-ориентированный подход вызывает при решении задач метрологического обеспечения деятельности различных организаций [1–3].

Управление рисками на стадиях жизненного цикла ММК

Жизненный цикл (ЖЦ) ММК представляет собой совокупность взаимообусловленных процессов последовательного изменения состояния ММК от начала исследования и обоснования его разработки до окончания его эксплуатации [1]. Указанные процессы ЖЦ объединяются в стадии. Стадия ЖЦ ММК представляет собой часть ЖЦ, которая характеризуется определенным состоянием ММК, совокупностью предусмотренных стадией работ и их конечными результатами. ЖЦ – это не временной период существования ММК (одного наименования и обозначения), а процесс последовательного изменения состояния, обусловленный видом производимых на ММК воздействий. При этом ММК конкретного типа может одновременно находиться в нескольких стадиях ЖЦ, например в стадиях производства, эксплуатации и капитального ремонта.

В общем случае выделяются пять стадий ЖЦ: исследование и обоснование разработки; разработка; производство; эксплуатация; капитальный ремонт [4]. Для исследования системы должна быть создана модель ЖЦ, которая включает одну или несколько моделей каждой стадии. На каждой стадии принимаются решения и при этом необходимо учитывать влияние неопределенностей и связанные с ними риски.

Управление риском, или менеджмент риска (риск-менеджмент) – это скоординированные действия по управлению объектом с учетом риска [5]. В процессе управления рисками проводятся определение, оценивание, обработка и мониторинг рисков, возникающих на стадиях ЖЦ. На каждой стадии ЖЦ ММК должны быть решены следующие задачи по оцениванию риска:

- разработка планов идентификации, оценивания и уменьшения рисков;
- идентификация текущих рисков, определение и выполнение мероприятий по их уменьшению;
- определение текущих рисков, определение и выполнение мероприятий по уменьшению рисков;
- мониторинг характеристик функционирования, идентификация, классификация и составление отчетов об отклонениях, недостатках, отказах, последствиях и т.д.

Оценивание эффективности функционирования ММК с учетом риска

Под эффективностью в соответствии с работами [6, 7] понимают комплексное операционное свойство целенаправленного процесса функционирования, характеризующее его приспособленность к выполнению стоящей перед системой задачи. Наиболее полно качество сложных технических систем, к которым относятся и ММК, можно оценить по совокупности технико-экономических показателей, характеризующих процессы их целевого функционирования – показателей эффективности [8].

Требования к качеству и эффективности функционирования ММК должны задаваться на стадии исследования и обоснования разработки, обеспечиваться на стадии производства и сохраняться на стадии эксплуатации. На всех стадиях ЖЦ ММК сначала необходимо задать, обосновать необходимый или достигнутый уровень качества, а потом воздействовать на эффективность функционирования различными методами и способами.

Эффективность функционирования ММК зависит от уровня эффективности достигаемого на каждой из стадий ЖЦ:

$$\Theta = f(\Theta_i, k_i, m_i), i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где Θ_i – показатель эффективности функционирования ММК на стадиях ЖЦ; k_i – коэффициент, учитывающий качество мероприятий по повышению эффективности функционирования ММК на стадиях ЖЦ; m_i – коэффициент, учитывающий качество выполняемых мероприятий и потери эффективности из-за ошибок, допущенных на стадиях ЖЦ; N – количество стадий ЖЦ.

На $(i+1)$ -й стадии ЖЦ эффективность функционирования ММК определяется выражением

$$\Theta_{i+1} = \Theta_i m_{i+1} + (1 - \Theta_i) k_{i+1} m_{i+1}. \quad (2)$$

При оценивании эффективности функционирования ММК необходимо учитывать множество неопределенностей, которые в общем случае характеризуют состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и их вероятностей. При планировании применения ММК в силу тех или иных случайных факторов и причин фактически достигаемый результат деятельности становится случайным, а результат работ может отличаться от запланированного. Таким образом, лицо принимающее решение на задействование ММК по целевому предназначению сталкивается с необходимостью учета риска. Риск в соответствии с принятыми подходами будем характеризовать путем описания возможного события, обстоятельств и их последствий (или их сочетания), и соответствующей вероятности наступления этого события [9].

Под эффективностью функционирования ММК будем понимать нормированный к затратам результат оказания услуг на заданном интервале времени при соответствующем уровне риска. Показатель эффективности (Θ) для каждой стадии ЖЦ ММК можно записать в виде функционала

$$\Theta = f(K, T, C, R), \quad (3)$$

где K – показатели качества услуг (применительно к основной производственной деятельности ММК целенаправленным процессом их функционирования является процесс проверки средств измерений); T – время функционирования; C – ресурсы, затрачиваемые на оказание услуг; R – риск.

В работе [10] эффективность функционирования систем предлагается оценивать с помощью функционала:

$$\Theta = \sum_{S \in G_S} W_S P_S, \quad (4)$$

где W_S – нормированный показатель эффективности функционирования системы в состоянии S ; P_S – вероятность S -го состояния; G_S – пространство состояний системы.

В качестве показателя эффективности функционирования ММК предложено использовать количество «результативных работ» АИ, которое определяется в соответствии с выражением:

$$A_s = I_s T_s P_s, \quad (5)$$

где I_s – производительность ММК в состоянии S ; T_s – время нахождения ММК в состоянии S ; P_s – вероятность того, что ММК будет функционировать в состоянии S в течение времени T_s .

С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$\Theta = \sum_{S \in G_s} I_s T_s P_s P_s. \quad (6)$$

При оценивании эффективности функционирования ММК в соответствии с выражением (6) будет учитываться эффект «накопления результативной работы».

В результате воздействия дестабилизирующих факторов (изменение свойств и характеристики самих ММК, параметров объектов обслуживания, условий выполнения работ) эффективность ММК будет уменьшаться, т. е. системе будет наноситься ущерб. Величина риска определяется выражением:

$$R_s = C_s P_{C_s}, \quad (7)$$

где R_s – риск ММК в состоянии S ; C_s – величина ущерба при переходе ММК в состоянии S ; P_{C_s} – вероятность нанесения ущерба C_s .

Суммарный риск при условии независимости угроз и уязвимостей определяется выражением

$$R_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{s_{ij}} P_{s_{ij}}, \quad (8)$$

где $C_{s_{ij}}$ – ущерб, наносимый ММК при наличии i -й уязвимости и реализации j -й угрозы; $P_{s_{ij}}$ – вероятность реализации j -й угрозы при наличии i -й уязвимости.

Приняв в качестве параметра ущерба величину уменьшения количества результативной работы $C_s = (I - I_s) T_s$, получим выражение для определения эффективности функционирования ММК:

$$\Theta = I T P_T - \sum_{S \in G_s} R_s T_s, \quad (9)$$

где $R_s = C_s P_{C_s} P_s$ – величина риска на интервале длительностью T_s .

Выбор исходного варианта комплектования ММК на стадии замысла или разработки может обеспечить как выполнение требований за счет выбора новых (перспективных) решений, так и привести к снижению показателей эффективности при не полном учете всех влияющих дестабилизирующих факторов. Снижение показателей эффективности возможно и на более поздних стадиях ЖЦ.

Одним из этапов процесса управления рисками является этап обработки риска, который включает: выбор одного или нескольких вариантов мероприятий по обработке риска; планирование проведения мероприятий по обработке риска; проведение мероприятий по обработке риска. При выборе мероприятий по обработке риска необходимо оценивать эффект от их реализации и требуемые затраты. Эффективность мероприятий может оцениваться по величине устраненного риска ΔR_s :

$$\Delta R_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \Delta R_{ij}, \quad (10)$$

где ΔR_{ij} – величина снижения риска от j -й угрозы при наличии i -й уязвимости.

Величина снижения риска ΔR_{ij} определяется выражениями

$$\Delta R_{ij} = \Delta c_{ij} \Delta P_{ij}, \quad (11)$$

$$\Delta R_{ij} = c_{ij} q_{ij}, \quad (12)$$

где q_{ij} – вероятность того, что i -я угроза не будет реализована при наличии j -й уязвимости.

Эффективность мероприятий, направленных на уменьшения величины ущерба, определяется с использованием выражения (11). В случае принятия мер по снижению вероятности реализации угроз для определения величины снижения рисков ΔR_{ij} используется выражение (12).

Выбор и реализация соответствующих мероприятий по снижению показателей риска на каждой из стадий может обеспечить снижение величины возможного ущерба и выполнение предъявляемых требований. Увеличение числа стадий ЖЦ, на которых осуществляются мероприятия по управлению риском, может привести к снижению потерь, но при этом необходимо учитывать и возможное увеличение затрат. Наибольший эффект от увеличения числа контролируемых стадий ЖЦ следует ожидать при создании сложных, уникальных систем, в то время как при создании простых, хорошо отработанных систем целесообразно уменьшать число таких стадий.

Заключение

Представленная модель может быть использована при оценивании рисков выполнения метрологического обслуживания средств измерений с использованием ММК при их планировании, комплектовании ММК рабочими местами, выборе рациональных или оптимальных вариантов организации деятельности выездных метрологических групп в составе ведомственных метрологических служб.

В дальнейших исследованиях следует рассмотреть представленную модель в условиях необходимости перераспределения имеющихся ограниченных ресурсов для проведения операций метрологического обслуживания средств измерений с помощью ММК.

Список литературы

1. Статинов В. В., Серых И. Р., Чернышева Е. В., Дегтярь А. Н. Риск-ориентированный подход в области промышленной безопасности // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 12. С. 67–72.
2. Коточигов Р. В., Епифанов Е. Н., Чирков П. О. [и др.]. К вопросу о риск-ориентированном подходе при проведении проверок объектов защиты // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2017. Т. 1. С. 862–864.
3. Федосов А. В., Закирова В. А., Абдрахимов И. Р. Перспективы применения риск-ориентированного подхода в области промышленной безопасности // Нефтегазовое дело. 2018. № 1. С. 145–161.
4. Солдатенко В. С., Ширямов О. А. Техническая эксплуатация и ремонт военной измерительной техники : учеб. пособие. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. 162 с.
5. Петров Г. Д., Птушкин А. И., Звягин В. И. [и др.]. Жизненный цикл и эксплуатационное качество вооружения и военной техники : учебник / под ред. М.М. Пенькова. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 275 с.
6. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. Л. : Министерство обороны СССР, 1989. 647 с.
7. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 502 с.
8. Ефремов А. С., Васюкович Д. С., Пузанков С. В. Оценка технико-экономической эффективности функционирования системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 47–55. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-5
9. Кравцов А. Н., Солдатенко В. С., Пузанков С. В. Математическая модель определения параметров риск-ориентированной стратегии метрологического обслуживания комплекта средств измерений // Вестник метролога. 2023. № 1. С. 3–10.
10. Ушаков И. А. Эффективность функционирования сложных систем // О надежности сложных технических систем. М. : Сов. радио, 1966.

References

1. Statinov V.V., Serykh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar' A.N. Risk-oriented approach in the field of industrial safety. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2018;(12): 67–72. (In Russ.)
2. Kotochigov R.V., Epifanov E.N., Chirkov P.O. et al. On the issue of a risk-oriented approach when conducting inspections of protection facilities. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy*

chrezvychaynykh situatsiy = Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies. 2017;1:862–864. (In Russ.)

3. Fedosov A.V., Zakirova V.A., Abdrakhimova I.R. Prospects for the application of a risk-based approach in the field of industrial safety. *Neftegazovoe delo = Oil and gas business.* 2018;1:145–161. (In Russ.)
4. Soldatenko V.S., Shiryamov O.A. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya i remont voennoy izmeritel'noy tekhniki: ucheb. posobie = Technical operation and repair of military measuring equipment: textbook.* Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2020:162. (In Russ.)
5. Petrov G.D., Ptushkin A.I., Zvyagin V.I. et al. *Zhiznennyy tsikl i ekspluatatsionnoe kachestvo vooruzheniya i voennoy tekhniki: uchebnyk = Life cycle and operational quality of weapons and military equipment : textbook.* Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2016:275. (In Russ.)
6. Petukhov G.B. *Osnovy teorii effektivnosti tselenapravlennykh protsessov. Ch. 1. Metodologiya, metody, modeli = Fundamentals of the theory of the effectiveness of purposeful processes. Part 1. Methodology, methods, models.* Leningrad: Ministerstvo oborony SSSR, 1989:647. (In Russ.)
7. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremlennykh sistem = Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems.* Moscow: AST, 2006:502. (In Russ.)
8. Efremov A.S., Vasyukovich D.S., Puzankov S.V. Assessment of the technical and economic efficiency of the functioning of the system of verification bodies. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):47–55. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-5
9. Kravtsov A.N., Soldatenko V.S., Puzankov S.V. A mathematical model for determining the parameters of a risk-oriented strategy for metrological maintenance of a set of measuring instruments. *Vestnik metrologa = Bulletin of the metrologist.* 2023;(1):3–10. (In Russ.)
10. Ushakov I.A. Efficiency of complex systems functioning. *O nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem = On the reliability of complex technical systems.* Moscow: Sov. radio, 1966. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Владимирович Пузанков

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

Sergei V. Puzankov

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

Глеб Игоревич Афонин

кандидат технических наук, преподаватель кафедры
метрологического обеспечения вооружения,
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Gleb I. Afonin

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

Денис Вячеславович Емельянов

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

Denis V. Emelyanov

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

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

Поступила в редакцию / Received 12.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2023

Принята к публикации / Accepted 09.10.2023

ЦИФРОВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В. Ю. Трофимов¹, Л. Е. Шахмейстер²

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

^{1,2}l.e.shahmejster@onegroup.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В бортовой аппаратуре автономных информационных и измерительных систем широкое применение нашли датчики различных физических величин, информация об измеряемом параметре в которых содержится в частоте выходного сигнала. Обработка сигналов датчика осуществляется по заданным алгоритмом, предусматривающим выполнение различных математических операций, одной из которых является деление частоты. Аппаратная реализация этой операции может быть выполнена на нескольких корпусах интегральных микросхем стандартной логики. Уменьшение этих аппаратных затрат является актуальной задачей, направленной на уменьшение габаритных размеров электронных блоков автономных информационных и измерительных систем и повышения их надежности. *Материалы и методы.* Одним из путей решения указанной задачи является применение специализированной микросхемы времяимпульсного и цифрочастотного преобразования 512ПС8ВК. *Результаты.* Рассмотрено построение цифровых делителей частоты на микросхеме 512ПС8ВК. Приведены выражения для коэффициентов деления частоты. *Вывод.* Микросхема 512ПС8ВК может использоваться для построения делителей частоты с фиксированными, программируемыми и переменными целочисленными и дробными коэффициентами деления со значениями от 4 до 2^{24} .

Ключевые слова: цифровые делители частоты с фиксированным, программируемым и переменным коэффициентом деления, автономные информационные и измерительные системы, микросхема цифрочастотного и времяимпульсного преобразования 512ПС8ВК

Для цитирования: Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Цифровые делители частоты в автономных информационных и измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 22–31. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-3

DIGITAL FREQUENCY DIVIDERS IN AUTONOMOUS INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

V.Yu. Trofimov¹, L.E. Shakhmeyster²

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

^{1,2}l.e.shahmejster@onegroup.ru

Abstract. *Background.* Sensors of various physical quantities, the information about the measured parameter in which is contained in the frequency of the output signal, are widely used in the on-board equipment of autonomous information and measurement systems (AIS). Sensor signal processing is carried out according to a given algorithm, which provides for the execution of various mathematical operations, one of which is frequency division. The hardware implementation of this operation can be performed on several cases of integrated circuits of standard logic. Reducing these hardware costs is an urgent task aimed at reducing the overall dimensions of AIS electronic units and increasing their reliability. *Materials and methods.* One of the ways to solve this problem is the use of a specialized chip for time-pulse and digital-frequency conversion of 512PS8BK. *Results.* The construction of digital frequency dividers on a 512PS8VC chip is considered. Expressions for frequency division coefficients are given. *Conclusion.* The 512PS8BK chip can be used to build frequency dividers with fixed, programmable and variable integer and fractional division coefficients with values from 4 to 2^{24} .

Keywords: digital frequency dividers with fixed, programmable and variable division coefficients, autonomous information and measurement systems, digital frequency and time pulse conversion chip 512PS8BK

For citation: Trofimov V.Yu., Shakhmeyster L.E. Digital frequency dividers in autonomous information and measurement systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):22–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-3

В бортовой аппаратуре автономных информационных и измерительных систем (АИИС) широкое применение нашли датчики различных физических величин, в частности, датчики ускорения, в качестве которых могут использоваться датчики, изготовленные по МЭМС-технологиям [1]. Хорошими точностными характеристиками обладают датчики, информация об измеряемом параметре которых содержится в частоте выходного сигнала. Это могут быть разработанные для АИИС акселерометры 043Б1 и АЛЕ 055 [2, 3]. Обработка сигналов датчика осуществляется по заданному алгоритму, предусматривающим выполнение различных математических операций, одной из которых является деление частоты. Аппаратная реализация этой операции может быть выполнена на нескольких корпусах интегральных микросхем стандартной логики, включая триггеры и счетчики импульсов [4]. Уменьшение этих аппаратных затрат является актуальной задачей, направленной на уменьшение габаритных размеров электронных блоков АИИС и повышение их надежности.

Решение указанной задачи может осуществляться использованием для выполнения операции деления частоты специализированной МС цифрочастотного и времяимпульсного преобразования 512ПС8ВК [5]. Структурная схема этой МС и ее возможности реализации времяимпульсных преобразований рассмотрены в работе [6].

Обозначение и наименование выводов МС 512ПС8ВК приведены на рис. 1.



Рис. 1. Обозначение и выводы МС 512ПС8К

МС 512ПС8 включает в свой состав последовательно соединенные 12-разрядный делитель частоты и 12-разрядный счетчик импульсов [6]. Счетчик импульсов реверсивный. На суммирующий вход внутреннего счетчика импульсов МС могут поступать импульсы с выхода внутреннего делителя частоты и входа МС K_+ (Плюс корректировка), а на вычитающий – с генератора, подключаемого к выводу $G1$ (Вход генератора), и входа МС K_- (Минус корректировка). Наличие в МС делителя и счетчика импульсов, а также возможность различного их включения позволяют реализовать операцию деления частоты на различные коэффициенты от 4 до 2^{24} , часть из которых может быть дробной.

Выходные сигналы МС в режиме делителя частоты могут сниматься с выходов BD (Выход делителя), PB (Предварительная команда) и B (Выход), при этом коэффициенты деления частоты, подаваемой на вход $G1$ МС, $K_{д1}$, $K_{д2}$, $K_{д3}$ соответственно.

Рассмотрим получение некоторых возможных фиксированных, определяемых подключением выводов МС, коэффициентов деления частоты.

Варианты подключения выводов МС в режиме делителя частоты показаны в табл. 1.

Для запуска МС и появления импульсов на выходах BD , B и PB МС необходимо подать на ее вход STR (Пуск) импульс логической «1» длительностью

$$t_n > T_{BD}, \quad (1)$$

где t_n – длительность пускового импульса (логическая «1»), подаваемого на вход МС STR ; T_{BD} – период импульсов на выходе МС BD , равный периоду импульсов генератора, подаваемых на вход $G1$ МС, умноженному на коэффициент деления $K_{д1}$.

Таблица 1

Подключение выводов МС 512ПС8ВК в режиме делителя частоты

Вариант	Подключение выводов МС						Коэффициенты деления (формулы)	
	MR	K	K_-	K_+	$A1$	$A2$	$K_{д1}$	$K_{д2}, K_{д3}$
1	0 0	0 или 1	0 или 1	0 или 1	0; 1	(2)	(2)	(5)
2				BD				(6)
3				$G2 (G3)$				(7)
4				0 или 1	PB, B	(4, а, 4, б)	(5)	
5				BD			(6)	
6	t_y	1	$N_{y-} \text{ имп.}$	$N_{y+} \text{ имп.}$	0 или 1	0 или 1	(9)	–
7			BD	0 или 1			(10,11)	–
8			$G1 (G2, G3)$				(12)	–
9			0 или 1	$G1 (G2, G3)$			(13)	–

Коэффициент деления $K_{д1}$ определяется сигналами на выводах A1 (*Исключение триггера*), A2 (*Исключение 2-х триггеров*) в соответствии с выражением

$$K_{д1} = (A1 \wedge A2)2^9 + (A1 \wedge \overline{A2})2^{10} + (\overline{A1} \wedge A2)2^{11} + (\overline{A1} \wedge \overline{A2})2^{12}, \quad (2)$$

где A1, A2 – логические сигналы, подаваемые на входы A1, A2 МС соответственно; $\overline{A1}$, $\overline{A2}$ – инверсии логических сигналов, подаваемых на входы A1, A2 МС соответственно; $(\dots \wedge \dots)$ – цифровое значение, соответствующее логической операции «И».

В этом и других последующих выражениях, содержащих как логические, так и арифметические операции, результат логических операций соответствует цифровому значению арифметических операций. Если в процессе работы МС подаваемые на выводы A1, A2 сигналы не меняются, то в соответствии с приведенной формулой (2) коэффициент деления $K_{д1}$ может принимать значения $K_{д1} = 2^9, 2^{10}, 2^{11}$ или 2^{12} . Это соответствует вариантам 1–3 подключения выводов МС табл. 1.

Близкие к этим значениям, в частности дробные, могут быть получены изменением подаваемых на выводы МС A1, A2 сигналов в процессе работы делителя, что достигается соединением выводов A1, A2 МС с ее выводом PB или B (варианты 4, 5 табл. 1).

Условием появления импульсов на выводах PB или B является

$$T_B \geq t_n > T_{BD}, \quad (3)$$

где T_B – период выходных импульсов на выходе B МС.

Выполнить это условие можно, соединив выход B МС с ее входом STR через инвертор. В этом случае коэффициент деления $K_{д1}$ при соединении выводов A1, A2 с одним из выходов PB или B определяется выражением

$$K_{д1} = \frac{(2^{12} - b)k1 + bk2}{2^{12}} = k1 + \frac{b(k2 - k1)}{2^{12}}, \quad (4a)$$

где b – длительность импульса на выходах МС, исчисляемая количеством входных импульсов, равная 1 при соединении вывода A1 и (или) A2 МС с выводом B и 16 при соединении с выводом PB; $k1, k2$ – коэффициенты деления делителя частоты, определяемые выражением (2), соответственно при отсутствии и наличии выходной команды на соединенных с выводами A1, A2 МС выводах B или PB.

При подключении к выводам МС $A1$, $A2$ обоих выводов B и PB коэффициент деления определяется выражением

$$K_{д1} = \frac{(2^{12} - 16)k1 + 15kPB + 2^9}{2^{12}}, \quad (46)$$

где kPB – коэффициент деления, определяемый выражением (2) при наличии выходного сигнала в виде логической «1» на выводе PB .

Для примера рассмотрим случай соединения вывода $A1$ с выходом PB МС, а вывода $A2$ с шиной питания (логический "0").

При отсутствии сигнала логической «1» на выводе PB МС коэффициент деления делителя частоты в соответствии с выражением (2) для $A1 = 0$, $A2 = 1$ равен $K_{д1} = k1 = 2^{10}$.

При появлении сигнала логической «1» на выводе PB МС, $A1 = 1$, $A2 = 1$ коэффициент деления делителя частоты $K_{д1} = k2 = 2^9$.

В соответствии с выражением (4а)

$$K_{д1} = \frac{(2^{12} - 16)2^{10} + 16 \cdot 2^9}{2^{12}} = 1022.$$

При соединении вывода $A1$ не с выводом PB , а с выводом B

$$K_{д1} = \frac{(2^{12} - 1)2^{10} + 1 \cdot 2^9}{2^{12}} = 1023 \frac{7}{8}.$$

Таким образом, кроме коэффициента деления, соответствующего по выражению (2) значениям 2 в степени (9 – 12), варьированием подключений выводов $A1$, $A2$ к выводам B и PB , могут быть получены дополнительные, в том числе и дробные, значения $K_{д1}$. Эти значения близки к значениям, определяемым выражением (2). Незначительные изменения коэффициента деления $K_{д1}$ могут использоваться для точной настройки коэффициента деления.

При соединениях, соответствующих вариантам 4, 5 табл. 1, возможны следующие коэффициенты деления $K_{д1}$, вычисленные по формулам (4а) и (4б):

$$1022; 1023 \frac{7}{8}; 2042; 2047 \frac{5}{8}; 4082; 4083 \frac{7}{8}; 4084; 4087 \frac{5}{8}; 4088; 4095 \frac{1}{8}; 4095 \frac{1}{4}; 4095 \frac{1}{2}.$$

При соединении выводов МС B или PB с выводами $A1$, $A2$ происходит неравномерное формирование выходных импульсов делителя внутри пачки импульсов общим числом, равным емкости счетчика импульсов. Рассчитанные по формулам (4а) и (4б) коэффициенты деления $K_{д1}$ являются средними значениями за число импульсов, равное емкости счетчика (2^{12} импульсов).

Для вариантов 1, 4 табл. 1 коэффициенты деления $K_{д2}$, $K_{д3}$ на выходах PB и B МС равны

$$K_{д2} = K_{д3} = 2^{12} K_{д1}. \quad (5)$$

Максимальное значение коэффициентов деления частоты $K_{д2\max}$, $K_{д3\max}$ при использовании выводов B и PB $K_{д2\max} = K_{д3\max} = 2^{24}$.

Если вывод корректировки K_+ соединить с выходом делителя частоты BD (варианты 2, 5 табл. 1), то на суммирующий вход внутреннего реверсивного счетчика будут поступать импульсы с делителя частоты как по внутренней цепи микросхемы, так и по внешней по выводу K_+ . Внутри МС имеется схема синхронизации, разделяющая по времени импульсы, приходящие по внутренней и внешней цепям. Это приводит к тому, что на реверсивный счетчик

импульсов при заполнении делителя частоты приходит не один, а два импульса. В этом случае связь между коэффициентами деления $K_{д1}$ и $K_{д2}$ определяется выражением

$$K_{д2} = 2^{11} K_{д1}. \quad (6)$$

Меньшие коэффициенты деления $K_{д2}$ могут быть получены при соединении вывода коррективки K_+ с одним из выходов генератора $G2$ (*Выход генератора*) или $G3$ (*Инверсный выход генератора*). Такое соединение соответствует варианту 3 табл. 1. В этом варианте на вход реверсивного счетчика будут поступать одновременно с импульсами с частотой генератора, деленной на коэффициент деления $K_{д1}$, импульсы с частотой генератора, деленной на 8. Деление частоты генератора на 8 связано с внутренней схемой синхронизации МС, пропускающей на вход реверсивного счетчика импульсы частотой не выше частоты генератора, деленной на 8. При этом коэффициенты деления частоты на выходах B и PB МС равны

$$K_{д2} = 2^{15} \frac{K_{д1}}{K_{д1} + 8}. \quad (7)$$

Это для различных подключений выводов $A1$, $A2$ соответствует значениям $K_{д2}$: $32263 \frac{57}{65}, 32513 \frac{127}{129}, 32679 \frac{235}{739}, 32704 \frac{64}{513}$.

Коэффициенты деления $K_{д2}$ близки к значениям $2^{15} = 32768$.

Коэффициент деления частоты $K_{д3}$ на выходе PB МС равен коэффициенту деления $K_{д2}$ на выходе B МС. Разница лишь в длительности импульсов.

При соединении через инвертор пускового входа МС STR с выходом B длительность импульсов на выводе B равна одному, а на выводе PB 16 периодам импульсов делителя.

Рассмотрим возможность реализации схемы с программируемым внешними сигналами коэффициентом деления частоты. Этот коэффициент деления может быть получен на двух счетчиках импульсов, как это показано на рис. 2.

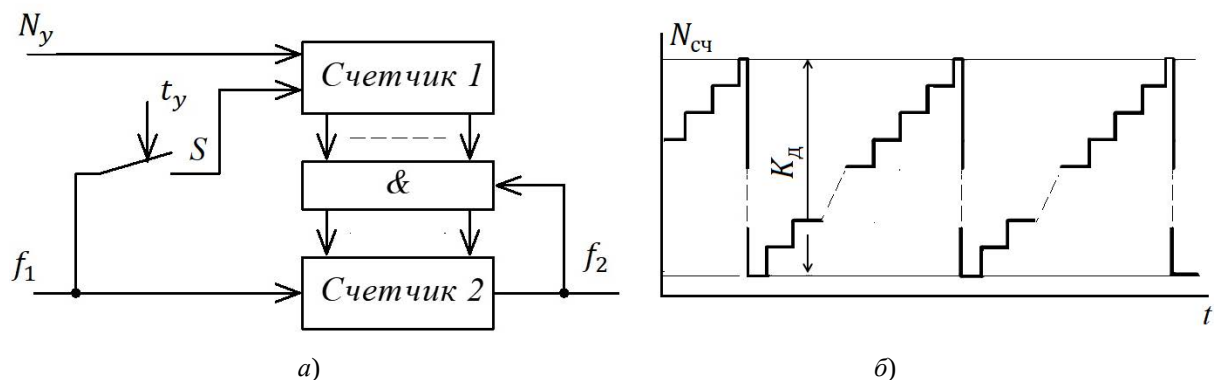


Рис. 2. Программируемый коэффициент деления:
а – схема; б – циклограмма

В состав схемы рис. 2,а входят два счетчика импульсов, логические элементы «И» (&) и ключ S . Состояние счетчика 1 определяет коэффициент деления схемы. Счетчик 2 непосредственно осуществляет деление поступающей на него частоты f_1 . Логическая схема «И» обеспечивает перезапись записанного в счетчик 1 числа импульсов в счетчик 2. Установка требуемого коэффициента деления осуществляется записью необходимого числа импульсов в счетчик 1. Эта запись может осуществляться путем замыкания ключа S на время t_y . При этом в счетчик 1 поступят импульсы входной частоты f_1 . Запись в счетчик 1 может также осуществляться подачей на его вход N_y импульсов.

Дальнейшая работа делителя аналогична работе МС в режиме контроля введенных данных при времяимпульсном преобразовании [6]. При заполнении счетчика 2 на его выходе появляется сигнал, по которому состояние счетчика 1 переписывается в счетчик 2, как это показано на циклограмме рис. 2,б. Емкости счетчиков 1, 2 одинаковы. Коэффициент деления $K_{д1}$ делителя частоты рис. 2,а равен

$$K_{д1} = \frac{f_2}{f_1} = N_{сч} - \text{round}(t_y f_1) - N_y, \quad (8)$$

где f_1, f_2 – входная и выходная частота соответственно; $N_{сч}$ – состояние счетчика 2, при котором на его выходе появляется сигнал и осуществляется перезапись в него состояния счетчика 1; $\text{round}(\dots)$ – округление до целого числа.

Схема рис. 2,а может быть реализована на МС 512ПС8ВК. Это показано на рис. 3.

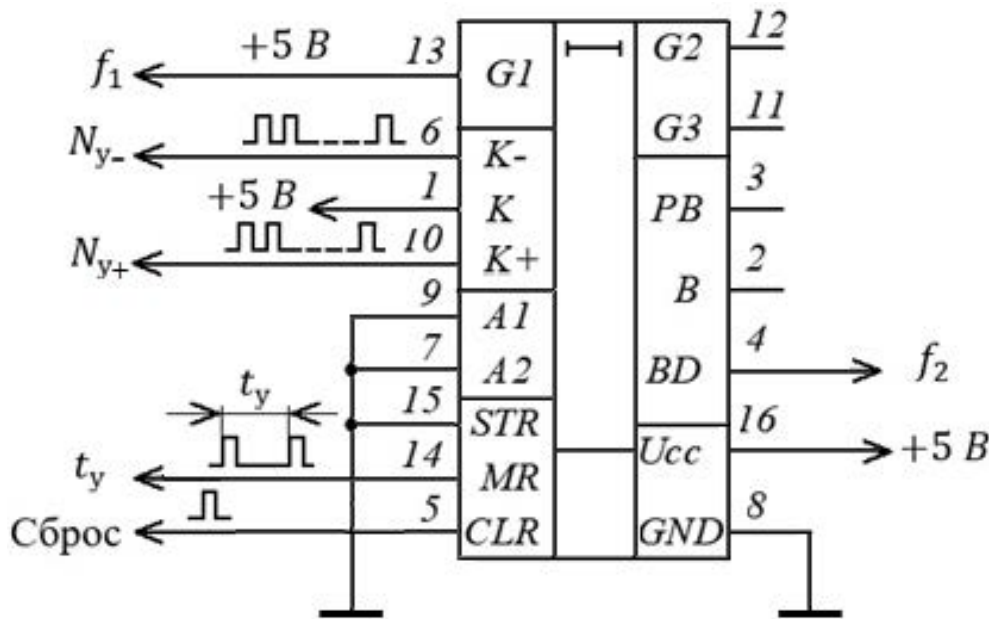


Рис. 3. Реализация схемы делителя частоты на программируемый коэффициент деления с использованием МС 512ПС8ВК

Включение микросхемы в режиме программируемого делителя частоты соответствует варианту 6 табл. 1.

На схему последовательно подаются:

- на вывод CLR МС импульс сброса;
- на вывод $G1$ МС непрерывно импульсы частоты f_1 ;
- на вывод MR 2 импульса, с интервалом t_y ;
- на вывод K_- пачка импульсов N_{y-} и (или) на вывод K_+ пачка импульсов N_{y+} .

Пусковой сигнал на вывод МС STR в этом варианте делителя частоты не подается, а на вывод K подается сигнал логической «1».

Ограничения по параметрам подаваемых сигналов схемы:

$$\frac{3}{f_1} < t_y \leq \frac{4095}{f_1}, \quad f_y \leq \frac{1}{8} f_1,$$

где f_y – частота импульсов в пачке N_{y-} , N_{y+} , подаваемых на выходы МК K_- , K_+ соответственно.

Выходная частота f_2 снимается с вывода делителя МС BD . Выражение (8) для коэффициента деления в схеме рис. 3 примет вид

$$K_{д1} = N_{сч} - \text{round}(t_y f_1) - N_{y-} + N_{y+}. \quad (9)$$

Перезапись в счетчик 2 состояния счетчика 1 осуществляется при записи в счетчике 2 числа импульсов, равного $N_{сч} = 4095$. Использование МС 512ПС8ВК, включенной по представленной схеме рис. 3, позволяет получить программируемые внешними сигналами коэффициенты деления $K_{д1} = 4 - 4096$. Значения $K_{д1} < 4$ получить не удастся, поскольку длительность импульса на выходе BD равна трем периодам генератора.

Рассмотрим возможности получения с помощью МС 512ПС8К переменного значения коэффициента деления частоты. Для реализации этого необходимо соединение вывода K – МС с выводом BD МС, рис. 3 (вариант 7 табл. 1). Тогда после подачи на вывод CLR МС импульса сброса, импульсов частоты f_1 на вывод G 1 и двух импульсов с интервалом t_y на вывод MR , с каждым выходным импульсом делителя коэффициент деления увеличивается на единицу. Когда коэффициент деления достигнет своего максимального уровня, $K_{д1} = 4096$, приход следующего импульса с вывода BD на вывод K – МС скачкообразно изменит коэффициент деления до минимального значения. Минимальное значение $K_{д1}$ не равно единице, так как длительность выходного импульса делителя равна трем периодам сигналов, поступающих на вход делителя и, кроме того, сигналы с выхода B поступят на вход счетчика импульса МС, в котором записана информация о коэффициенте деления, с задержкой, равной восьми периодам входных сигналов. С учетом указанных обстоятельств представленные далее выражения справедливы для схем с переменным значением коэффициента деления частоты в диапазоне $K_{д1} \in [8, 4096]$. Зависимость коэффициента деления $K_{д1}$ от числа выходных импульсов периодическая и в пределах периода линейная. При нулевой начальной фазе коэффициент деления определяется выражением

$$K_{д1} = n_1,$$

где n_1 – количество выходных импульсов делителя частоты на вывод BD МС в течение одного периода зависимости коэффициента деления от числа выходных импульсов делителя.

Не ограничиваясь одним периодом, коэффициент деления в функции числа выходных импульсов делителя определяется выражением

$$K_{д1} = \text{rem}\left(\frac{n}{n_p}\right), \quad (10)$$

где n – общее число выходных импульсов делителя; $\text{rem}(\dots)$ – остаток от целочисленного деления выражения в скобках; n_p – число выходных импульсов, соответствующих одному периоду – зависимости коэффициента деления от числа выходных импульсов, $n_p = 2^{12}$.

В пределах одного периода зависимости $K_{д1}$ число входных импульсов m_1 связано с числом выходных импульсов n_1 зависимостью

$$m_1 = \sum_{i=1}^{i=n_1} \left[1 + \text{rem}\left(\frac{i}{2^{12}}\right) \right] = \frac{1}{2}(n_1 + 1)n_1, \quad i = 1, 2, \dots, n_1.$$

Откуда с учетом целочисленных значений m_1, n_1

$$n_1 = \text{fix}\left(-0,5 + \sqrt{0,25 + 2m_1}\right),$$

где $\text{fix}(\dots)$ – целая часть числа.

В течение одного периода зависимости коэффициента деления на вход делителя поступит m_p импульсов:

$$m_p = \frac{1}{2}(n_p + 1)n_p = 2^{23} + 2^{11} = 8390656 \approx 2^{23}.$$

Зависимость коэффициента $K_{д1}$ деления частоты от произвольного числа входных импульсов m имеет вид

$$K_{д1} = \text{rem}\left(\frac{n}{n_p}\right) = \text{fix}\left(-0,5 + \sqrt{0,25 + 2\text{rem}\left(\frac{m}{m_p}\right)}\right), \quad (11)$$

где m – число входных импульсов, подаваемых на вход G1 МС.

Зависимости коэффициента деления частоты схемы с переменным коэффициентом деления, выполненной на МС 512ПС8ВК, соответствующие выражениям (10), (11), приведены на рис. 4.

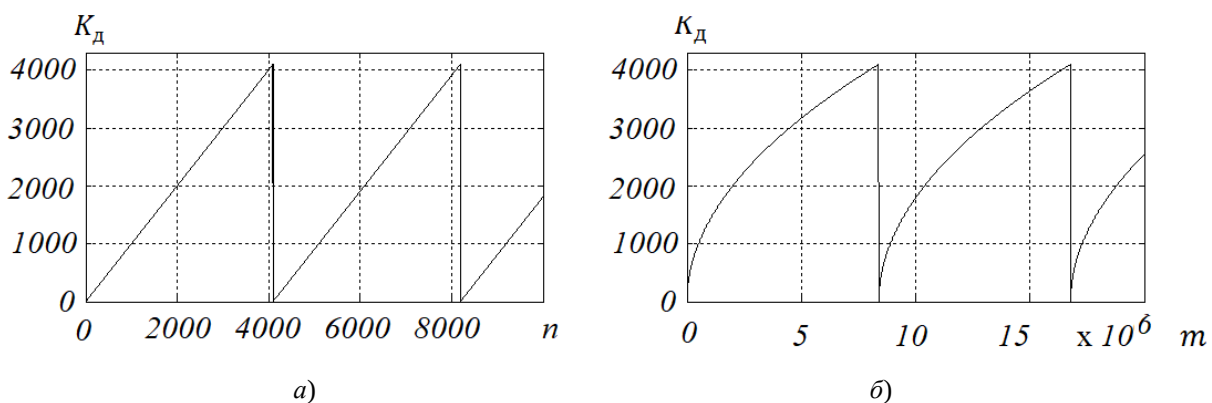


Рис. 4. Зависимость коэффициента деления делителя частоты с переменным коэффициентом деления: а – от числа выходных импульсов; б – от числа входных импульсов

На рис. 4 видна периодичность изменения коэффициента деления частоты с линейной зависимостью внутри периода от числа выходных (рис. 4,а) и нелинейной (рис. 4,б) от числа входных импульсов.

Если вывод ВД МС соединить не с выводом $K-$, а с выводом $K+$, то также получим делитель частоты с переменным коэффициентом деления, однако, зависимости коэффициента деления при этом будет зеркальна по вертикали относительно зависимостей, представленных на рис. 4,а,б.

Имеется еще возможность получения переменного коэффициента деления, появляющаяся при соединении вывода $K-$ с входом генератора G1 или с одним из выходов генератора G2, G3 (вариант 8, табл. 1). При этом увеличение коэффициента деления на единицу будет происходить через каждые 8 импульсов генератора. При нулевой начальной фазе коэффициент деления определяется выражением

$$K_{д1} = \text{rem}\left(\frac{8m}{m_p}\right), \quad m_p = 2^{12} \cdot 2^3 = 2^{15} = 32\,768. \quad (12)$$

При соединении одного из выводов генератора с входом $K+$ МС (вариант 9 табл. 1), зависимость коэффициента деления от числа входных импульсов зеркальна по вертикали относительно зависимости (12):

$$K_{д1} = 4096 - \text{rem}\left(\frac{8m}{m_p}\right), \quad \text{для } K_{д1} \in [8, 4096], \quad (13)$$

$$m_p = 2^{12} \cdot 2^3 = 2^{15} = 32\,768.$$

Выражения (12), (13) указывают на то, что зависимость коэффициента деления от числа входных импульсов периодическая и внутри периодов линейная, либо возрастающая, либо убывающая в пределах $K_{д1}$ от 8 до 4096 входных импульсов.

Полученные значения коэффициентов деления частоты для различных вариантов подключения выводов МС 512ПС8ВК, представленных в табл. 1, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты деления частоты МС 512ПС6ВК
в зависимости от варианта подключения ее выводов

Вариант таблицы 1	Коэффициент деления частоты	Значения коэффициентов деления	
		$K_{д1}$	$K_{д2} , K_{д3}$
1	Фиксированный	2^{9*12}	2^{21+24}
2			2^{20+23}
3			$32264 \div 32704$
4		$1022; 1023 \frac{7}{8}; 2042; 2047 \frac{5}{8}; 4082 \div 4095 \frac{1}{2}$	$2^{12} K_{д1}$
5			$2^{11} K_{д1}$
6	Программируемый	$4 \div 4096$	Выходной сигнал отсутствует
7	Переменный	$8 \div 4096$	
8			
9			

Заключение

В заключение отметим:

- для построения делителей частоты с фиксированным, программируемым и переменным коэффициентами деления частоты может использоваться специализированная микросхема цифрочастотного и времяимпульсного преобразования 512ПС8ВК;
- коэффициент деления частоты при использовании МС 512ПС8ВК может принимать как целочисленные, так и дробные значения от 4 до 2^{24} .

Список литературы

1. Справочник по материалам и технологиям МЭМС на основе кремния. 3-е изд. Микро- и нанотехнологии. Глава 45. Акселерометры. 2020. С. 879–898.
2. Папко А. А., Кирянина И. В., Комбарова И. В. Об исследовании повторяемости и воспроизводимости метрологических характеристик прецизионных акселерометров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1. С. 21–24.
3. Акселерометры низкочастотные линейные АЛЕ 055М. Свидетельство об утверждении типа средств измерений 58401. Изготовитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт физических измерений» (ОАО «НИИФИ»), г. Пенза. № 60338-15. 2015. URL: <https://nd-gsi.ru/grsi/600xx/60338-15.pdf>
4. Хейс Т. К., Хоровиц П. Искусство схемотехники. Теория и практика : пер. с англ. СПб. : БХВ-Петербург, 2022. 1200 с.
5. Микросхемы интегральные 512ПС8ВК. Технические условия ЛСАР.431239.001ТУ. ЕКПС 5962. 2021. 62 с.
6. Захаров А. В., Либкинд И. В., Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Времяимпульсные преобразователи в автономных информационных и измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 59–68.

References

1. *Spravochnik po materialam i tekhnologiyam MEMS na osnove kremniya. 3-e izd. Mikro- i nanotekhnologii. Glava 45. Akselerometry = Handbook of silicon-based MEMS materials and technologies. 3rd ed. Micro- and nanotechnology. Chapter 45. Accelerometers.* 2020:879–898. (In Russ.)
2. Papko A.A., Kiryanina I.V., Kombarova I.V. On the study of repeatability and reproducibility of metrological characteristics of precision accelerometers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2014;(1):21–24. (In Russ.)

3. Low-frequency linear accelerometers ALE 055M. Certificate of type approval of measuring instruments 58401. Manufacturer Open Joint Stock Company "Scientific Research Institute of Physical Measurements" (JSC "NIIFI"), Penza. № 60338-15. 2015. (In Russ.). Available at: <https://nd-gsi.ru/grsi/600xx/60338-15.pdf>
4. Kheys T.K., Khorovits P. *Iskusstvo skhemotekhniki. Teoriya i praktika: per. s angl. = The art of circuit engineering. Theory and practice : trans. from English.* Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2022:1200. (In Russ.)
5. Integrated circuits 512PS8VC. Technical specifications of LSAR.431239.001TU. ECPS 5962. 2021:62. (In Russ.)
6. Zakharov A.V., Libkind I.V., Trofimov V.Yu., Shakhmeyster L.E. Time-pulse converters in autonomous information and measuring systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):59–68. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вадим Юрьевич Трофимов

кандидат технических наук,
доцент кафедры автономных информационных
и вычислительных систем,
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова
(Россия, г. Санкт-Петербург,
1-ая Красноармейская ул., 1)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Vadim Yu. Trofimov

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

Леонид Ефимович Шахмейстер

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автономных
информационных и вычислительных систем,
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова
(Россия, г. Санкт-Петербург,
1-ая Красноармейская ул., 1)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Leonid E. Shakhmeister

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 16.10.2023

Принята к публикации/Accepted 13.11.2023

ОБЗОР СПОСОБОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

А. Д. Сашина¹, А. О. Березина², Н. А. Майданов³, А. К. Алимуратов⁴

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

¹sashina-2016@inbox.ru, ²bereanas@mail.ru, ³nikita.maydanoff@mail.ru, ⁴alansapfir@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение эффективности получения биомассы растений за счет исследования существующих и разработки новых технических решений до сих пор остается актуальной задачей. Целью работы является исследование вопроса повышения урожайности и эффективности усвоения питательных веществ за счет применения алгоритмов искусственного интеллекта и биодатчиков в информационно-измерительной и управляющей системе аэропонного способа выращивания растений в условиях городской среды. *Материалы и методы.* В рамках работы предложено применение алгоритмов искусственных нейронных сетей, а также специализированных датчиков, вживляемых в корешки контрольных растений. *Результаты.* Представлены результаты обзорного анализа существующих способов выращивания растений, подробно рассмотрены их основные преимущества и недостатки по конкретным параметрам, выявлен наиболее эффективный способ и предложены новые технические решения для повышения эффективности получения биомассы растений. Разработана архитектура искусственного интеллекта для информационно-измерительной и управляющей системы аэропонного способа выращивания растений в условиях городской среды. *Выводы.* В соответствии с полученными результатами выявлено, что внедрение предложенных решений позволит вывести аэропонный способ выращивания растений в условиях городской среды на новый уровень. Применение алгоритмов искусственного интеллекта и специализированных датчиков в информационно-измерительной и управляющей системе аэропонного способа выращивания растений обеспечит повышение урожайности и эффективности усвоения питательных веществ, уменьшит требования к техническому обслуживанию.

Ключевые слова: информационно-измерительные и управляющие системы выращивания растений, аэропоника, искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть, биодатчик

Для цитирования: Сашина А. Д., Березина А. О., Майданов Н. А., Алимуратов А. К. Обзор способов и перспективы развития информационно-измерительных и управляющих систем выращивания растений в условиях городской среды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 32–42. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-4

A REVIEW OF METHODS AND DEVELOPMENT PERSPECTIVES FOR INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS FOR URBAN PLANTING

A.D. Sashina¹, A.O. Berezina², N.A. Maydanov³, A.K. Alimuradov⁴

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

¹sashina-2016@inbox.ru, ²bereanas@mail.ru, ³nikita.maydanoff@mail.ru, ⁴alansapfir@yandex.ru

Abstract. *Background.* To enhance efficiency in obtaining plant biomass via the research into existing techniques and development of novel ones is a challenging task. The purpose of the work is to explore increasing productivity and efficiency of nutrient absorption by means of artificial intelligence algorithms and biosensors in the information-measuring and aeroponic cultivation control system for growing plants in urban areas. *Materials and methods.* Artificial neural network algorithms along with specialized sensors inserted in the root zone of control plants have been proposed. *Results.* The review analysis results for the existing methods of growing plants have been presented. Major advantages and disadvantages of these methods in terms of specific parameters have been considered. The most effective method has been identified, and novel techniques to increase the efficiency in obtaining plant biomass have been proposed. Artificial

intelligence architecture for the information-measuring and aeroponic cultivation control system for growing plants in urban areas has been developed. *Conclusions.* It has been revealed that provided the proposed techniques were implemented, it would advance the aeroponic method for growing plants in urban areas. The use of artificial intelligence algorithms and specialized sensors in the information-measuring and aeroponic cultivation control system for growing plants would ensure increased productivity and efficiency of nutrient absorption, and reduce maintenance requirements.

Keywords: information-measuring and control systems for growing plants, aeroponics, artificial intelligence, artificial neural network, biosensor

For citation: Sashina A.D., Berezina A.O., Maydanov N.A., Alimuradov A.K. A review of methods and development perspectives for information-measuring and control systems for urban planting. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):32–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-4

Введение

С каждым годом площадь земельных угодий, предназначенных для выращивания растений, сокращается из-за множества факторов: ухудшения экологической обстановки, изменения климата, техногенных и биогенных чрезвычайных происшествий (приводящих к бесплодию почвы) и др. Традиционные способы выращивания растений перестают давать необходимое количество биомассы для питания отдельных регионов РФ. В связи с этим актуальным является исследование существующих способов выращивания и разработка новых решений, способствующих повышению эффективности получения биомассы растений. Данная статья подготовлена в рамках проекта «Разработка и исследование аэропонической системы выращивания растений в условиях городской среды», финансируемого по договору № ХП-415/23 на выполнение научно-исследовательской работы от 03.04.2023 и является продолжением ранее опубликованных научных работ [1–3]. Разобраться в эффективности существующих способов и выявить решение проблемы поможет сравнительный анализ всех систем, в том числе и подсистем, выращивания растений.

Способ выращивания на основе традиционного земледелия (в том числе классические теплицы)

Классическая теплица – специальное (культивационное) сооружение с покрытием из светопропускающего материала для сезонного или круглогодичного выращивания овощных культур и рассады. Теплица – это, прежде всего, объект, зависимый от обеспеченности энергией, среди которых основным является поток лучистой энергии солнца. Эти вегетационные сооружения также называют закрытыми грунтовыми или культивационными, которые функционируют при минимальном влиянии внешней окружающей среды на рост и развитие выращиваемых растительных объектов. Это позволяет скорректировать биологические ритмы растений для наибольшей эффективности получения от них зеленой массы, плодов или ягод [4, 5].

В качестве основного энергозатратного процесса, искусственно организуемого в сооружениях такого рода, является поддержание температурно-влажностного режима воздушной среды и почвы. Поэтому следует проанализировать свойства, достоинства и недостатки покрывного материала теплиц, в качестве которого в основном применяют стекло, поликарбонат монолитный, поликарбонат сотовый и полиэтиленовую пленку [6].

Дополнительными показателями выбора вида культивационного сооружения могут также служить оценка его взаимодействия с централизованной системой энергоснабжения, долговечность использования и технико-экономические показатели. В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа степени энергозависимости и эксплуатационной оценки культивационных сооружений.

Основные недостатки, выявленные в рамках анализа:

- отсутствие автономности (автоматизация отдельных технологических решений);
- отсутствие энергосберегающих решений (в большинстве случаев функционирование возможно только в теплый период года);
- зависимость от централизованного энергообеспечения;
- отсутствие умного управления;
- отсутствие возобновляемых энергоресурсов.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа степени энергозависимости
и эксплуатационной оценки культивационных сооружений

Традиционные методы выращивания	Энергозависимость	Использование в разные сезоны года	Долговечность материала (срок службы)	Затраты/ окупаемость
Пленочная теплица	Имеет зависимость от центрального энергоснабжения. Основной поток тепла и света получает от естественного источника – солнца	Не используется в осенне- зимний период. Срок использования: 5–6 месяцев в году	10 лет	Окупаемость – в течение 1 года. Существенные трудовые затраты
Поликарбонатная теплица	Имеет зависимость от центрального энергоснабжения. Досвечивание и полив электрифицированы. Основной поток тепла и света получает от естественного источника – солнца	Срок использования: 7–8 месяцев в году	10 лет	Окупаемость – в течение 2 лет. Затраты умеренные
Поликарбонатная теплица с применением ВИЭ	Имеет частичную зависимость от центрального энергоснабжения. Основной поток тепла и света получает от естественного источника – солнца	Срок использования: 7–8 месяцев в году	10 лет	Окупаемость – в течение 2 с половиной лет. Затраты средние
Солнечная вегетария	Имеет зависимость от центрального энергоснабжения. Предусмотрена система отопления. Основной поток тепла и света получает от естественного источника – солнца	Круглогодично	10–12 лет	Окупаемость – в течение 2–5 лет. Затраты высокие

Рассмотрим основные технические и конструкционные решения, применяемые для повышения КПД традиционного земледелия, в том числе классических теплиц. Массивная темная масса грунта в основании теплицы позволяет накапливать и сохранять тепловую энергию не только внутри, но возле нее. Тепловой баланс можно поддерживать с помощью автоматической системы управления для теплиц. Влажность воздуха и почвы контролируется с помощью датчиков влажности, сигнал с которых оцифровывается и поступает в блок управления GPS-трекером. Подача воздуха внутрь помещения происходит в летний период через систему естественной вентиляции, а в зимний – через вентиляторы, встроенные в корпус теплицы, с контролем включения, осуществляемый через блок управления [7, 8].

Для работы современного технологического оборудования в проектируемых теплицах необходимо применять электроэнергию без перебоев и с требуемыми параметрами качества.

Следующим позитивным фактом является возможность организации системы удаленного мониторинга за режимами работы, как в самом тепличном комплексе, так и за режимами работы энергетического оборудования [9]. Так как управление процессами в теплице может осуществляться с помощью мобильного устройства или персонального компьютера дистанционно, а применение технологии видеосъемки таймлапс позволяет наглядно отследить динамику роста растений и изменения параметров сред выращивания, можно применить понятие умной теплицы.

На рис. 1 представлен пример структурной схемы информационно-измерительной и управляющей системы умной теплицы.

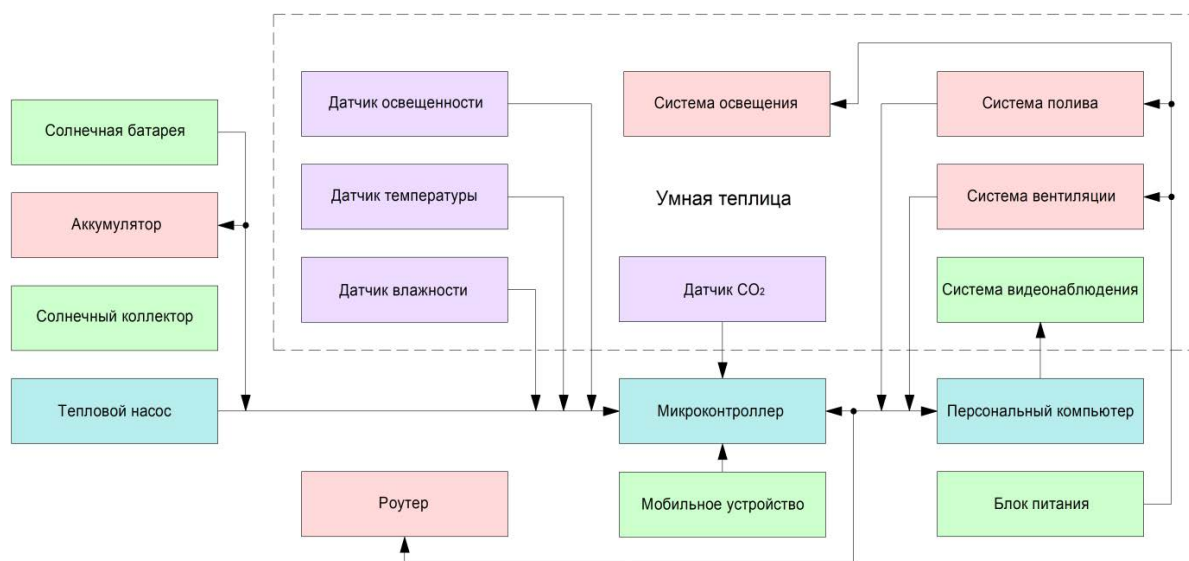


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы умной теплицы

Подытоживая результаты анализа, необходимо отметить явные преимущества информационно-измерительной и управляющей системы умных теплиц над существующими техническими и конструкционными решениями традиционного земледелия (классических теплиц):

- цифровизация технологических операций;
- экологичность производства;
- энергонезависимость от внешнего энергоснабжения;
- материально-финансовая доступность для небольших предприятий или подсобных и фермерских хозяйств.

Способ выращивания растений без почвы (гидропонные системы)

В настоящее время для выращивания растений без почвы широко применяются шесть видов гидропонных систем, имеющих свои преимущества и недостатки. Проведем анализ гидропонных систем и сравним характеристики друг относительно друга. По результатам анализа необходимо выявить недостатки каждого вида и представить наилучшее решение информационно-измерительной и управляющей системы выращивания растений в условиях городской среды.

1. Фитильная система

Фитильная система – это самый простой вид гидропонной системы. Система фитиля примечательна тем, что не использует аэраторы, насосы или электричество. Фактически это единственная гидропонная система, не требующая электричества. В большинстве фитильных систем растения помещают непосредственно в абсорбирующее вещество, такое как перлит или вермикулит. Нейлоновые фитили помещают вокруг растений перед тем, как отправить их прямо в питательный раствор.

При данном виде гидропоники растения не могут получать значительное количество питательных веществ. Таким образом, система идеально подходит для небольших садовых растений и трав. Любое растение, которому не требуется значительного количества воды, будет хорошо расти в этой конкретной системе. Отрицательный аспект этой системы выращивания заключается в том, что вода и питательные вещества не усваиваются равномерно, что может привести к накоплению токсичных минеральных солей. При использовании этой системы необходимо смывать лишние питательные вещества пресной водой каждые 1–2 недели [10].

Преимущества фитильной системы:

- простота использования в условиях городской среды;
- минимальные финансовые затраты;
- надежность.

Недостатки фитильной системы:

- доступ кислорода к резервуару с раствором ограничен;
- пассивный способ доставки питательных веществ;
- ограниченное количество видов выращиваемых культур.

2. Система водного культивирования

Система водного культивирования – это упрощенный вид гидропонной системы, при котором корни растения помещаются непосредственно в питательный раствор. В то время как фитильная система помещает определенные материалы между растениями и водой, система водного культивирования обходит этот барьер. Кислород, необходимый растениям для выживания, отправляется в воду диффузором или воздушным камнем.

Из-за прямого доступа к питательным веществам и кислороду растения, выращенные методом водного культивирования, будут расти очень быстро. Лучшее качество системы водного культивирования заключается в том, что ее очень легко сделать, и она хорошо работает с любыми растениями. Благодаря этому методу даже большие растения с большой системой опор будут быстро расти. Единственная потенциальная проблема с этой гидропонной системой – развитие корневых заболеваний, вызванных грязными условиями выращивания.

Преимущества системы водного культивирования:

- недорогой вариант среди активных систем;
- простое управление;
- быстрый рост и развитие выращиваемых культур;
- сохранность выращиваемых культур в течение длительного времени.

Недостатки системы водного культивирования:

- высокая вероятность появления корневой гнили (при плохой чистке резервуара);
- высокий уровень питательной жидкости (на постоянной основе может вызвать загнивание шейки корней);
- необходимость регулярного пополнения резервуара с питательной жидкостью.

3. Система приливов и отливов

Система приливов и отливов – еще одна популярная гидропонная система, которая в основном используется домашними садоводами. При использовании этого вида системы растения размещаются на просторной грядке, заполненной питательной средой, такой как минеральная вата или перлит. После того, как растения посажены, грядка заливается питательными веществами раствора до тех пор, пока вода не достигнет уровня ниже верхнего слоя питательной среды, что гарантирует, что раствор не переливается [10].

Водяной насос, заполняющий грядку, оснащен таймером, который отключает насос через определенное время. Когда это произойдет, вода будет слита с грядки и отправлена обратно в насос. Было обнаружено, что система приливов и отливов эффективна при выращивании почти всех типов растений, включая некоторые корнеплоды, такие как морковь и редис. Однако не рекомендуется использовать с этой системой особо крупные растения. Из-за того, сколько места потребуется этим растениям, не получится поместить достаточное количество питательной среды и питательного раствора в грядку с более крупными растениями. Основная проблема с системой приливов и отливов заключается в том, что контроллер насоса может работать неправильно, что останавливает работу до тех пор, пока насос не будет отремонтирован или заменен.

Преимущества системы приливов и отливов:

- простота и доступность;
- полноценное насыщение питательным раствором корневой системы (часть которого накапливается в субстрате).

Недостатки системы приливов и отливов:

- высокий риск заражения вредными микроорганизмами (при постоянной циркуляции раствора);
- высокий риск гибели урожая (при отключении электроэнергии);
- высокий риск гибели насаждений (при поломке или засорении оборудования).

4. Капельная система

Капельная система – это простая в использовании гидропонная система, которую можно быстро изменить для разных типов растений, что делает ее отличной системой для любого

садовода, который планирует регулярно вносить изменения. Питательный раствор, используемый с капельной системой, закачивается в трубку, по которой направляется прямо к основанию растения. В конце каждой трубки находится капельный эмиттер. Он в свою очередь контролирует, сколько раствора помещается в растение. Имеет смысл регулировать поток в соответствии с потребностями каждого отдельного растения [10].

Капельные системы могут быть как маленькими, так и большими. Они также могут быть циркуляционными или нециркулирующими системами. Любые дополнительные питательные вещества будут отправлены обратно в резервуар, в котором находится питательный раствор. Поскольку возможно легко изменить размер и скорость потока этой гидропонной системы, ее можно использовать для выращивания практически любого растения. Основная проблема циркуляционной системы, с которой возможно столкнуться, заключается в том, что нужно постоянно поддерживать колеблющиеся уровни питательных веществ и уровень pH, которые возникают при рециркуляции раствора.

Преимущества капельных систем:

- получение достаточного количества питательных веществ растениями в условиях городской среды;
- хорошая аэрируемая среда корней растений.

Недостатки капельных систем:

- регулярная профилактическая чистка для исключения возникновения засоров;
- высокий риск возникновения плесени в резервуаре и околокорневой зоне.

5. Система на основе технологии питательной пленки

Система на основе технологии питательной пленки имеет простой дизайн, широко используется и масштабируется под множества различных приложений. При использовании одной из систем, питательный раствор помещается в большой резервуар. Отсюда раствор перекачивается в наклонные каналы, которые позволяют избыточным питательным веществам стекать обратно в резервуар. Когда питательный раствор попадает в канал, он стекает по склону и проходит по корням каждого растения, обеспечивая нужное количество питательных веществ.

В большинстве случаев система на основе технологии питательной пленки не будет использовать питательную среду, поскольку каналы системы относительно малы и сочетаются только с небольшими корнями растений. Но, несмотря на это, система хорошо масштабируется, что означает возможность модификации для обеспечения одновременного роста большого количества растений. По этой причине система используется коммерческими производителями наряду с домашними производителями.

Преимущества системы на основе технологии питательной пленки:

- обильное количество кислорода;
- эффективное использование свободного пространства установки в условиях городской среды;
- компактная технология.

Недостатки системы на основе технологии питательной пленки:

- высокая вероятность засорения, необходимость в регулярной профилактической чистке;
- высокая вероятность гибели всего производства (при поломке насоса или отсутствие электроэнергии).

6. Аэропонная система

Аэропонная система имеет простой принцип работы, однако сложна в реализации. Растения, находящиеся в подвешенном состоянии со свободно свисающими корнями, крепятся на крышке емкости, внутри которой находятся распылители, приходящие в действие с помощью таймера и насоса. В определенные интервалы времени (определяются исходя из времени поглощения и испарения питательного раствора) распылители орошают корни питательным раствором в виде мельчайших капель. Несколько форсунок расположены под растениями. Когда давление в насосе возрастает, раствор распыляется, и все его избытки попадают в резервуар, расположенный ниже. Таким образом, корни растений находятся в постоянном тумане, состоящем из питательной смеси и кислорода. Высокая аэрация способствует очень высоким темпам роста выращиваемых культур [10].

При использовании правильных размеров резервуара для соответствующего растения аэропонная система позволяет выращивать почти все типы растений. Однако резервуар должен быть очень глубоким, если выращивать более крупные растения. В противном случае распылители тумана не смогут добраться до всех корней. Поскольку растения с аэропонной системой находятся в воздухе, они получают весь необходимый им кислород. В этой системе также используется меньше воды, чем в любой другой гидропонной системе, что обеспечивает большую эффективность. Однако с этой системой есть несколько проблем. Во-первых, их строительство может быть дорогостоящим. Форсунки, распыляющие питательные вещества, могут забиваться, что может затруднить очистку.

Высокая аэрация способствует очень высоким темпам роста выращиваемых культур. В аэропонике важна сверхвысокая точность настройки таймера, которая обеспечивала бы короткий цикл и включала насос на несколько секунд каждые несколько минут. Особенный недостаток системы – высыхание корней при отключении электричества или же поломке таймера или насоса.

Преимущества аэропонной системы:

- максимальное количество питательных элементов и кислорода, что обеспечивает их стремительное развитие;
- экономия свободного пространства (ярусное строение – лотки с растениями можно ставить в два или три слоя).

Недостатки аэропонной системы:

- необходимость своевременной очистки и контроля состояния оборудования (постоянный мониторинг со стороны специалистов);
- отсутствие возможности использования густых питательных смесей [11].

В табл. 2 представлены результаты сравнительного анализа видов гидропонных систем. Оценка качества параметров гидропонных систем носит субъективный характер. Большее количество плюсов («+») демонстрирует высокую качественную оценку параметра.

Таблица 2

Сравнительный анализ видов гидропонных систем

Вид системы / Наименование параметра	Фитильная система	Система водного культивирования	Система приливов и отливов	Капельная система	Система на основе технологии питательной пленки	Аэропонная система
Эффективность усвоения питательных веществ	+	++	++++	++	++++	+++++
Требование к техническому обслуживанию	+	+	++	++	+++	+++
Компактность размещения	++	+	+++	++++	++++	+++
Урожайность	++	++	+++	+++	+++	+++++

В соответствии с данными в табл. 2 можно сделать вывод, что наиболее эффективной и перспективной в условиях городской среды является аэропонная система.

Перспективы развития информационно-измерительных и управляющих систем выращивания растений в условиях городской среды

В соответствии с результатами анализа предложены решения для информационно-измерительной и управляющей системы аэропонного способа выращивания растений в условиях городской среды.

1. Искусственный интеллект

Большим недостатком аэропонного способа являются затраты на электричество – на это тратится от 40 % всех расходов на теплицу. Например, ферма компании *Agritecture* площадью

около 2,8 тыс. м² в пригороде Нью-Йорка ежегодно расходует не менее \$ 216 тыс. на освещение и электричество и еще \$120 тыс. на вентиляцию и кондиционирование [12]. Подобную проблему возможно минимизировать благодаря использованию искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей), который способен подбирать специальные режимы работы (для конкретного растения) и по возможности сокращать затраты на электроэнергию.

Алгоритмы искусственного интеллекта будут «стараться» сопоставить фактические условия и данные, чтобы соответствовать одной или нескольким закономерностям, и проанализировать, какой режим работы обеспечил, например, наилучший суточный рост биомассы (или некий другой важный параметр). Что немаловажно, алгоритмы искусственного интеллекта всегда точно настраивают режимы работы и будут «учиться» на новом опыте, который обеспечил лучшие прогнозы, чем предыдущий.

Алгоритмы искусственного интеллекта осуществляют сбор данных теплицы, чтобы иметь возможность настроить режимы работы и сопоставить их с действиями и производственными результатами. Этот процесс может длиться от 10 до 14 месяцев, так как алгоритмы должны быть в состоянии подготовить множество режимов работы из собранных данных, взаимодействий и результатов. Алгоритмы искусственного интеллекта предложат уникальные решения для увеличения производительности теплицы. Например, увеличить световой день на 15 мин или начать орошение в 7.00 и уменьшить период полива на 0,2 с.

Также при отсутствии оператора искусственный интеллект может взять управление и контроль на себя. Если вдруг объем воды и питательной смеси в баке достиг определенного минимума, то искусственный интеллект проанализирует ситуацию, pošлет оператору уведомление и увеличит промежуток между поливами, чтобы минимизировать последствия и дать растениям прожить как можно дольше.

На рис. 2 представлена разработанная архитектура искусственного интеллекта для информационно-измерительной и управляющей системы аэропного способа выращивания растений в условиях городской среды на основе искусственных нейронных сетей.

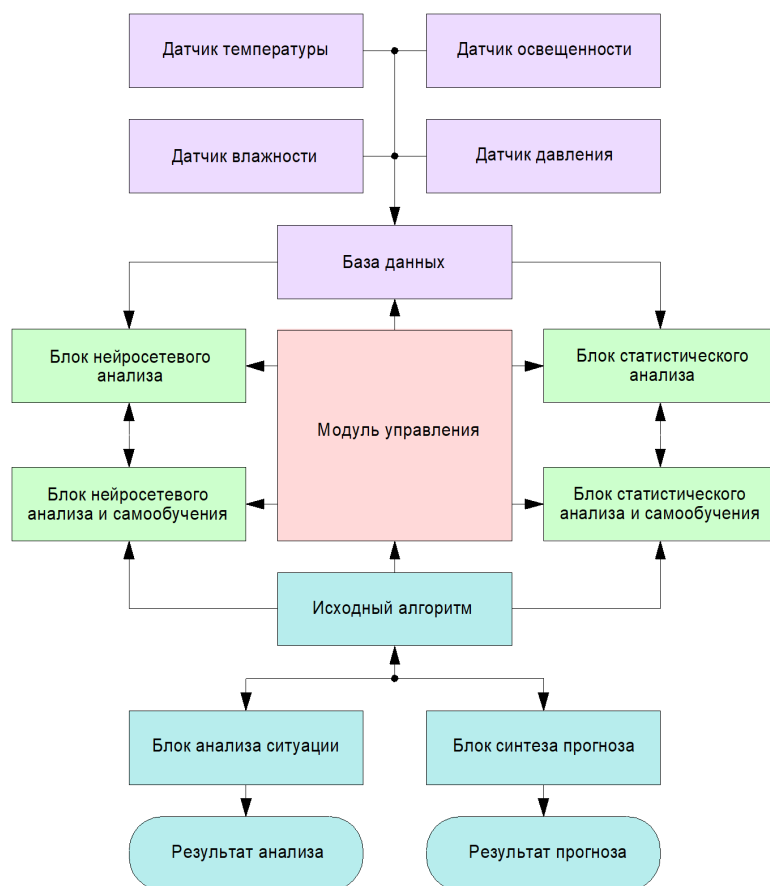


Рис. 2. Архитектура искусственного интеллекта для информационно-измерительной и управляющей системы аэропного способа выращивания растений в условиях городской среды

2. Биодатчик

Для повышения эффективности алгоритмов искусственного интеллекта предложен специализированный биодатчик, предназначенный для мониторинга биологического состава растений и их общего состояния. Датчик представляет собой тонкую пластину из флуоресцентного полимера, на котором нанесены карбоновый слой и двойной ферментный слой, для снятия уровня необходимых параметров состава растения. Если стандартные показатели веществ меняются, то ток на сенсорах также изменяется, тем самым подавая сигналы об изменениях на контроллер. Благодаря этому возможно вовремя предпринять необходимые действия и тем самым предотвратить гибель урожая. Датчик размером 1×2 мм можно вживлять в корешки контрольных растений. Это решение дополняет информационно-измерительную и управляющую системы аэропонного способа выращивания растений в условиях городской среды, обеспечивая дополнительную автоматизацию.

Заключение

Внедрением предложенных решений выведен аэропонный способ выращивания растений в условиях городской среды на новый уровень. Используемые алгоритмы искусственного интеллекта и специализированные датчики (вживляемые в корешки контрольных растений) в информационно-измерительной и управляющей системе аэропонного способа выращивания растений обеспечат:

- повышение урожайности;
- повышение эффективности усвоения питательных веществ;
- уменьшение требований к техническому обслуживанию;
- компактность размещения теплицы.

В перспективе актуальным является внедрение в информационно-измерительную и управляющую систему аэропонного способа выращивания растений компьютерного зрения, обеспечивающего дополнительный контроль роста биомассы в условиях городской среды.

Список литературы

1. Сашина А. Д. Разработка и исследование аэропонической системы выращивания растений // Наука будущего – наука молодых : сб. тез. докл. участников VII Всерос. молодежного научного форума (г. Новосибирск, 23–26 августа, 2022 г.). Новосибирск, 2022. С. 25–26.
2. Сашина А. Д., Майданов Н. А., Березина А. О. Умная теплица «SMART GREENHOUSE» // От зеленого кампуса – к зеленому городу. 2022. С. 46–63.
3. Сашина А. Д., Майданов Н. А., Березина А. О., Овчинников Д. Л. Система выращивания растений // Междисциплинарные исследования науки и техники : сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 20 декабря 2022 г.). Саратов, 2022. С. 266–269.
4. Каун О. Ю., Озеров И. Н. Обоснование параметров микроклимата сооружений защищенного грунта // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 3. С. 49–52.
5. Степанчук Г. В., Юдаев И. В., Жарков А. В. Энергоэффективная система облучения в теплице // Вестник аграрной науки Дона. 2016. № 1. С. 5–12.
6. Юдаев И. В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната – покрывного материала круглогодичных теплиц // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 120. С. 239–252.
7. Березина А. О., Сашина А. Д., Майданов Н. А. Анализ инновационных средств как усовершенствование аэропонной фермы // Вестник Пензенского государственного университета. 2023. № 1. С. 86–91.
8. Волхонов М. С., Габалов С. Л., Иванов С. В. [и др.]. Система автоматического управления микроклиматом малогабаритной теплицы защищенного грунта с применением микроконтроллера // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе : сб. ст. 66-й Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 т. Кострома : Костромская ГСХА, 2015. С. 91–95.
9. Адакин Р. Д., Борисова М. Л., Дмитренко В. П. [и др.]. Умная теплица. Автоматизация процессов выращивания культур в малогабаритных теплицах // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш». Ростов н/Д : Донской государственный технический университет, Аграрный научный центр «Донской», 2019. С. 329–332.
10. Гидропоника и ее виды. GrowHobby. URL: <http://growhobby.ru/gidroponika-i-ee-vidy.html> (дата обращения: 08.10.2023).
11. Типы гидропонных систем. Агродом. URL: <https://agrodom.com/advice/typy-gidroponnykh-sistem/#fitilnaya-sistema> (дата обращения: 08.10.2023).

12. Калугина Анастасия. Как нейросети помогают выращивать овощи и кто такой электронный агроном / РБК. Тренды. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5fbfcb0f9a7947ce58d7d3b3> (дата обращения: 08.10.2023).

References

1. Sashina A.D. Development and research of an aeroponic system for growing plants. *Nauka budushchego – nauka molodykh: sb. tez. dokl. uchastnikov VII Vseros. molodezhnogo nauchnogo foruma (g. Novosibirsk, 23–26 avgusta, 2022 g.) = Science of the future – science of the young : collection of theses. dokl. participants of the VII All-Russian. youth Scientific Forum (Novosibirsk, August 23–26, 2022)*. Novosibirsk, 2022:25–26. (In Russ.)
2. Sashina A.D., Maydanov N.A., Berezina A.O. Smart greenhouse "SMART GREENHOUSE". *Ot zelenogo kampusa – k zelenomu gorodu = From the green campus to the green city*. 2022:46–63. (In Russ.)
3. Sashina A.D., Maydanov N.A., Berezina A.O., Ovchinnikov D.L. Plant growing system. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya nauki i tekhniki: sb. tez. dokl. XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Saratov, 20 dekabrya 2022 g.) = Interdisciplinary research of science and technology : collection of the thesis of the XVII International Scientific and Practical Conference (Saratov, December 20, 2022)*. Saratov, 2022: 266–269. (In Russ.)
4. Kaun O.Yu., Ozerov I.N. Substantiation of the parameters of the microclimate of protected soil structures. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve = Innovations in agriculture*. 2017;(3):49–52. (In Russ.)
5. Stepanchuk G.V., Yudaev I.V., Zharkov A.V. Energy-efficient irradiation system in a greenhouse. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Bulletin of agrarian science of the Don*. 2016;(1):5–12. (In Russ.)
6. Yudaev I.V. Studying the light-transmitting properties of cellular polycarbonate - a coating material of year-round greenhouses. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal KubGAU*. 2016;(120):239–252. (In Russ.)
7. Berezina A.O., Sashina A.D., Maydanov N.A. Analysis of innovative means as an improvement of an aeroponic farm. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2023;(1):86–91. (In Russ.)
8. Volkonov M.S., Gabalov S.L., Ivanov S.V. et al. The system of automatic control of the microclimate of a small-sized greenhouse of protected soil using a microcontroller. *Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse: sb. st. 66-i Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 3 t. = Actual problems of science in the agro-industrial complex : collection of articles 66th International Scientific and practical conference : in 3 vols*. Kostroma: Kostromskaya GSKhA, 2015:91–95. (In Russ.)
9. Adakin R.D., Borisova M.L., Dmitrenko V.P. et al. Smart greenhouse. Automation of the processes of growing crops in small-sized greenhouses. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh XXII Agropromyshlennogo foruma yuga Rossii i vystavki «Interagromash» = State and prospects of development of the agro-industrial complex : collection of scientific tr. XII International Scientific and Practical Conference within the framework of the XXII Agro-Industrial Forum of the South of Russia and the Interagromash exhibition*. Rostov-on-Don: Donskoj gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, Agrarnyy nauchnyy tsentr «Donskoj», 2019:329–332. (In Russ.)
10. *Gidroponika i ee vidy. GrowHobby = Hydroponics and its types. GrowHobby*. (In Russ.). Available at: <http://growhobby.ru/gidroponika-i-ee-vidy.html> (accessed 08.10.2023).
11. *Tipy gidroponnykh sistem. Agrodom = Types of hydroponic systems. Agrodom*. (In Russ.). Available at: <https://agrodom.com/advice/tipy-gidroponnykh-sistem/#fitilnaya-sistema> (accessed 08.10.2023).
12. Kalugina A. *Kak neyroseti pomagayut vyrashchivat' ovoshchi i kto takoy elektronnyy agronom / RBC. Trendy = How neural networks help to grow vegetables and who is an electronic agronomist / RBC. Trends*. (In Russ.). Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5fbfcb0f9a7947ce58d7d3b3> (accessed 08.10.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Алина Дмитриевна Сашина

студент,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Sashina-2016@inbox.ru

Alina D. Sashina

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анастасия Олеговна Березина

студент,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: bereanas@mail.ru

Anastasiya O. Berezina

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Никита Алексеевич Майданов

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

Nikita A. Maydanov

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

Алан Казанферович Алимуратов

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

Alan K. Alimuradov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 09.10.2023

Принята к публикации/Accepted 14.11.2023

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

В. В. Козлов¹, А. А. Трофимов², Е. А. Фокина³, В. Н. Пономарев⁴, Т. О. Жуков⁵

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

¹ val.iit@mail.ru, ^{2,5} iit@pnzgu.ru, ³ ekaterina.isay1997@gmail.com, ⁴ revik2296@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Технология автоматического распознавания речи сталкивается с большим количеством трудностей. Сложная структура человеческой речи в совокупности с различными шумовыми эффектами делает эту задачу очень трудоемкой. Для упрощения данной задачи применяют предварительную обработку речевых сигналов, которая может осуществляться с помощью различных методов. *Материалы и методы.* Предварительная обработка речевых сигналов включает в себя ряд техник и методов, направленных на улучшение качества речевых данных и подготовку их для дальнейшего анализа. Рассмотрены методы предварительной обработки речевых сигналов и приведены направления применения данных методов. Представлен обзор некоторых техник предварительной обработки речевых сигналов. *Результаты и выводы.* Представлен анализ наиболее подходящих методов для предварительной обработки речевых сигналов.

Ключевые слова: речевые сигналы, предварительная обработка, декомпозиция на эмпирические моды, вейвлет-преобразование, преобразование Фурье

Для цитирования: Козлов В. В., Трофимов А. А., Фокина Е. А., Пономарев В. Н., Жуков Т. О. Методы предварительной обработки речевых сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 43–49. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-5

METHODS OF PREPROCESSING SPEECH SIGNALS

V.V. Kozlov¹, A.A. Trofimov², E.A. Fokina³, V.N. Ponomarev⁴, T.O. Zhukov⁵

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

¹ val.iit@mail.ru, ^{2,5} iit@pnzgu.ru, ³ ekaterina.isay1997@gmail.com, ⁴ revik2296@gmail.com

Abstract. *Background.* Automatic speech recognition technology faces a lot of difficulties. The complex structure of human speech combined with various noise effects makes this task very time-consuming. To simplify this task, preprocessing of speech signals is used, which can be carried out using various methods. *Materials and methods.* Preprocessing of speech signals includes a number of techniques and methods aimed at improving the quality of speech data and preparing them for further analysis. The article discusses the methods of preprocessing speech signals and provides directions for the application of these methods. An overview of some techniques of preprocessing speech signals is presented. *Results and conclusions.* The analysis of the most suitable methods for preprocessing speech signals is presented.

Keywords: speech signals, preprocessing, empirical modes decomposition, wavelet transform, Fourier transform

For citation: Kozlov V.V., Trofimov A.A., Fokina E.A., Ponomarev V.N., Zhukov T.O. Methods of preprocessing speech signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):43–49. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-5

Введение

Технология автоматического распознавания речи сталкивается с большим количеством трудностей. Из-за сложности речевого сигнала время его обработки и анализа оказывается значительным. При занижении качества сигнала, для уменьшения времени обработки, происходит снижение точности распознавания. В настоящее время технология распознавания речи способна достичь высокой точности только в идеальных условиях. Сложная структура человеческой речи в совокупности с различными шумовыми эффектами делает эту задачу одной из самых трудоемких областей компьютерных наук, которая включает в себя лингвистику, математику

и статистику. Распознаватели речи состоят из нескольких компонентов, таких как ввод речи, предварительная обработка, извлечение признаков, векторы признаков, декодер и вывод слов.

Предварительная обработка речевых сигналов является важным этапом в процессе их анализа и распознавания. Она включает в себя ряд техник и методов, направленных на улучшение качества речевых данных и подготовку их для дальнейшего анализа. В данной статье рассмотрим основные аспекты предварительной обработки речевых сигналов.

Цели предварительной обработки

Речевой сигнал является аналоговым, поэтому для дальнейшей обработки его сначала преобразуют в дискретные сигналы, а затем представляют в виде зависимости амплитуды от дискретных отсчетов времени. Из-за сложности речевого сигнала, а именно из-за его нестационарности, предварительная обработка – один из важных шагов при распознавании речи, которая преследует следующие цели.

Одной из важных задач является устранение шумов, так как шум в речевых сигналах может сильно снижать качество распознавания и анализа. Предварительная обработка включает в себя методы фильтрации и устранения шумовых компонент. Сначала происходит удаление сильных фоновых шумов, например, если речь записана на фоне музыки или шума движения, то можно произвести фильтрацию или усреднение для уменьшения влияния этих шумовых компонент. Затем при необходимости производится фильтрация не интересующих нас частотных компонент. При использовании включают фильтры нижних и верхних частот, фильтры скользящего среднего и фильтры Калмана.

Для неравномерных по уровню сигналов проводится нормализация громкости, так как исследуемый сигнал может иметь разную громкость в разные моменты времени, а нормализация громкости приводит сигнал к стандартизированному уровню громкости (например, приведения его к определенному уровню или максимальной амплитуде) для более надежного анализа.

Зачастую для более качественной обработки речевого сигнала производится извлечение признаков (Feature Extraction), т.е. таких характеристик, как спектральные признаки или временные характеристики, чтобы создать векторы признаков для упрощения дальнейшей классификации или распознавания. При преобразовании временного сигнала в набор характеристик выбираются те, которые легче анализировать. Данный процесс может включать в себя выделение мел-кепстральных коэффициентов (MFCC), энергии сигнала, скорости изменения и др.

Также в процессе распознавания могут применяться некоторые техники предварительной обработки речевых сигналов:

- амплификация (усиление сигнала) – представляет собой увеличение амплитуды сигнала, что может помочь улучшить отношение сигнал-шум и сделать его более слышимым;
- удаление силенсов и пауз – данная техника позволяет удалить периоды тишины и пауз в речи;
- устранение эха – данное действие помогает в случае использования микрофонов и акустических систем, где может потребоваться устранение эха для улучшения качества аудио;
- разделение на фразы и слова – представляет собой разбиение речевого сигнала на отдельные фразы и слова, что может потребоваться для более точного анализа и распознавания;
- выравнивание продолжительности – при анализе нескольких речевых сигналов, например в системах распознавания речи, может потребоваться выравнивание продолжительности сигналов для сравнения;
- компенсация шума – использование алгоритмов для выделения речи и уменьшения влияния окружающего шума.

Выбор методов предварительной обработки зависит от конкретной задачи и характеристик сигнала. Эти методы могут быть комбинированы для достижения наилучших результатов в конкретном контексте.

Методы предварительной обработки речевых сигналов

Одним из классических является метод преобразования Фурье, который представляет сигнал, заданный во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным

функциям (синусам и косинусам), выделяя, таким образом, частотные составляющие [1]. Результат преобразования Фурье – амплитудно-частотный спектр, по которому можно определить присутствие некоторой частоты в анализируемом сигнале. Преобразование Фурье дает достаточно простые для расчетов формулы и прозрачную интерпретацию результатов:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt; \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $F(\omega)$ – сигнал в частотной области; $f(t)$ – сигнал во временной области; j – мнимая единица.

Недостаток преобразования заключается в том, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени, что накладывает ограничения на применимость данного метода к ряду задач (например, в случае анализа динамики изменения частотных параметров сигнала на временном интервале).

Преобразование Фурье может использоваться в предварительной обработке речевых сигналов для анализа и улучшения их частотных характеристик. В данном контексте преобразование Фурье может применяться для следующих целей:

1. Построение спектрограммы. Преобразование Фурье можно применить к речевому сигналу, чтобы получить его частотное представление. Это позволяет создать спектрограмму, которая отображает, какие частоты преобладают в сигнале в разные моменты времени. Спектрограмма полезна для визуальной оценки частотных характеристик речи и может помочь в выделении формант (резонансных частотных областей), что важно для распознавания речи.

2. Фильтрация. Применение фильтрации в частотной области с использованием преобразования Фурье позволяет удалять шумы и нежелательные частотные компоненты из речевого сигнала. Например, можно использовать фильтры нижних и верхних частот для улучшения качества сигнала и уменьшения влияния шума [2].

3. Извлечение частотных характеристик. Преобразование Фурье также может использоваться для извлечения конкретных частотных характеристик из речевого сигнала. Например, можно извлекать пики в спектре для определения наиболее выраженных частотных компонентов, которые могут содержать информацию о звуках речи.

4. Обработка в частотной области. В некоторых случаях можно провести обработку и модификацию сигнала в частотной области с использованием преобразования Фурье, например, уменьшение амплитуды или удаление частотных компонентов, которые несут ненужную информацию, может улучшить качество речевого сигнала [3].

Применение преобразования Фурье в предварительной обработке речевых сигналов зависит от конкретной задачи и требований. Оно может помочь в анализе и улучшении частотных характеристик речи, что может быть полезно в распознавании и классификации аудиоданных.

Другим методом временной обработки сигналов является вейвлет-преобразование, обладающее самонастраивающимся подвижным частотно-временным окном, который одинаково хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. В этом случае сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция «прототип» называется материнским, или анализирующим, вейвлетом. В общем случае вейвлет-преобразование функции $f(t)$ выглядит так:

$$W(x, s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^* \left(\frac{t-x}{s} \right) f(t) dt,$$

где t – ось времени; x – момент времени; s – параметр, обратный частоте; Ψ – функция анализирующего вейвлета; $(*)$ – комплексно-сопряженное значение.

Благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов вейвлет-преобразование стало мощной альтернативой преобразованию Фурье. Недостатком вейвлет-преобразования является необходимость априорной информации об исследуемом сигнале для правильного подбора материнского вейвлета.

Вейвлет-преобразование также может быть полезным в предварительной обработке речевых сигналов, так как обладает способностью анализировать сигналы на разных временных и частотных масштабах, что делает его мощным инструментом для извлечения информации из речевых данных. Вейвлет-преобразование можно использовать при предварительной обработке речевых сигналов следующим образом:

1. Выделение временных и частотных характеристик. Вейвлет-преобразование позволяет разложить речевой сигнал на различные компоненты разных масштабов. Это может быть полезно для выделения как быстрых изменений в речи (короткие всплески), так и более медленных изменений (модуляции интонации). Выделение различных временных и частотных характеристик может помочь в анализе и распознавании особенностей речи.

2. Сжатие данных. Вейвлет-преобразование может использоваться для сжатия речевых данных, удаляя несущественные детали и сохраняя важные компоненты. Это может быть полезно для уменьшения объема данных и улучшения эффективности хранения и передачи аудио-сигналов.

3. Уменьшение шума. Вейвлет-преобразование может использоваться для удаления шумовых компонентов из речевого сигнала на разных масштабах, что помогает улучшить качество сигнала.

4. Выделение формант. Форманты являются резонансными частотами, которые содержат важную информацию о произношении звуков и гласных. Вейвлет-преобразование может помочь в выделении этих формант из речевых сигналов.

5. Анализ изменений интонации. Вейвлет-преобразование может помочь в анализе изменений интонации в речи, что может быть полезно в задачах, связанных с выделением эмоциональной окраски или акцентов.

Применение вейвлет-преобразования в предварительной обработке речевых сигналов зависит от конкретных целей и задачи анализа речи. Этот метод предоставляет множество возможностей для извлечения информации из аудиоданных и может быть эффективным инструментом в области обработки речи [3].

Подробный анализ известных способов обработки в частотно-временной области выявил перспективность использования способов на основе преобразования Гильберта – Хуанга, в частности с использованием декомпозиции на эмпирические моды [3, 4].

Декомпозиция на эмпирические моды (ДЭМ) представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходный сигнал раскладывается на внутренние функции (частотные составляющие), называемые эмпирическими модами (ЭМ). Разложение на ЭМ позволяет анализировать локальные особенности сигнала, поэтому данный метод может быть использован при обработке нестационарных данных.

В основе метода ДЭМ заключается построение гладких огибающих по максимумам и минимумам функции сигнала и дальнейшее вычитание среднего значения этих огибающих из исходного сигнала. Для этого производится поиск экстремумов и методом сплайн аппроксимации этих точек определяются верхняя и нижняя огибающие. ДЭМ не имеет строгого математического описания, а аналитическое выражение имеет следующий вид:

$$x(n) = \sum_{i=1}^I IMF_i(n) + r_I(n),$$

где $x(n)$ – исходный сигнал; $IMF_i(n)$ – ЭМ; $r_I(n)$ – конечный остаток, $i = 1, 2, \dots, I$ – номер ЭМ, n – дискретный отсчет времени [1].

Так как последний метод не требует точного математического описания сигнала, а все данные берет из самого сигнала, этот метод наилучший при обработке речевых сигналов из-за их нестационарности.

Результаты разложения речевых команд на моды с помощью улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом представлены на рис. 1.

При предварительной обработке речевых сигналов этот метод используется для анализа и разложения временных рядов и представляет собой адаптивный и ориентированный на данные метод разложения сигнала на компоненты, называемые интринсическими модами.

Он был разработан для анализа нестационарных сигналов, таких как речь, и может быть полезен в различных задачах обработки речевой информации. Его используют в области анализа и обработки сигналов, включая обработку речи, для следующих задач:

1. Извлечение признаков. ДЭМ может использоваться для извлечения интринсических признаков из речевых сигналов, которые могут быть полезными для задач распознавания речи, классификации или анализа эмоциональной окраски [1].

2. Фильтрация и удаление шума. ДЭМ позволяет разделять сигналы от шума и удалить нежелательные компоненты из речевых записей [5].

3. Исследование нестационарности. ДЭМ помогает анализировать временные изменения в речи, такие как изменения в частоте или амплитуде, что может быть важно для понимания динамики речевых сигналов.

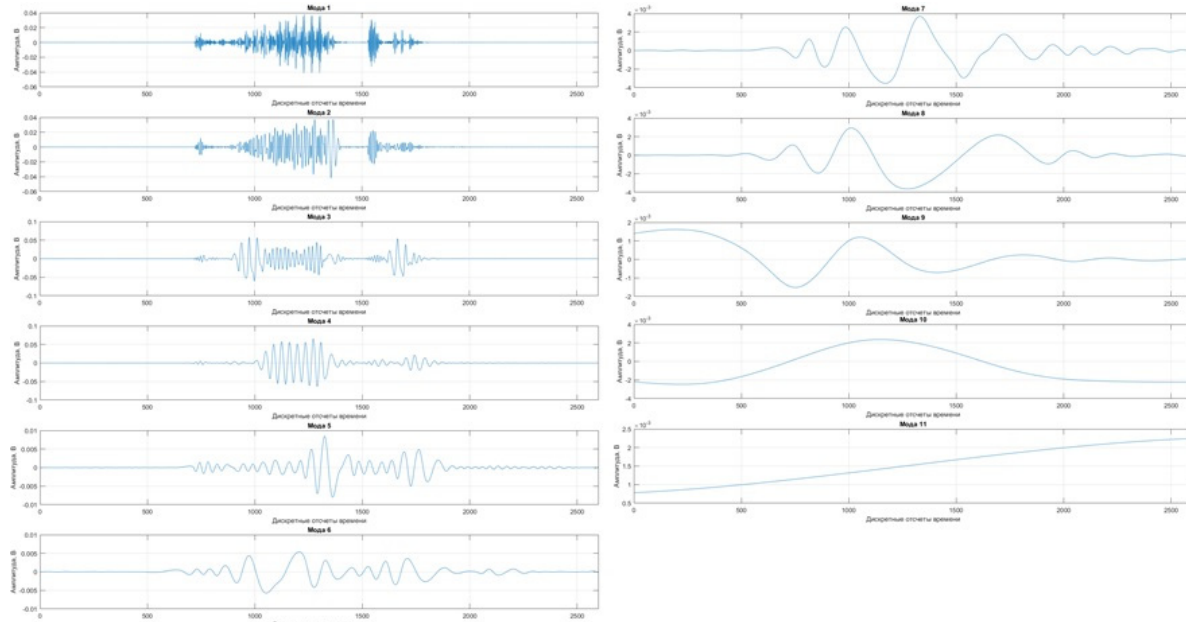


Рис. 1. Разложение на эмпирические моды речевого сигнала

Процесс декомпозиции на эмпирические моды включает в себя разложение сигнала на интринсические моды, каждая из которых представляет собой частотную компоненту с различной временной длительностью. Эти моды можно затем анализировать и использовать в дальнейших задачах обработки речи.

Однако следует учесть, что эффективность данного метода предварительной обработки речевых сигналов может зависеть от конкретной задачи и характеристик сигнала. Важно также учитывать, что существуют различные модификации ДЭМ, такие как множественная декомпозиция на эмпирические моды, которые могут быть более стабильными и устойчивыми к шуму.

Заключение

Предварительная обработка речевых сигналов играет ключевую роль в обеспечении высокой точности распознавания и анализа речи. Эффективная предварительная обработка позволяет извлечь информацию из акустических сигналов и улучшить качество последующих этапов анализа, таких как распознавание речи или классификация речевых команд.

Анализ методов показал, что наиболее подходящим методом предварительной обработки речевых сигналов может служить декомпозиция на эмпирические моды, а также различные модификации данного метода, например, множественной декомпозиции с адаптивным шумом.

Благодаря применению алгоритма предварительной обработки, основанного на декомпозиции на эмпирические моды, может быть увеличена скорость выделения информативной части речевого сигнала, что в дальнейшем можно будет применять при решении различных задач.

Список литературы

1. Козлов В. В., Фокина Е. А., Трофимов А. А. Предварительная обработка сигнала при распознавании голосовых команд методом улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 56–61. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-6
2. Фокина Е. А., Трофимов А. А., Козлов В. В. [и др.] Устройство распознавания речевых сигналов на основе искусственной нейронной сети // Методы, средства и технологии получения и обработки

- измерительной информации («Шлядинские чтения – 2022») : сб. ст. по материалам XIV Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых (г. Пенза, 24–26 октября 2022 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 190–195. EDN: EQHJOA
3. Козлов В. В. Предварительная обработка сигнала методом разложения на собственные числа для распознавания голосовых команд // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2021») : сб. ст. по материалам XIII Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Пенза, 28–30 октября 2021 г.) / под ред. Е. А. Печерской. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 147–150. EDN: JHSRXE
 4. Bodin O. N., Kozlov V. V., Nefed'ev D. I. [et al.] Pre-processing voice signals for voice recognition systems // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017 : Conference Proceedings (Erlagol, Altai, 29 June – 03 July 2017). Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2017. P. 242–245. doi: 10.1109/EDM.2017.7981748. EDN: PRLTAH
 5. Бердибаева Г. К., Бодин О. Н., Громков Н. В. [и др.] Применение искусственных нейронных сетей для распознавания речевых команд // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2. С. 77–84. EDN: YUECPT

References

1. Kozlov V.V., Fokina E.A., Trofimov A.A. Signal preprocessing in voice command recognition by the method of improved complete multiple decomposition into empirical modes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):56–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-6
2. Fokina E.A., Trofimov A.A., Kozlov V.V. et al. Speech signal recognition device based on an artificial neural network. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2022»)*: sb. st. po materialam XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya obuchayushchikhsya i molodykh uchenykh (g. Penza, 24–26 oktyabrya 2022 g.) = *Methods, tools and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky readings – 2022")* : collection of articles based on the materials of the XIV International Scientific and Technical a conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students and young scientists (Penza, October 24–26, 2022). Penza: Izd-vo PGU, 2022:190–195. (In Russ.). EDN: EQHJOA
3. Kozlov V.V. Signal preprocessing by the method of decomposition into eigenvalues for recognition of voice commands. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2021»)*: sb. st. po materialam XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (g. Penza, 28–30 oktyabrya 2021 g.) = *Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky readings – 2021")* : collection of articles based on materials of the XIII International Scientific and Technical A conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists (Penza, October 28-30, 2021). Penza: Izd-vo PGU, 2021:147–150. (In Russ.). EDN: JHSRXE
4. Bodin O.N., Kozlov V.V., Nefed'ev D.I. et al. Pre-processing voice signals for voice recognition systems. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings* (Erlagol, Altai, 29 June – 03 July 2017). Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2017:242–245. doi: 10.1109/EDM.2017.7981748. EDN: PRLTAH
5. Berdibaeva G.K., Bodin O.N., Gromkov N.V. et al. Application of artificial neural networks for speech command recognition. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(2):77–84. (In Russ.). EDN: YUECPT

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Валерьевич Козлов

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

Valeriy V. Kozlov

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

Алексей Анатольевич Трофимов

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

Aleksey A. Trofimov

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

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ekaterina.isay1997@gmail.com

Ekaterina A. Fokina

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

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Postgraduate 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

Timofey 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 26.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 23.10.2023

Принята к публикации / Accepted 21.11.2023

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 629.423.33:629.423.2

doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТОКОПРИЕМНИКА МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. В. Волков¹, С. Н. Ивлиев², П. В. Венчаков³

^{1,2,3} Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева, Саранск, Россия

¹elsoldador@rambler.ru, ²ivliev_sn@mail.ru, ³pvenchakov96@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Железнодорожный транспорт в силу больших объемов перевозок должен своевременно и качественно обслуживаться. Одной из главных проблем в процессе перевозок является возникновение неконтролируемой электрической дуги между токоприемником и контактным проводом. Описывается важность проблемы исследования переходных процессов при возникновении электрической дуги в сетях постоянного и переменного тока. Целью исследования является изучение временных переходных процессов параметров электрической дуги и выявление закономерных особенностей ее возникновения. *Материалы и методы.* Рассмотрена математическая модель электрической дуги тока «токоприемник – контактный провод» с применением пакета Simulink Matlab. *Результаты и выводы.* Возникновение электрической дуги сопровождается переходными процессами тока, значение которого может достигать нескольких сотен ампер, и эти токи совместно с током, потребляемым нагрузкой, могут повредить контактный провод, пережигая его. Анализируя характер переходного процесса, можно предусмотреть возможность предсказывать износ полоза токоприемника на ранних стадиях, что позволит избежать негативных последствий.

Ключевые слова: токоприемник, электрическая дуга, постоянный ток, переменный ток, РЖД, переходной процесс, износ, выжигание, контактный провод, токовая вставка

Для цитирования: Волков А. В., Ивлиев С. Н., Венчаков П. В. Исследование переходных процессов токоприемника моторвагонного подвижного состава // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 50–55. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

STUDY OF TRANSIENT PROCESSES OF THE CURRENT COLLECTOR OF MOTOR-CAR ROLLING STOCK

A.V. Volkov¹, S.N. Ivliev², P.V. Venchakov³

^{1,2,3} National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

¹elsoldador@rambler.ru, ²ivliev_sn@mail.ru, ³pvenchakov96@gmail.com

Abstract. *Background.* Railway transport, due to large volumes of traffic, must be serviced in a timely and high-quality manner. One of the main problems in the transportation process is the occurrence of an uncontrolled electric arc between the current collector and the contact wire. The article describes the importance of the problem of studying transients in

© Волков А. В., Ивлиев С. Н., Венчаков П. В., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

the occurrence of an electric arc in DC and AC networks. The purpose of the study is to study the temporary transients of the parameters of the electric arc and to identify the natural features of its occurrence. *Materials and methods.* A mathematical model of the electric arc of the current "current collector – contact wire" using the Simulink Matlab package is considered. *Results and conclusions.* The occurrence of an electric arc is accompanied by transient current processes, the value of which can reach several hundred amperes, and these currents, together with the current consumed by the load, can damage the contact wire, burning it out. By analyzing the nature of the transition process, it is possible to predict the wear of the pantograph slide in the early stages, which will avoid negative consequences.

Keywords: current collector, electric arc, direct current, alternating current, RZD, transient process, wear, burning out, contact wire, current insert

For citation: Volkov A.V., Ivliev S.N., Venchakov P.V. Study of transient processes of the current collector of motor-car rolling stock. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4): 50–55. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

Железнодорожный транспорт является основной транспортной системой России. Согласно официальным данным компании ОАО «РЖД» за 2020 – начало 2023 г. электровазы составляют более половины численности всех тяговых машин [1], поэтому обеспечение условий для стабильного функционирования железнодорожных путей требует непрерывного контроля и технического обслуживания.

Электроваз – это локомотив на основе тяговых электродвигателей, который питается от распределенных электросистем переменного или постоянного тока. Электроваз получает энергию от контактной сети через токоприемник, который установлен на крыше и скользит по контактному проводу при движении железнодорожного состава.

Одна из актуальных проблем – определение и в будущем прогнозирование износа токопроводящих частей системы «контактный провод – токоприемник». Проблема объясняется тем, что во время движения сложно точно определить степень износа токопроводящей вставки пантографа, а ее замена возможна только в специализированных пунктах технического обслуживания (ПТО). ПТО в свою очередь располагаются не на каждом пути следования подвижного состава, а плановый осмотр токоприемников не всегда является достаточным основанием для уверенности в том, что в пути следования не возникнет нештатных ситуаций. Указанная выше проблема актуальна, так как если изучить характер переходных процессов, то можно более точно предсказывать, когда нужно менять накладку токоприемника, чтобы избежать его перегорания в пути следования подвижного состава и дальнейших возможных негативных последствий.

Наряду с износом угольных накладок пантографа в процессе эксплуатации контактный провод также может быть поврежден в результате возникновения электрической дуги. Электрическая дуга представляет собой процесс прохождения тока в среде ионизированных газов при термическом характере их ионизации [2]. Составляющие компоненты электрической дуги [2] представлены на рис. 1.

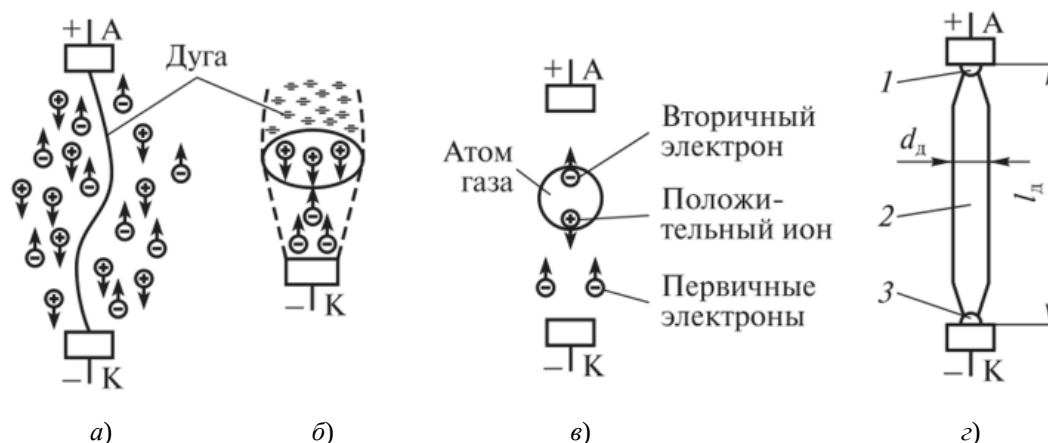


Рис. 1. Составляющие компоненты электрической дуги: а – направление движения электронов и ионов в дуге; б – возникновение автоэлектронной эмиссии из катода; в – возникновение ударной ионизации атомов газа в пространстве между контактами; г – состав электрической дуги

В электрической дуге постоянного тока в установившемся режиме определяющей является термическая ионизация. В дуге переменного тока при переходе тока через нуль существенную роль играет ударная ионизация, а в течение остального времени горения дуги – термическая ионизация [2, 3].

Выделим две опасных ситуации, которые могут возникнуть вследствие электрической дуги: прогорание контактного провода и прогорание контактной части токоприемника.

Анализ случаев пережогов контактных проводов на железных дорогах постоянного тока показал, что они происходят как при открытой электрической дуге, так и при контакте между ползцом и проводом [3, 4]. Дуга появляется:

- при заворачивании ползцом пантографа на воздушных промежутках и секционных изоляторах контактных проводов, находящихся под большой разностью потенциалов;
- при опускании пантографа под нагрузкой;
- при соприкосновении контактного провода с заземленными предметами;
- при гололеде на контактном проводе и т.д.

Пережоги проводов при контакте между ползцом пантографа и проводом происходят обычно при коротких замыканиях на электроподвижном составе, вследствие чего возникает электрическая дуга. В самом худшем случае возможно повреждение контактного провода и/или частей токоприемника в месте трения.

На рис. 2 и 3 представлены основные виды износа ползца токоприемника (все снимки сделаны под микроскопом с увеличением $\times 10$ для более детального изучения).

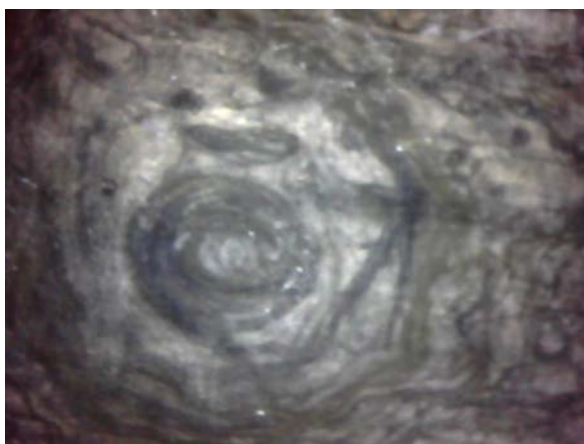


Рис. 2. Результат возникновения электрического пробоя в графитовой вставке в результате возникновения электрической дуги (верхняя сторона графитовой вставки)

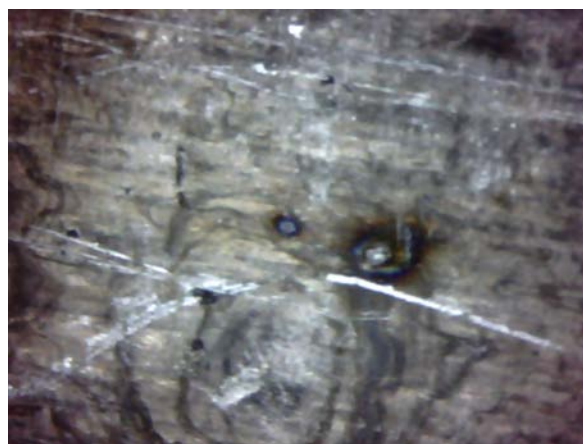


Рис. 3. Результат возникновения электрического пробоя в графитовой вставке в результате возникновения электрической дуги (нижняя сторона графитовой вставки)

Исследование переходных процессов токоприемника проводилось в среде MATLAB. Для упрощения математического моделирования представим токоприемник в виде схемы замещения, представленной на рис. 4. Система представляет из себя источник постоянного напряжения U_g , активное сопротивление R токоприемника, а точнее графитовой вставки ползца и индуктивность L токоприемника. Напряжение возникновения дуги представлено в виде U_{arc} – это напряжение возникает в случае, когда происходит пробой между ползцом и контактным проводом в процессе движения моторвагонного подвижного состава.

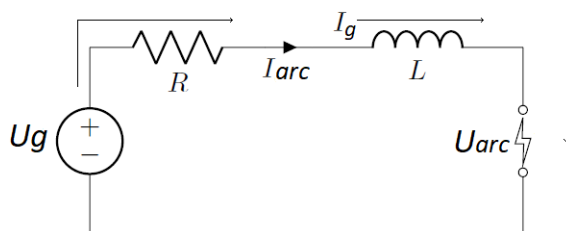


Рис. 4. Схема замещения тока приемника

В начальный момент времени пробой не возникает, так $U_{arc} = 0$, при этом в цепи протекает ток равный току нагрузки I_g , искровой зазор минимален, так как он представляет из себя процесс скольжения полоза по контактному проводу. В момент, когда контакт между проводом и ползком начинает пропадать, увеличивается искровой зазор и возникает пробой, напряжение V_{arc} начинает расти до того момента, пока напряжение V_{arc} не достигнет величины, определяемой следующим выражением:

$$U_g = U_R + U_{arc} + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

При этом следует учитывать тот факт, что ток электрической дуги I_{arc} будет расти, пока не выполнится следующее выражение:

$$I_g = -I_{arc} + \int_{t_0}^t \frac{U(t)}{L} dt. \quad (2)$$

Также следует отметить, что величина тока, протекающего в нагрузке и ток образования электрической дуги зависят в первую очередь от того, как будет меняться искровой зазор, при этом может получиться так, что соотношения тока, показанного в выражении (2), а также соотношение значений напряжений в выражении (1) будут меняться скачкообразно.

Необходимо отметить, что в процессе образования электрической дуги ток будет ограничен лишь сопротивлением R , а изменение напряжения электрической дуги U_{arc} будет определяться величиной индуктивности L в начальный момент времени, когда дуга зажжется, то величина индуктивности L вообще не окажет никакого влияния на величину тока, так как активным сопротивлением ее можно пренебречь, оно очень мало по сравнению с величиной R .

На рис. 5 представлены результаты моделирования процессов образования электрической дуги в процессе движения моторвагонного подвижного состава.

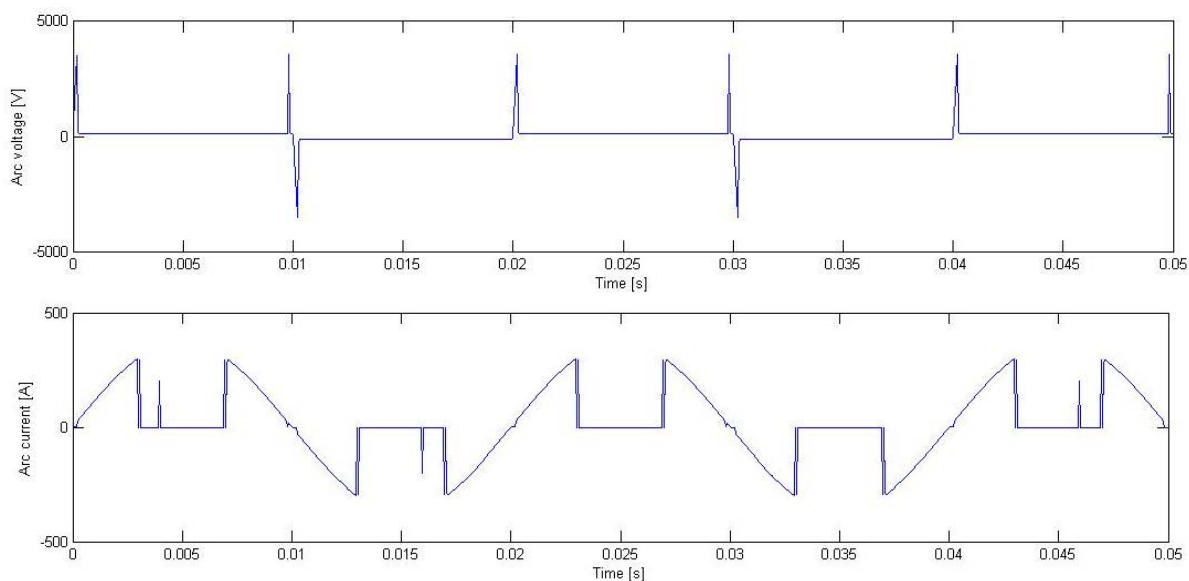


Рис. 5. Результаты моделирования

Из рис. 5 видно, что в моменты возникновения электрической дуги возникают переходные процессы как в токе, так и в напряжении. Нулевое значение тока на графике означает нормальный режим работы токоприемника, а импульсы, указанные на графике, показывают характер переходного процесса во время возникновения электрической дуги в ходе движения моторвагонного подвижного состава.

Заключение

Возникновение электрической дуги сопровождается переходными процессами тока, значение которого может достигать нескольких сотен ампер и эти токи совместно с током, потребляемым нагрузкой, могут повредить контактный провод, пережигая его. Анализируя характер

переходного процесса, можно предусмотреть возможность предсказывать износ полоза токоприемника на ранних стадиях, что позволит избежать негативных последствий.

Величина ошибки моделирования составляет порядка 8 %, что является приемлемым значением для рассмотренной выше математической модели переходного процесса.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации № 887-р от 17 июня 2008 г.
2. Сугак Е. В. Прикладная теория надежности. Ч. 1. Основы теории. 2-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 276 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/318461> (дата обращения: 01.09.2023).
3. Ишков А. С. Система поддержки принятия решения для оценивания показателей надежности изделий электронной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 16–23. doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-2
4. Чередов А. И., Щелканов А. В. Физические методы неразрушающего контроля : учеб. пособие. Омск : ОмГТУ, 2022. 136 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/343661> (дата обращения: 01.09.2023).

References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation No. 887-r dated June 17, 2008. (In Russ.)
2. Sugak E.V. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti. Ch. 1. Osnovy teorii. 2-e izd., ster. = Applied theory of reliability. Part 1. Fundamentals of theory. 2nd ed., ster.* Saint Petersburg: Lan', 2023:276. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/318461> (accessed 01.09.2023).
3. Ishkov A.S. Decision support system for evaluating reliability indicators of electronic equipment products. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4): 16–23. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-2
4. Cheredov A.I., Shchelkanov A.V. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya: ucheb. posobie = Physical methods of non-destructive testing : textbook.* Omsk: OmGTU, 2022:136. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/343661> (accessed 01.09.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Владимирович Волков

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационной
безопасности и сервиса,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)
E-mail: elsoldador@rambler.ru

Anton V. Volkov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information security and service,
National Research Ogarev Mordovia State University
(39 B. Khmel'nitsky street, Saransk, Russia)

Сергей Николаевич Ивлиев

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационной
безопасности и сервиса,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)
E-mail: ivliev_sn@mail.ru

Sergey N. Ivliev

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department
of information security and service,
National Research Ogarev Mordovia State University
(39 B. Khmel'nitsky street, Saransk, Russia)

Павел Вячеславович Венчаков

аспирант,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)
E-mail: pvenchakov96@gmail.com

Pavel V. Venchakov

Postgraduate student,
National Research Ogarev Mordovia State University
(39 B. Khmel'nitsky street, Saransk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 01.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 02.10.2023

Принята к публикации/Accepted 01.11.2023

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

УДК 004.932.2

doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-7

СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ В МЕДИЦИНСКОЙ СФЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Д. С. Потехин¹, П. В. Комаров²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹msyst@msyst.ru, ²pashabox123@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В медицинской сфере ведется работа над разработкой специального устройства, предназначенного для приема и обработки данных с ультразвуковых датчиков. Это устройство имеет целью обнаружение заболеваний на ранней стадии. *Материалы и методы.* С помощью ультразвука измеряется толщина стенок сосудов и вен, что позволяет проводить оценку состояния сердечно-сосудистой системы. Ультразвуковые датчики размещаются на теле пациента в виде фазированной решетки, что способствует повышению точности и площади измерений. *Результаты и выводы.* Создание устройства для сбора и обработки данных с ультразвуковых датчиков имеет большой потенциал для ранней диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы человека.

Ключевые слова: ПЛИС, ультразвук, архитектура, сердечно-сосудистая система человека, ультразвуковые датчики, фазированная решетка

Для цитирования: Потехин Д. С., Комаров П. В. Создание устройства для сбора и обработки данных с ультразвуковых датчиков в медицинской сфере деятельности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 56–63. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-7

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR RECEIVING AND PROCESSING DATA FROM ULTRASOUND SENSORS IN THE MEDICAL FIELD

D.S. Potekhin¹, P.V. Komarov²

^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹msyst@msyst.ru, ²pashabox123@yandex.ru

Abstract. *Background.* In the medical field, work is underway to develop a special device designed to receive and process data from ultrasound sensors. This device aims to detect diseases at an early stage. *Materials and methods.* Ultrasound is used to measure the thickness of the walls of blood vessels and veins, which makes it possible to assess the state of the cardiovascular system. Ultrasonic sensors are placed on the patient's body in the form of a phased array, which helps to increase the accuracy and measurement area. *Results and conclusions.* The creation of a device for collecting and processing data from ultrasound sensors has great potential for early diagnosis of diseases of the human cardiovascular system.

Keywords: FPGA, ultrasound, architecture, human cardiovascular system, ultrasonic sensors, phased array

For citation: Potekhin D.S., Komarov P.V. Development of a device for receiving and processing data from ultrasound sensors in the medical field. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):56–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-7

Введение

Разработка устройства для приема и обработки данных с ультразвуковых датчиков в медицинской сфере является актуальной задачей сегодняшнего времени. Оно представляет собой инновационное решение, которое позволит обнаруживать наличие болезней на ранней стадии и предпринимать своевременные меры для их лечения. В данной статье рассматриваются основные аспекты разработки такого устройства и его потенциальные преимущества [1].

Основой разрабатываемого устройства является программируемая логическая интегральная схема (сокращенно ПЛИС) серии Zynq 7000. Она обеспечивает высокую производительность и гибкость в настройке, что позволяет эффективно обрабатывать данные с ультразвуковых датчиков. Отладочная плата с ПЛИС имеет в своей периферии разъем FSMC, через который подключен модуль, состоящий из одного двухканального ЦАП DAC 3283 и двух одноканальных АЦП LTC 2204. Данный модуль позволит подключить два ультразвуковых датчика (УЗД) к ПЛИС.

Это позволяет считывать и обрабатывать данные, полученные от ультразвуковых датчиков, с высокой точностью и разрешением. АЦП преобразует аналоговый сигнал, полученный от датчиков, в цифровой формат, который затем может быть обработан и проанализирован с использованием программной логики на ПЛИС. ЦАП, в свою очередь, позволяет генерировать аналоговые сигналы на УЗД датчик, выступая в роли генератора сигнала.

В будущем планируется увеличить число УЗД в несколько раз и установить усилители сигнала на вход и выход датчиков, таким образом удастся реализовать ультразвуковую фазированную решетку [2], которая обеспечит динамическое фокусирование в нескольких точках одновременно. Расположение УЗД в виде фазированной решетки представлено на рис. 1. Ультразвуковые фазированные решетки часто применяются для поиска препятствий на поверхности и обнаружения мелких объектов [3], кроме этого, они используются и для анализа слоистых структур [4, 5]. Такая архитектура системы обеспечивает высокую производительность и гибкость в обработке данных с ультразвуковых датчиков, что является важным фактором для разработки устройства, предназначенного для диагностики сердечно-сосудистой системы человека. Структура системы представлена на рис. 2.

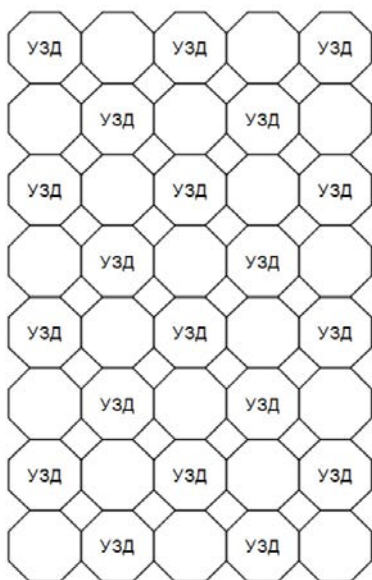


Рис. 1. Расположение УЗД на фазированной решетке

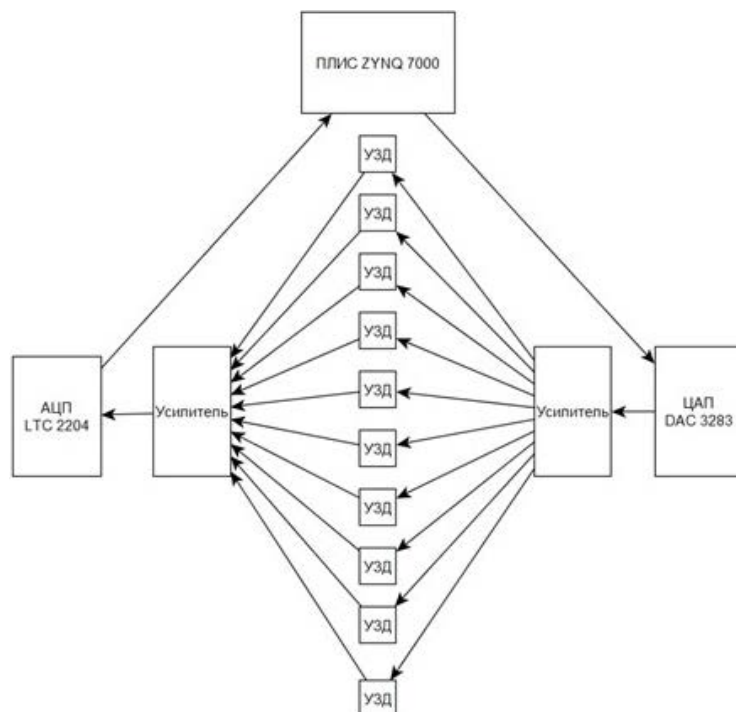


Рис. 2. Структура системы для проведения ультразвуковых измерений

Каждый блок в структурной схеме под названием УЗД, расположенный на рис. 2, состоит из двух ультразвуковых датчиков и среды между ними. Состав одного УЗД представлен на рис. 3. Внешний вид одного блока УЗД из макета представлен на рис. 4.



Рис. 3. Состав одного блока УЗД, указанных на рис. 1

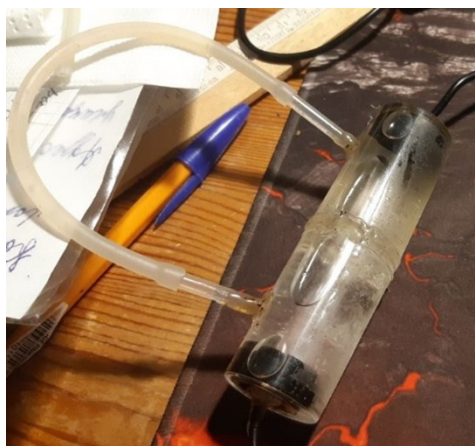


Рис. 4. Внешний вид одного УЗД блока из макета

Основные преимущества устройства

Одним из главных преимуществ разрабатываемого устройства является его неинвазивность. Оно позволяет проводить анализ состояния и работы сердечно-сосудистой системы человека без проникновения внутрь организма. Это делает процесс диагностики более безопасным и комфортным для пациента [1].

Кроме того, устройство будет портативным и легким, что позволит носить его на себе и не ощущать дискомфорта. Оно будет включать в себя ультразвуковые датчики, расположенные в области сердца человека, а также манжету на плечо левой руки. Такая конфигурация позволит системе считывать данные со всех датчиков [6] и передавать результаты исследования на телефон или смарт-часы, что позволит пациенту контролировать работу своего организма. В отличие от акустических микроскопов Титова – Маева, данное устройство является портативным [7]. Концепция крепления устройства на теле человека представлено на рис. 5.

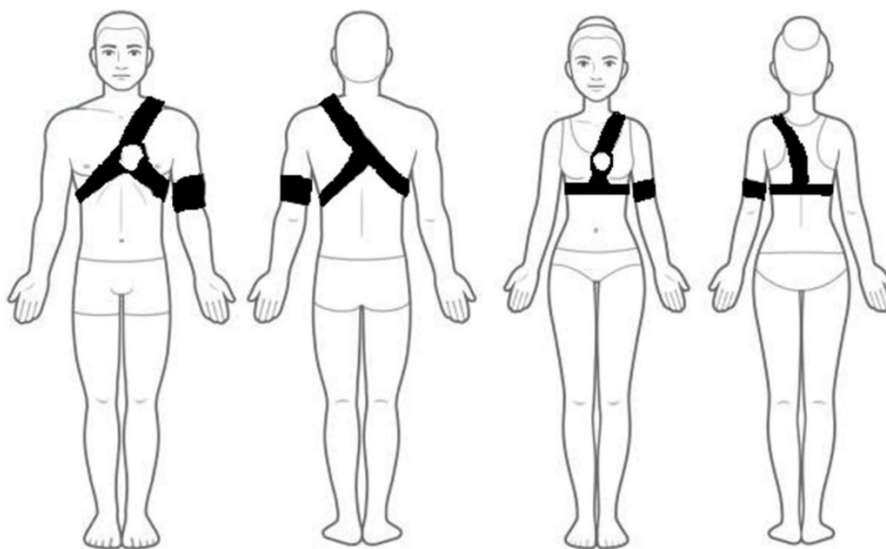


Рис. 5. Концепция крепления устройства на теле человека

Алгоритм работы системы основан на сопоставлении измеренных данных с нормальными значениями, характерными для здорового состояния человека. В случае выявления отклонений система анализирует их и выдает результаты, указывающие на возможное наличие заболевания на ранней стадии. Важно отметить, что после получения таких результатов необходимо проконсультироваться с врачом для дальнейшего лечения.

Разработка устройства для приема и обработки данных с ультразвуковых датчиков в медицинской сфере представляет собой перспективное направление. Его внедрение позволит обнаруживать заболевания на ранней стадии и предпринимать необходимые меры для их лечения [1, 8]. Устройство обладает несколькими преимуществами, такими как неинвазивность, портативность и возможность контроля состояния организма пациента. Важно продолжать разработку данного устройства и проводить дальнейшие исследования для его оптимизации и улучшения.

В дальнейшей разработке данного устройства планируется использовать метод ультразвуковой голографии для определения координат тела в среде. Этот метод основан на сравнении голографических карт, полученных с помощью ультразвуковых датчиков. При добавлении материального объекта в среду устройство будет способно определить его координаты и отобразить их на голографической карте. Принцип изображен на рис. 6. Это позволит расширить возможности устройства и использовать его не только для измерения состояния сердечно-сосудистой системы, но и для более точного определения расположения объектов внутри организма. Это может быть полезно, например, при проведении медицинских процедур или операций, где точное определение координат объектов является критически важным. Таким образом, разработка устройства для приема и обработки данных с ультразвуковых датчиков в медицинской сфере продолжается, и добавление метода ультразвуковой голографии позволит расширить его функциональность и повысить точность определения и анализа данных.

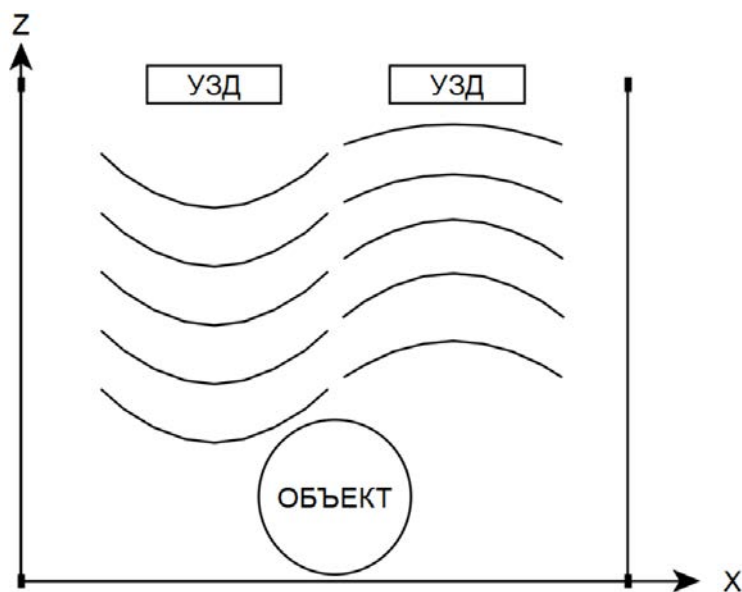


Рис. 6. Принцип ультразвуковой голографии на примере двух датчиков

Для составления голографической карты используется формула

$$f = \frac{v}{2L}, \quad (1)$$

где f – частота ультразвуковых волн; v – скорость ультразвука в воздухе; L – расстояние между датчиками.

Скорость ультразвука зависит от среды, в которой он распространяется. В воздухе она составляет около 340 м/с, а в воде – около 1500 м/с.

Для обнаружения местоположения объекта с помощью двух ультразвуковых датчиков используется формула

$$x = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{L_1 - L_2}, \quad (2)$$

где x – расстояние до объекта; f_1 и f_2 – частоты ультразвуковых волн от первого и второго датчиков соответственно; L_1 и L_2 – расстояния до объекта от первого и второго датчиков.

Для определения расстояния от ультразвукового датчика до объекта используется формула

$$r = \frac{vt}{2}, \quad (3)$$

где r – расстояние до объекта; v – скорость звука; t – время прохождения ультразвукового сигнала от датчика до объекта и обратно.

Для определения координат объекта по координатам x , y и z с помощью двух ультразвуковых датчиков используются формулы

$$x = \frac{(f_2 - f_1)L_1}{c}; \quad (4)$$

$$y = \frac{(f_1 - f_2)L_2}{c}; \quad (5)$$

$$z = \frac{(f_1 + f_2)(L_1 + L_2)}{2c}, \quad (6)$$

где x , y и z – координаты объекта; f_1 и f_2 – частоты ультразвуковых сигналов от первого и второго датчиков; L_1 и L_2 – длины лучей, испускаемых первым и вторым датчиками соответственно; c – скорость ультразвука в вакууме.

В воде скорость звука будет меньше, чем в вакууме, поэтому формула для определения координат x , y и z объекта будет рассчитываться следующим образом:

$$x = \frac{\frac{f_2 - f_1}{2} \frac{L_1 + (2d)}{v} - \frac{L_1 - d}{v}}{\frac{v}{v}}; \quad (7)$$

$$y = \frac{\frac{f_1 - f_2}{2} \frac{L_2 + (2d)}{v} - \frac{d + L_2}{v}}{\frac{v}{v}}; \quad (8)$$

$$z = \frac{\frac{f_1 + f_2}{4} \left(2 \left(\frac{L_1 + d}{\frac{L_1 - d}{v} + \frac{d + L_2}{v}} \right) v \right)}{2v}. \quad (9)$$

Здесь d – глубина воды, в которой находится объект.

Для фазированной решетки из 20 датчиков можно использовать ту же формулу, что и для двух датчиков, только вместо расстояний между датчиками нужно будет использовать расстояния между элементами решетки. Например, для обнаружения местоположения объекта будет использоваться формула

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{20} f_{1_i} L_{1_i} - \sum_{i=1}^{20} f_{2_i} L_{2_i}}{2 \left(\sum_{i=1}^{20} L_{1_i} - L_{2_i} \right)}, \quad (10)$$

где f_{1i} и f_{2i} – частоты ультразвуковых сигналов, испускаемых i -м датчиком; L_{1i} и L_{2i} – расстояния от i -го датчика до объекта.

Для определения координаты объекта в фазированной решетке из 20 элементов используем следующие формулы:

$$x = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{20} \frac{(f_i L_i) - (f_j L_j)}{L_i - L_j}; \quad (11)$$

$$y = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{20} \frac{(f_j L_i) - (f_i L_j)}{L_j - L_i}; \quad (12)$$

$$z = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{20} \frac{(f_i + f_j)(L_i + L_j)}{2v}, \quad (13)$$

где f_i и f_j – частоты ультразвука для каждого элемента решетки; L_i и L_j – расстояния до объекта для каждого элемента, v – скорость ультразвука в среде.

Результаты и обсуждение

Для демонстрации работоспособности ультразвукового измерения было решено между датчиками расположить воду как среду, соединяющую два датчика, в результате чего удалось снять показания с ультразвуковых датчиков в момент динамического воздействия на среду, точнее на воду, показания представлены в виде сигнала на рис. 7.

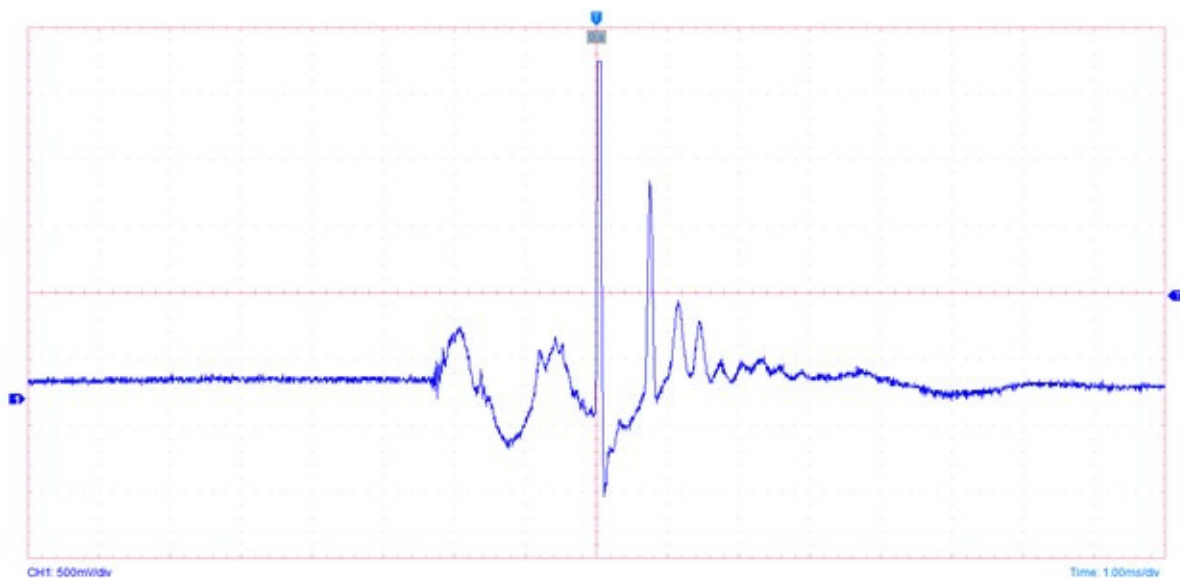


Рис. 7. Сигнал с ультразвукового датчика в момент динамического воздействия на среду (воду), расположенную между датчиками

Эти эксперименты позволили получить ценные данные о взаимодействии ультразвуковых датчиков с водой в качестве среды. Измерения показали, что ультразвуковые волны способны проникать через воду и обнаруживать изменения в ее состоянии под воздействием внешних факторов. Это подтверждает возможность использования ультразвуковых датчиков для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека, так как сердечно-сосудистая система тесно связана с циркуляцией крови, которая, в свою очередь, содержит воду [8].

Заключение

Таким образом, разработка устройства для приема и обработки данных с ультразвуковых датчиков в медицинской сфере имеет большой потенциал для ранней диагностики заболеваний

и контроля состояния сердечно-сосудистой системы человека. Это позволит спасти множество жизней и улучшить качество медицинского обслуживания.

Список литературы

1. Никифорова А. И., Чихирев А. С. Применение ультразвука для диагностики различных патологий // Аллея науки. 2023. Т. 2, № 5. С. 173–175. EDN: NUWUMF
2. Фазированная решетка. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array
3. Свойства УЗ-волны и особенности ее распространения. URL: <https://textarchive.ru/c-2274764.html>
4. Титов С. А., Богаченков А. Н. Визуализация и характеристика малых объектов в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6, № 6. С. 66–73. doi: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73
5. Титов С. А., Маев Р. Г., Богаченков А. Н. Линзовый акустический микроскоп с линейной решеткой в режиме измерения параметров слоистых объектов // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4, № 2. С. 25–30.
6. Батяев А. С., Бодин О. Н., Чыонг Т. Л. Н. [и др.] Обеспечение электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 89–96. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11
7. Титов С. А., Маев Р. Г., Богаченко А. Н. Линзовый многоэлементный акустический микроскоп в режиме измерения параметров слоистых объектов // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 5. С. 546–552. doi: 10.7868/S0320791917050136
8. Лаппо Н. М., Галаганова В. Н., Шишкина К. Н. Влияние ультразвука на жидкости // Материалы докладов 50-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвященной году науки (г. Витебск, 12–13 апреля 2017 г.) : в 2 т. Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2017. Т. 1. С. 359–361. EDN: ZICMON

References

1. Nikiforova A.I., Chikhirev A.S. The use of ultrasound for the diagnosis of various pathologies. *Alleya nauki = Alley of Science*. 2023;2(5):173–175. (In Russ.). EDN: NUWUMF
2. *Fazirovannaya reshetka = Phased array*. (In Russ.). Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array
3. *Svoystva UZ-volny i osobennosti ee rasprostraneniya = Properties of the ultrasonic wave and features of its propagation*. (In Russ.). Available at: <https://textarchive.ru/c-2274764.html>
4. Titov S.A., Bogachenkov A.N. Visualization and characterization of small objects in a lens acoustic microscope with a two-dimensional lattice. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6):66–73. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73
5. Titov S.A., Maev R.G., Bogachenkov A.N. A lens acoustic microscope with a linear lattice in the mode of measuring parameters of layered objects. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal*. 2016;4(2):25–30. (In Russ.)
6. Batyaev A.S., Bodin O.N., Chyong T.L.N. et al. Ensuring electromagnetic compatibility in the registration system of multiple leads of an electrocardiosignal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):89–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11
7. Titov S.A., Maev R.G., Bogachenko A.N. Lens multi-element acoustic microscope in the mode of measuring parameters of layered objects. *Akusticheskiy zhurnal = Acoustic Journal*. 2017;63(5):546–552. (In Russ.). doi: 10.7868/S0320791917050136
8. Lappo N.M., Galaganova V.N., Shishkina K.N. The effect of ultrasound on liquids. *Materialy докладov 50-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. prepodavateley i studentov, posvyashchennoy godu nauki (g. Vitebsk, 12–13 aprelya 2017 g.): v 2 t. = Materials of the reports of the 50th International Scientific and Technical Conference Conference of teachers and students dedicated to the Year of Science (Vitebsk, April 12–13, 2017) : in 2 vol*. Vitebsk: Viteb. gos. tekhnol. un-t, 2017;1:359–361. (In Russ.). EDN: ZICMON

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Станиславович Потехин
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры вычислительной техники,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: msyst@msyst.ru

Dmitry S. Potekhin
Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of computer engineering,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Павел Вячеславович Комаров

аспирант,

МИРЭА – Российский технологический

университет

(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

E-mail: pashabox123@yandex.ru

Pavel V. Komarov

Postgraduate student,

MIREA – Russian Technological University

(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 14.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 13.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ ПОМЕХ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА СЕГМЕНТАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

А. Ю. Бодин¹, М. Н. Крамм², Л. Ю. Кривоногов³,
Н. А. Сержантова⁴, Чыонг Тхи Лан Нхи⁵

^{1,2,5} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁴ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ Bodin98@mail.ru, ² KrammMN@mail.ru, ³ leonidkrivonogov@yandex.ru,

⁴ itmmbpsgta@yandex.ru, ⁵ truongthilannhi@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала. Повышение помехоустойчивости при обработке ЭКС позволяет повысить достоверность автоматических заключений и в конечном счете способствует повышению качества диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний. *Материалы и методы.* Выполнена классификация электрокардиографических помех и разработан способ сегментации электрокардиосигнала, позволяющие повысить возможности существующих методов помехоустойчивой обработки электрокардиосигнала. *Результаты и выводы.* Представленная классификация и разработанный способ сегментации электрокардиосигнала позволяют повысить возможности существующих методов помехоустойчивой обработки ЭКС; оценить возможность внедрения новых математических аппаратов в приведенные решения.

Ключевые слова: помехи, электрокардиосигнал, классификация электрокардиографических помех, сегментация электрокардиосигнала

Для цитирования: Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Кривоногов Л. Ю., Сержантова Н. А., Чыонг Тхи Лан Нхи. Классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8

CLASSIFICATION OF ELECTROCARDIOGRAPHIC INTERFERENCE AND REVIEW OF METHODS FOR NOISE-INSTANT PROCESSING OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL

A.Yu. Bodin¹, M.N. Kramm², L.Yu. Krivonogov³,
N.A. Serzhantova⁴, Truong Thi Lan Nhi⁵

^{1,2,5} National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

⁴ Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ Bodin98@mail.ru, ² KrammMN@mail.ru, ³ leonidkrivonogov@yandex.ru,

⁴ itmmbpsgta@yandex.ru, ⁵ truongthilannhi@gmail.com

Abstract. *Background.* The article is devoted to the classification of electrocardiographic interference and the development of termination of electrocardiographic signal segmentation. Increasing noise immunity when processing ECS allows you to increase the accuracy of automatic conclusions and, in the traditional sense, ensure the quality of diagnosis and treatment of cardiovascular diseases. *Materials and methods.* In this work, a classification of electrocardiographic interference was carried out and a method for segmenting the electrocardiographic signal was developed, which makes it possible to increase the capabilities of these methods of noise-resistant processing of the electrocardiographic signal. *Results and conclusions.* The presented classification and the developed method for segmenting the electrocardiographic signal make

it possible to increase the capabilities of existing methods of noise-resistant processing of ECS; evaluate the possibility of developing new mathematical tools in the proposed solutions.

Keywords: interference, electrocardiographic signal, classification of electrocardiographic interference, segmentation of electrocardiographic signal

For citation: Bodin A.Yu., Kramm M.N., Krivonogov L.Yu., Serzhantova N.A., Truong Thi Lan Nhi. Classification of electrocardiographic interference and review of methods for noise-resistant processing of electrocardiographic signal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8

Введение

Сравнение эффективности различных диагностических методов показывает, что наиболее полезная информация о функционировании внутренних органов и физиологических систем организма содержится в биоэлектрических сигналах, снимаемых с различных участков под кожным покровом или с поверхности тела [1]. Прежде всего это относится к электрической активности сердца, электрическому полю головного мозга, электрическим потенциалам мышц. Именно эти важнейшие электрофизиологические процессы требуют особого внимания и создания электронной аппаратуры для решения конкретных задач их анализа в диагностических целях.

Электрокардиосигналы (ЭКС) проявляются как слабые сигналы в окружении многих других сигналов различного происхождения. Это и есть помехи, существенно искажающие (маскирующие) полезный сигнал и затрудняющие обработку и выявление диагностических признаков в ЭКС. Классическое определение помехи относится к технике связи: «Помехой называется стороннее возмущение, действующее в системе передачи и препятствующее правильному приему сигналов» [2]. В работе [3] дано определение помехи как стороннего возмущения, действующего на средство измерения и искажающего результаты измерения.

Вместе с термином «помеха» широко распространен термин «шум». Шумами принято называть случайные аддитивные помехи, при этом обычно речь идет о помехах, имеющих более высокочастотный спектр, чем полезный сигнал [4].

Основные источники шумов и помех в ЭКС – это:

- влияние сетевых помех с частотой 50 Гц (или 60 Гц) и гармоник сетевого напряжения;
- влияние изменений параметров контакта электрода с кожей, что приводит к дрейфу постоянных составляющих;
- мышечные сокращения: на ЭКС накладываются сигналы типа миограммы;
- дыхательные движения вызывают смещение постоянной составляющей;
- электромагнитные наводки от других электронных устройств, когда провода электродов отведений при регистрации ЭКС играют роль антенн;
- высокочастотные шумы от других электронных устройств.

Предсказать характеристики помех на конкретном участке ЭКС не представляется возможным, поэтому принципиальной особенностью обработки электрокардиосигналов является априорная неопределенность сигнально-помеховой обстановки (СПО).

Разнообразие электрокардиографических помех, их негативное влияние на полезный сигнал и результат автоматической диагностики требуют рассмотрения и анализа методов и алгоритмов помехоустойчивой обработки ЭКС.

По мнению авторов, необходимо различать понятия «помехозащищенность» и «помехоустойчивость».

Под помехозащищенностью радиотехнического устройства (системы) понимается способность выполнять функциональные задачи и противостоять в условиях воздействия внешних и внутренних помех, а под помехоустойчивостью радиотехнического устройства (системы) понимается способность устройства (системы) выполнять свои функции при наличии помех. Помехоустойчивость оценивают интенсивностью помех, при которых нарушение функций устройства (системы) еще не превышает допустимых пределов [5]. Помехоустойчивость, таким образом, является основной составляющей помехозащищенности.

Данная статья посвящена классификации существующих электрокардиографических помех и разработке способа сегментации электрокардиосигнала, необходимого при помехоустойчивой обработке ЭКС.

Помехи маскируют и искажают полезный сигнал, что затрудняет выявление диагностической информации. Следовательно, важнейшим показателем системы неинвазивной ЭКГ-диагностики является ее помехоустойчивость.

Классификация электрокардиографических помех по источникам формирования

Классификация источников электрокардиографических помех приведена на рис. 1.



Рис. 1. Источники электрокардиографических помех

Согласно рис. 1 источники электрокардиографических помех разделяются на внешние и внутренние.

Внешние источники помех. Внешние источники помех делятся на природные и техногенные. Природными источниками помех являются электромагнитные атмосферные и космические явления и электростатические поля природного происхождения. Помехи от этих источников представляют собой смесь импульсных и флуктуационных процессов. Техногенные помехи вызваны электромагнитными и электростатическими полями, а также токами гальванической связи. Источниками этих полей являются провода силовой электрической сети, электродвигатели, системы радиосвязи, электрохирургическая и физиотерапевтическая аппаратура. Максимальное влияние на ЭКС оказывают помехи от сети переменного тока и импульсные помехи, возникающие при коммутации мощной аппаратуры. Вероятность помехового воздействия от электростатических полей возрастает при увеличении межэлектродного сопротивления и входного сопротивления биоусилителя [6].

Внутренние источники помех могут быть подразделены на инструментальные, биологические и согласования. Инструментальными источниками помех являются шумы электронных узлов и линий связи, а также импульсы электрокардиостимуляторов. Наибольший вклад вносят собственные шумы электродов [6], некоторые узлы (усилители, защитные резисторы, АЦП) и линии связи (в первую очередь кабель отведений). Применительно к измерительным цепям эти помехи рассмотрены в работах [7, 8].

Источниками биологических помех (внутренних помех самого биообъекта) являются биопотенциалы мышц (в меньшей степени и других органов) и двигательная активность пациента. Движения приводят не только к появлению мышечных потенциалов, но и к перемещению органов и тканей относительно друг друга, изменению разности потенциалов между внутренними слоями ткани и внешней поверхностью кожи, что ведет к изменению распределения электрического поля сердца на поверхности тела. Кроме того, движения приводят к увеличению помех согласования.

Источниками помех согласования являются кожно-электродные и поляризационные потенциалы, изменения межэлектродного импеданса, электрокинетические явления [9].

Классификация электрокардиографических помех по характеру воздействия на полезный сигнал

Классификация электрокардиографических помех по характеру воздействия на полезный сигнал приведена на рис. 2.

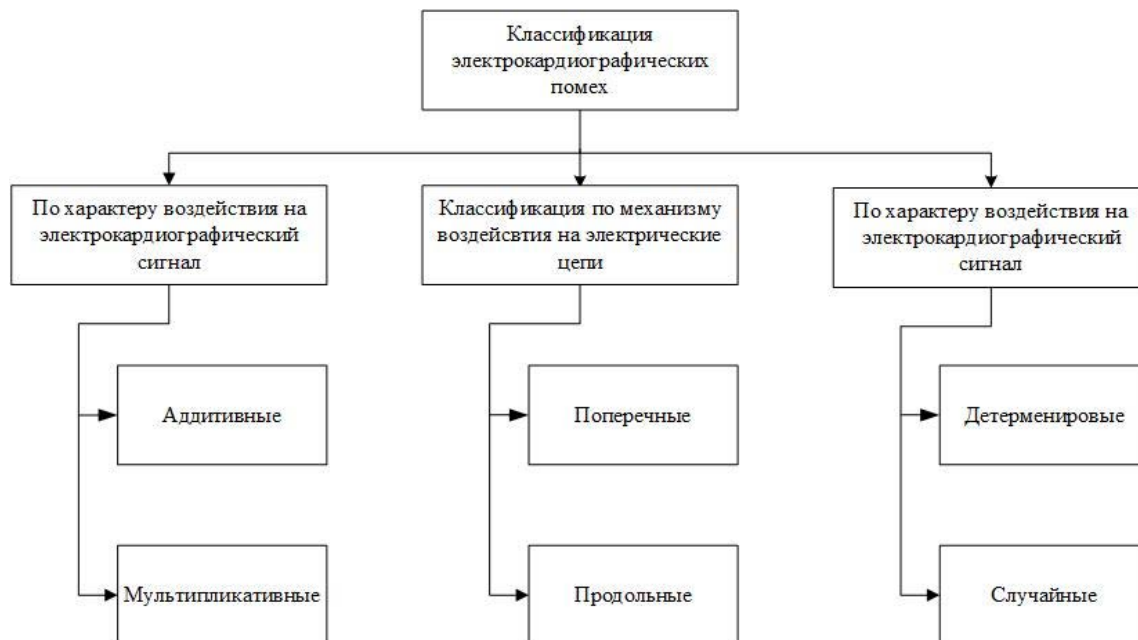


Рис. 2. Классификация электрокардиографических помех

Электрокардиографические помехи по характеру воздействия на ЭКС разделяются на аддитивные и мультипликативные помехи.

Аддитивные помехи суммируются с измерительным сигналом.

Мультипликативные помехи изменяют параметр одного из элементов контура передачи сигнала, (например, сопротивление электрод-кожа) и меняют коэффициент передачи полезного сигнала. При этом возникает модуляция величины полезного сигнала помехой.

По механизму воздействия на измерительные цепи различают: *помехи нормального вида (поперечные)* и *помехи общего вида (продольные)*. Поперечные помехи возникают в измерительной цепи, как в электромагнитном контуре. Они обусловлены наличием кондуктивных, емкостных и индуктивных связей измерительных цепей с внешними источниками электрических и электромагнитных сигналов. Это могут быть наводки от силовых кабелей, коммутационных процессов, радиостанций, других измерительных цепей. Такие помехи имеют преимущественно аддитивный характер и называются также дифференциальными, так как по-разному действуют на входы измерительного устройства (мгновенные значения напряжения помехи на входах измерительного устройства равны по величине и противоположны по знаку). К помехам нормального вида относятся составляющие за счет биоэлектрической активности соседних органов, неравенства поляризационных потенциалов электродов, изменения сопротивления кожи [6].

Продольные помехи вызваны наличием разности потенциалов между общими точками измерительной цепи. Эти помехи также называют помехами из-за неэквипотенциальности или помехами заземленных контуров. По характеру воздействия на входы измерительного устройства они являются синфазными – мгновенные значения напряжения помехи на входах совпадают. Наличие емкости между проводами силовой сети и пациентом приводит к появлению на поверхности тела (относительно земли) помехи частотой 50/60 Гц, амплитуду и фазу которой вследствие относительно хорошей проводимости тканей можно считать практически одинаковыми во всех точках тела. Инфранизкочастотные синфазные помехи создаются средним уровнем

поляризационных потенциалов электродов, а средне- и высокочастотные – средним уровнем биоэлектрической активности соседних органов и напряжением кожно-гальванической реакции [6].

В зависимости от возможности точного предсказания мгновенных значений помех в любые моменты времени их можно разделить на *детерминированные* и *случайные*. Детерминированные помехи представляют собой полигармонические паразитные сигналы. Чаще всего это – наводки с частотами питающих сетей, гармоники этих частот, импульсные последовательности. Случайные (флуктуационные) помехи представляют собой случайные процессы, вызванные одновременным действием множества источников.

Помехоустойчивая обработка ЭКС невозможна без рассмотрения вопросов сегментации ЭКС.

Разработка алгоритма сегментации ЭКС

Сегментация сигналов является необходимым действием для определения временных паттернов и выявления диагностических признаков [10].

Для повышения точности сегментации ЭКС целесообразно перейти от одномерного сигнала к двумерному. Наиболее простым способом такого перехода является построение по одномерному сигналу его фазовой траектории на фазовой плоскости. Такое представление ЭКС позволяет одновременно оценивать не только амплитудные, но и скоростные параметры сигнала, что дает возможность повышения достоверности и точности сегментации ЭКС.

Анализ ЭКС на фазовой плоскости основан на оценке скоростных показателей сигнала, при этом координатами фазовой плоскости является амплитуда ЭКС $X(t)$ и производная по времени от ЭКС $X'(t)$. Такой подход в кардиодиагностике известен еще с 70-х гг. прошлого века, когда Н. М. Амосов и его коллеги в работе [11] указывали на возможность исследования сократительной функции миокарда в фазовом пространстве, координатами которого является амплитуда и производная по времени наблюдаемого процесса. Диагностическая ценность представления и анализа ЭКС в координатах $X(t) - X'(t)$ состоит в использовании дополнительной информации, содержащейся в скоростных характеристиках исследуемого процесса. При этом появляется возможность с высокой точностью оценить форму отдельных информативных элементов сигнала и обнаружить в ней такие отклонения, которые обычно скрыты при традиционном анализе ЭКС во временной области [12].

Для сегментации ЭКС разработан алгоритм, который заключается в построении и анализе фазовой траектории (ФТ) кардиоцикла ЭКС в координатах $X_i - \Delta X_i$, где X_i – отсчеты ЭКС, $\Delta X_i = X_i - X_{i+1}$. Участок ФТ, соответствующий QRS комплексу, всегда ярко выражен и представляет собой петлю значительного размера с большими интервалами между значениями соседних отсчетов. Изображение участка ЭКС и соответствующей ему фазовой траектории показано на рис. 3.

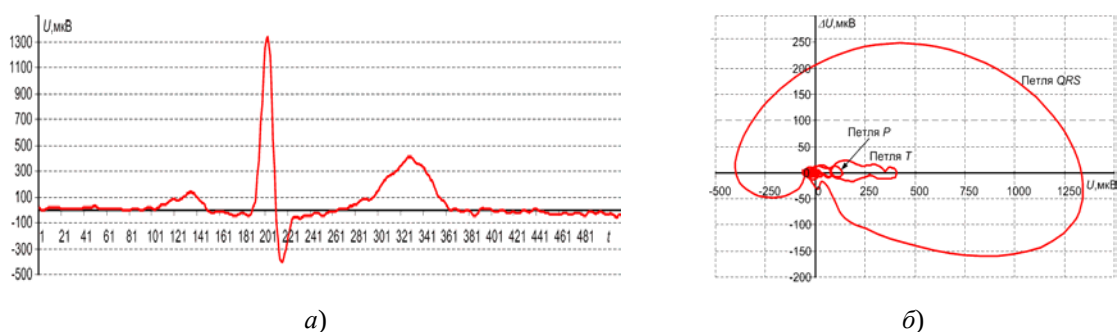


Рис. 3. Фрагмент ЭКС (а) и соответствующая ему фазовая траектория (б)

Основой сегментации ЭКС являются алгоритмы обнаружения информационных участков (ИУ) ЭКС. После обнаружения ИУ ЭКС выделяются R-R интервалы и кардиоциклы. В выделенном кардиоцикле осуществляется обработка ЭКС в фазовом пространстве, координатами которого являются амплитуда и производная по времени от электрокардиосигнала. Полученный график является фазовым портретом (ФП) ЭКС.

Для анализа ФП ЭКС и выделения отсчетов, принадлежащих петле QRS комплекса, каждый отсчет характеризуется тремя составляющими: D – расстояние от значения отсчета на ФП

до начала координат; P – расстояние от значения исследуемого отсчета до значения следующего отсчета на ФП; L – удаленность отсчета от пика зубца R на ЭКС.

Составляющие P и L имеют малые веса по сравнению с D , поэтому при их учете в совокупной характеристике необходимо применять весовые коэффициенты. Для P весовой коэффициент K_P принимается равным отношению максимального расстояния от значения отсчета на ФП до начала координат к максимальному расстоянию между соседними отсчетами на ФП. Для L весовой коэффициент K_L принимается как отношение максимального расстояния от значения отсчета на ФП до начала координат к количеству отсчетов в исследуемом кардиоцикле.

Для выделения отсчетов, принадлежащих петле QRS комплекса, формируются два вектора:

$S1$ – вектор характеристик отсчетов, расположенных слева от отсчета l (пик зубца R), $k = 1 \dots l - 1$, $t = 1 \dots n - 1$ определяется следующим образом:

$$S1 = [D_1 + K_P P_1 + K_L (l - 1); D_2 + K_P P_2 + K_L (l - 2); \dots; D_k + K_P P_k + K_L (l - k)], \quad (1)$$

где $k = 1 \dots l - 1$ – номер отсчета, $t = 1 \dots n - 1$ – дискретное время.

$S2$ – вектор характеристик отсчетов, расположенных справа от отсчета l , определяется выражением

$$S2 = [D_{1+(l+1)} + K_P P_{1+(l+1)} + K_L 2; D_{2+(l+1)} + K_P P_{2+(l+1)} + K_L 2; \dots; D_{k+(l+1)} + K_P P_{k+(l+1)} + K_L k]. \quad (2)$$

где $k = 1 \dots (n - 1) - (l - 1)$.

Границам QRS комплекса соответствуют отсчеты с минимальными значениями: $QRS_{start} = \min_k(S1_k)$ – отсчет, соответствующий началу, $QRS_{stop} = \min_k(S2_k)$ – отсчет, соответствующий окончанию.

Для выделения отсчетов, соответствующих P и T зубцам, проводится аналогичный анализ ФП участков кардиоцикла слева и справа от выделенного QRS комплекса.

На рис. 4 приведены примеры сегментации ЭКС (выделения QRS комплекса, P и T зубцов) с помощью разработанного алгоритма.

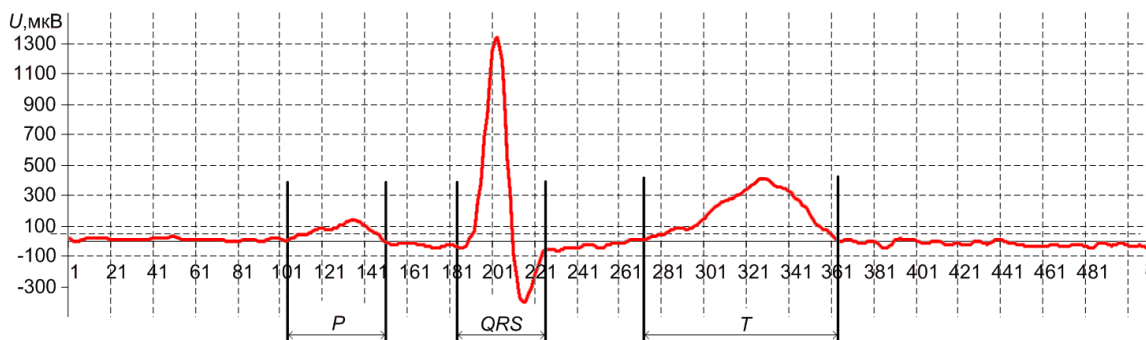


Рис. 4. Пример сегментации ЭКС

Разработанный алгоритм обеспечивает достоверное выделение QRS комплекса ЭКС независимо от вариаций параметров и формы QRS комплексов, а также дрейфа изолинии ЭКС под действием аддитивных низкочастотных помех, что способствует улучшению условий последующей помехоустойчивой обработки и анализа ЭКС.

Заключение

Представленная классификация и разработанный способ сегментации кардиоцикла электрокардосигнала позволяют повысить возможности существующих методов помехоустойчивой обработки ЭКС и оценить возможность внедрения новых математических аппаратов в неинвазивную кардиодиагностику.

Список литературы

1. Зайченко К. В. Съём и обработка биоэлектрических сигналов. СПб., 2001. С. 5–25.
2. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М. : Наука, 1965. 144 с.

3. Шахов Э. К. Повышение помехоустойчивости цифровых средств измерения. Пенза : ППИ, 1983. 48 с.
4. Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Ломтев Е. А. Ожигенов К. А. Помехоустойчивая обработка электрокардиосигналов в системах неинвазивной кардиодиагностики. Алматы : Lem, 2016. 216 с.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. 4-е изд., перераб. и доп. М, 1986. 512 с.
6. Янушкевичус З. И., Чирейкин Л. В., Праневичус А. А. Дополнительно усиленная электрокардиограмма. Л. : Медицина: Ленингр. отд-ние, 1982. 184 с.
7. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами : пер с англ. М. : Мир, 1990. 238 с.
8. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. М. : Мир, 1986. 399 с.
9. Кривоногов Л. Ю. Метод и алгоритмы помехоустойчивой обработки электрокардиосигналов на основе эмпирической модовой декомпозиции // Известия ЮФУ. Технические науки. Медицинские информационные системы. 2014. № 10. С. 104–114.
10. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. Способ автоматизированной сегментации речевых сигналов для определения временных паттернов естественно выраженных психоэмоциональных состояний // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 3. С. 48–60.
11. Амосов Н. М., Агапов Б. Т., Паничкин Ю. В. Исследование сократительной функции миокарда методом фазовых координат // Доклады АН СССР. 1972. 202. № 1. С. 245–247.
12. Файнзилберг Л. С., Лебедушко Т. Ю. Исследование диагностической ценности фазовых портретов ЭКГ по данным специализированных баз // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 169. С. 34–50.

References

1. Zaychenko K.V. *S'em i obrabotka bioelektricheskikh signalov = Removal and processing of bioelectric signals*. Saint Petersburg, 2001:5–25. (In Russ.)
2. Kharkevich A.A. *Bor'ba s pomexhami = Anti-interference*. Moscow: Nauka, 1965:144. (In Russ.)
3. Shakhov E.K. *Povyshenie pomekhoustoychivosti tsifrovyykh sredstv izmereniya = Improving the noise immunity of digital measuring instruments*. Penza: PPI, 1983:48. (In Russ.)
4. Bodin O.N., Krivonogov L.Yu., Lomtev E.A. Ozhigenov K.A. *Pomekhoustoychivaya obrabotka elektrokardiosignalov v sistemakh neinvazivnoy kardiagnostiki = Noise-resistant processing of electrocardiosignals in noninvasive cardiodiagnostics systems*. Almaty: Lem, 2016:216. (In Russ.)
5. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. 4-e izd., pererab. i dop. = Radio engineering circuits and signals. 4th ed., reprint. and add.* Moscow: 1986:512. (In Russ.)
6. Yanushkevichus Z.I., Chireykin L.V., Pranevichyus A.A. *Dopolnitel'no usilennaya elektrokardiogramma = Additionally enhanced electrocardiogram*. Leningrad: Meditsina: Leningr. otd-nie, 1982:184. (In Russ.)
7. Barns Dzh. *Elektronnoe konstruirovaniye: Metody bor'by s pomexhami: per s angl. = Electronic engineering: Anti-interference methods : translated from English*. Moscow: Mir, 1990:238. (In Russ.)
8. Bukingem M. *Shumy v elektronnykh priborakh i sistemakh = Noises in electronic devices and systems*. Moscow: Mir, 1986:399. (In Russ.)
9. Krivonogov L.Yu. Method and algorithms of noise-resistant processing of electrocardiosignals based on empirical mode decomposition. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Meditsinskie informatsionnye sistemy = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. Medical information systems*. 2014;(10):104–114. (In Russ.)
10. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. Method of automated segmentation of speech signals for determining time patterns of naturally expressed psychoemotional states. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(3):48–60. (In Russ.)
11. Amosov N.M., Agapov B.T., Panichkin Yu.V. Investigation of myocardial contractile function by the method of phase coordinates. *Doklady AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1972;202(1):245–247. (In Russ.)
12. Faynzil'berg L.S., Lebedushko T.Yu. Investigation of the diagnostic value of ECG phase portraits according to specialized databases. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika = Cybernetics and computer engineering*. 2012;(169):34–50. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,

Национальный исследовательский университет
"МЭИ"

(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)

E-mail: Bodin98@mail.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,

National Research University "MPEI"

(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Михаил Николаевич Крамм

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

Mikhail N. Kramm

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

Леонид Юрьевич Кривоногов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru

Leonid Yu. Krivonogov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of medical
cybernetics and informatics,
Penza State University, Penza, Russia
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Наталья Александровна Сержантова

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

Natalya A. Serzhantova

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

Чыонг Тхи Лан Нхи

ассистент кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
"МЭИ"
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: truongthilannhi@gmail.com

Truong Thi Lan Nhi

Assistant of the sub-department of radio engineering
fundamentals,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 20.10.2023

Принята к публикации/Accepted 17.11.2023

УДК 004.582
doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-9

ПРИМЕНЕНИЕ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ КОГНИТИВНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ

М. Ю. Костенкова¹, М. А. Сидорова²

¹ Областной онкологический клинический диспансер, Пенза, Россия

² Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ marikost83@mail.ru, ² sidorova_mailbox@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлены результаты реализации возможностей ИТ-технологий в медицинской практике на примере работы отделений реанимации и интенсивной терапии. Авторами статьи разработана система управления медицинскими данными «MedData», в которой реализовано графическое отображение состояния пациента отделений реанимации и интенсивной терапии на основе методов когнитивной графики. *Материалы и методы.* Были реализованы такие методы когнитивной графики, как «тепловая карта», «карта-радар», «диаграмма» с разными форматами графиков, спарклайны. Приведен сравнительный анализ методов когнитивной графики. Обоснован вариант распределения показателей крови на подгруппы. *Результаты и выводы.* Авторами статьи произведено объяснение выбора наглядного графического представления состояния пациента на основе числовых значений показателей крови, сведенных в подгруппы, которые распределены по признаку их функционального значения.

Ключевые слова: когнитивная графика, тепловая карта, диаграмма, многомерные медицинские данные, показатели крови

Для цитирования: Костенкова М. Ю., Сидорова М. А. Применение ИТ-технологий когнитивной визуализации медицинских данных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 72–80. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-9

APPLICATION OF IT-TECHNOLOGIES FOR COGNITIVE VISUALIZATION OF MEDICAL DATA

M.Yu. Kostenkova¹, M.A. Sidorova²

¹ Regional Oncology Clinical Dispensary, Penza, Russia

² Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ marikost83@mail.ru, ² sidorova_mailbox@mail.ru

Abstract. *Background.* The article presents the results of the implementation of the capabilities of IT technologies in medical practice on the example of the work of the departments of intensive care and intensive care. The authors of the article developed the MedData medical data management system, which implements a graphical representation of the patient's condition in intensive care units based on cognitive graphics methods. *Materials and methods.* Such methods of cognitive graphics as "heat map", "map-radar", "diagram" with once-time graph formats, sparklines were implemented. This article provides a comparative analysis of cognitive graphics methods. The option of distributing blood parameters into subgroups is justified. *Results and conclusions.* The authors of the article explained the choice of a visual graphical representation of the patient's condition based on the numerical values of blood parameters reduced into subgroups, which are distributed according to their functional value.

Keywords: cognitive graphics, heat map, diagram, multidimensional medical data, blood displays

For citation: Kostenkova M.Yu., Sidorova M.A. Application of IT-technologies for cognitive visualization of medical data. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4):72–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-9

Актуальность

Стремительное развитие средств компьютерной графики и интерактивного представления больших объемов разнородных исходных данных привело человечество к реализации новых графических возможностей. Благодаря таким возможностям человек может добиваться большей наглядности изображений, управляя их содержанием, формой, размерами, цветом, искажением пропорций. Такое моделирование предусматривает использование средств и методов компьютерной когнитивной графики [1].

Когнитивные методы автоматизируют часть функциональных познавательных процессов, что позволяет применять их во всех областях, в которых требуется постижение знаний.

Отдельное направление когнитивная графика образует в медицине. Индивидуальный подход и пристальное внимание требуют такие разделы здравоохранения, как реаниматология и медицина критических состояний (МКС) [2]. Врачам приходится в ограниченный интервал времени принимать решение для проведения терапевтических процедур по восстановлению жизнеспособности организма человека. Особенно методы когнитивной графики востребованы в отделениях реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) при постановке окончательного диагноза пациенту и прогнозировании исхода заболевания. Примером являются ОРИТ лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) Пензенской области, где можно увидеть, как врачи ведут непрерывное наблюдение за состоянием пациента, мониторинг.

Мониторинг (в медицине) – способ сбора информации о больном в процессе определения величины одних и тех же параметров организма, осуществляемый в фиксируемые промежутки времени. Отслеживание состояния пациента и проведение анализа об оказании терапии – это и есть основные задачи мониторинга. Особое место среди медицинского оборудования для мониторинга состояния пациентов занимают прикроватные мониторы. Большинство прикроватных мониторов, продаваемых сегодня, могут включать и данные клинических лабораторий. Но не всегда больше значит информативнее. Как показывает опыт, врачу МКС тяжелее принять тактическое решение, если информации о пациенте слишком много.

В отделениях анестезиологии и реанимации ЛПУ Пензенской области врачи ОРИТ для отслеживания динамики жизненно важных физиологических показателей используют унифицированные «протоколы», заполняемые вручную, хотя в настоящее время многие информационные процессы автоматизированы. Поэтому применение когнитивного подхода к графическому отображению информации о состоянии пациента, которая даст возможность быстро воспринимать и анализировать ситуацию, авторы статьи считают актуальным.

Цели исследования

Настоящая работа посвящена анализу возможности применения на практике графического способа отображения информации о состоянии пациента для повышения эффективности последующей интерпретации результатов. В статье исследуются основные параметры крови и анализируется их распределение в группы по функциональному назначению. Оценивается графическая информация, которая интуитивно понятно представляет изменения состояния пациента.

Материалы и методы исследования

Материалом для образного анализа медицинских многомерных данных служит комплексный анализ крови, который включает 35 показателей крови, имеющих разные размерности [3–6]. Методом объединения по функциональному значению показатели крови были сгруппированы на подгруппы (общий анализ крови, обмен веществ (диабет), концентрация электролитов и оценка функции почек, «костный профиль», сердечные маркеры, функциональные печеночные пробы, диагностика острой боли в животе, бактериальная инфекция и сепсис, свойства крови).

Материалом для когнитивного представления состояния пациента являются подгруппы параметров крови, которые сформированы на основе данных результатов открытых экспериментов, полученных из специализированных источников. В качестве примера когнитивной визуализации применены спарклайны, тепловая карта, диаграммы с областями и точечные графики. Диаграммы областей определяют границы «нормы» и «патологии» каждого показателя крови. Цветовая палитра позволяет оценить информативный диапазон значений. Точечные графики показывают динамику параметров крови относительно даты и времени его получения. Тепловая карта наглядно демонстрирует состояние пациента по всем параметрам крови [6–8].

На основании изученных материалов и проведенных исследований авторами статьи создана концептуальная модель системы управления медицинскими данными (СУМД) «MedData», состоящая из следующих элементов: входных параметров (например, показатели крови пациента), «черного ящика» (программной части системы, реализованной на базе алгоритма взаимосвязи и взаимодействия параметров, оценки их значений согласно стандартным шкалам, распределения значений в интервалы «норма» и «патология») и выходных параметров (цветовых градиентов с соответствующими значениями исследуемых параметров). В системе реализовано графическое отображение состояния пациента ОРИТ на основе методов когнитивной графики («тепловая карта» и «карта-радар»). Указанные методы когнитивной графики выбраны для наглядности представления данных о состоянии пациента. Графическое отображение информации визуально подскажет врачу степень отклонения рассматриваемых физиологических данных от нормы, а также ускорит процесс восприятия информации специалистом-медиком [9].

Результаты исследования и их обсуждение

В созданной системе примером когнитивной визуализации состояния пациента служит разработанная «Тепловая карта», которая цветовым градиентом отображает границы «нормы» и «патологии» показателей крови. Также система воспроизводит текущее значение показателя крови (рис. 1).

Наименование	Норма	01.07.23 00:00	07.07.23 00:00	09.07.23 00:00	22.07.23 00:00	Исследование	Патология	Норма	Патология
Гемоглобин	120 - 150	120	150	85	45	Гемоглобин	45		
Гематокрит	35 - 47	35	47	15	32	Гематокрит		32	
Эритроциты	3.8 - 5.3	3.8	5.3	1.6	3	Эритроциты	3		
Лейкоциты	3.9 - 10.4	3.9	10.4	1	3.1	Лейкоциты	3.2		
Тромбоциты	150 - 400	150	400	10	12	Тромбоциты		123	
Общий белок	64 - 85	64	85	29	42	Общий белок	42		
Альбумин	33 - 52	33	52	24	31	Альбумин		31	
α -амилаза крови	28 - 100	28	100	10	28	α -амилаза крови		28	
Глюкоза	3.3 - 5.5	3.3	5.5	0.5	3	Глюкоза		3.1	
Билирубин общий	0 - 21		21		14	Билирубин общий			14
Билирубин прямой	0 - 5		5		2	Билирубин прямой			2
Билирубин непрямой	6.6 - 20	6.6	20	0.5	4.3	Билирубин непрямой	4.3		
Мочевина	2.4 - 8.3	2.4	8.3	2	2	Мочевина		2.4	
Креатинин	53 - 97	53	97	30	50	Креатинин		50	

Рис. 1. Фрагмент рабочей области и «Тепловой карты» СУМД

На рис. 1 градиент зеленого цвета указывает на границы «нормы» каждого показателя крови. Градиент красно-желтого цвета указывает на нижнюю границу «патологии». Градиент желто-красного цвета указывает на верхнюю границу «патологии». Чем ближе значение параметра крови к красному цвету, тем опаснее состояние пациента.

В программную реализацию СУМД «MedData» включена специально подготовленная «Карта-радар» (рис. 2). Эта карта разрабатывалась авторами статьи для более полного и наглядного представления информации с целью последующей интерпретации специалистами. Например, по материалам рис. 2 видно, что в диапазон «патология» попадает значение параметра «тромбоциты».

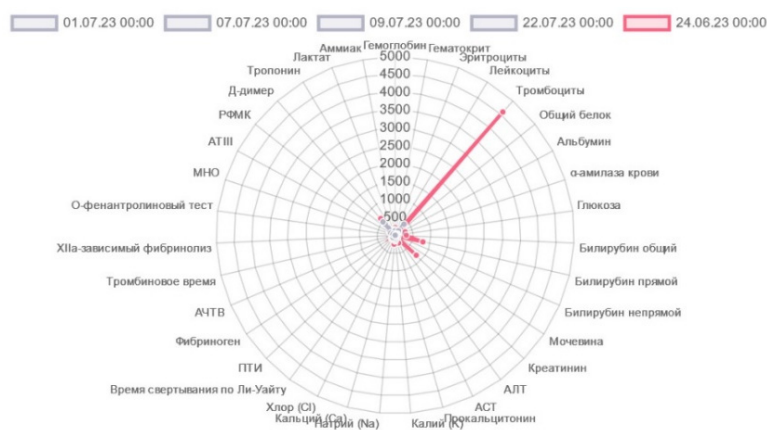


Рис. 2. Карта-радар в СУМД

В процессе анализа состояния пациента по «Карте-радар» стала понятна неинформативность представления данных таким способом, так как практически все значения показателей крови сливаются в одну точку. Подобный способ когнитивной графики удобен только для ограниченного (малого) числа анализируемых параметров. Однако достоинством «Карты-радар» в СУМД является то, что можно оценивать графическое представление результатов отдельно, по каждой конкретной дате и по времени, когда были получены результаты анализа крови (рис. 3).

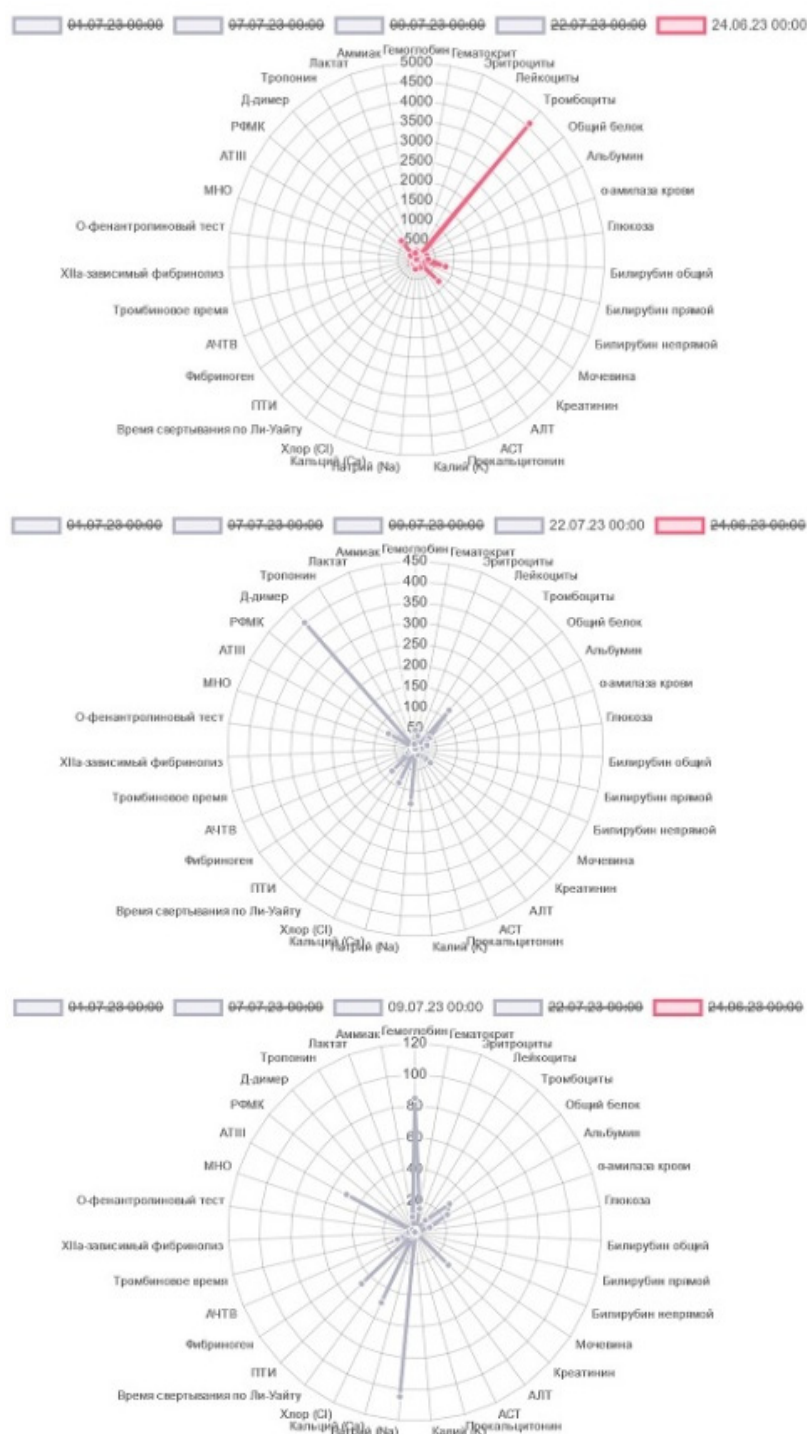


Рис. 3. Представление данных Карты-радар по датам/времени

Авторы статьи, создатели СУМД, для «чистоты» эксперимента попробовали реализовать «Карту-радар» в другом программном приложении (рис. 4).

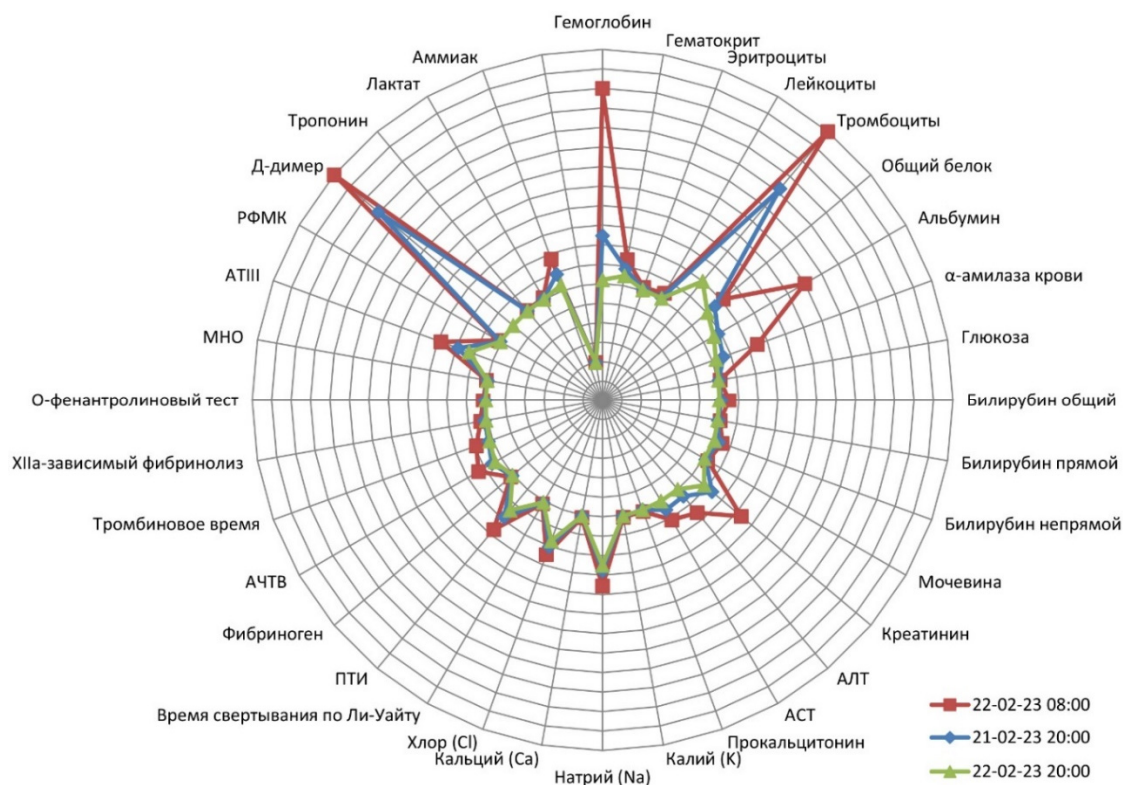


Рис. 4. Карта-радар динамики исследования крови

На «Карте-радар» динамики исследования крови стало лучше видно графики изменяющихся параметров, но наглядности представления информации о состоянии пациента, как видно по рисунку, опять нет.

Во время экспериментальной работы в СУМД «MedData» врачи-реаниматологи одного из Пензенских ЛПУ пришли к выводу, что графическое отображение тепловой карты с учетом всех параметров крови и карты-радар также с полным набором значений показателей крови одного пациента, не дают наглядной картины о его состоянии. Они обратили внимание на скученность графиков на карте-радар, отсутствие интервалов «нормы» и «патологий».

В процессе поиска наиболее информативного графического представления состояния пациентов была проанализирована работа студентов-медиков Норвежского исследовательского центра. Они рассматривали четыре варианта графической визуализации состояния пациента в виде: таблицы со значениями показателей крови; абсолютного мультиграфа; спарклайнов и относительного мультиграфа. Подобные графические представления наиболее наглядны и просты для изучения [10]. По результатам изучения работы медиков авторы статьи приняли решение о построении графиков динамики каждого показателя в виде спарклайнов (рис. 5).

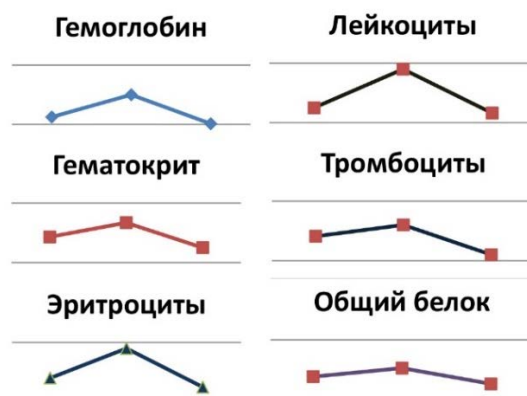
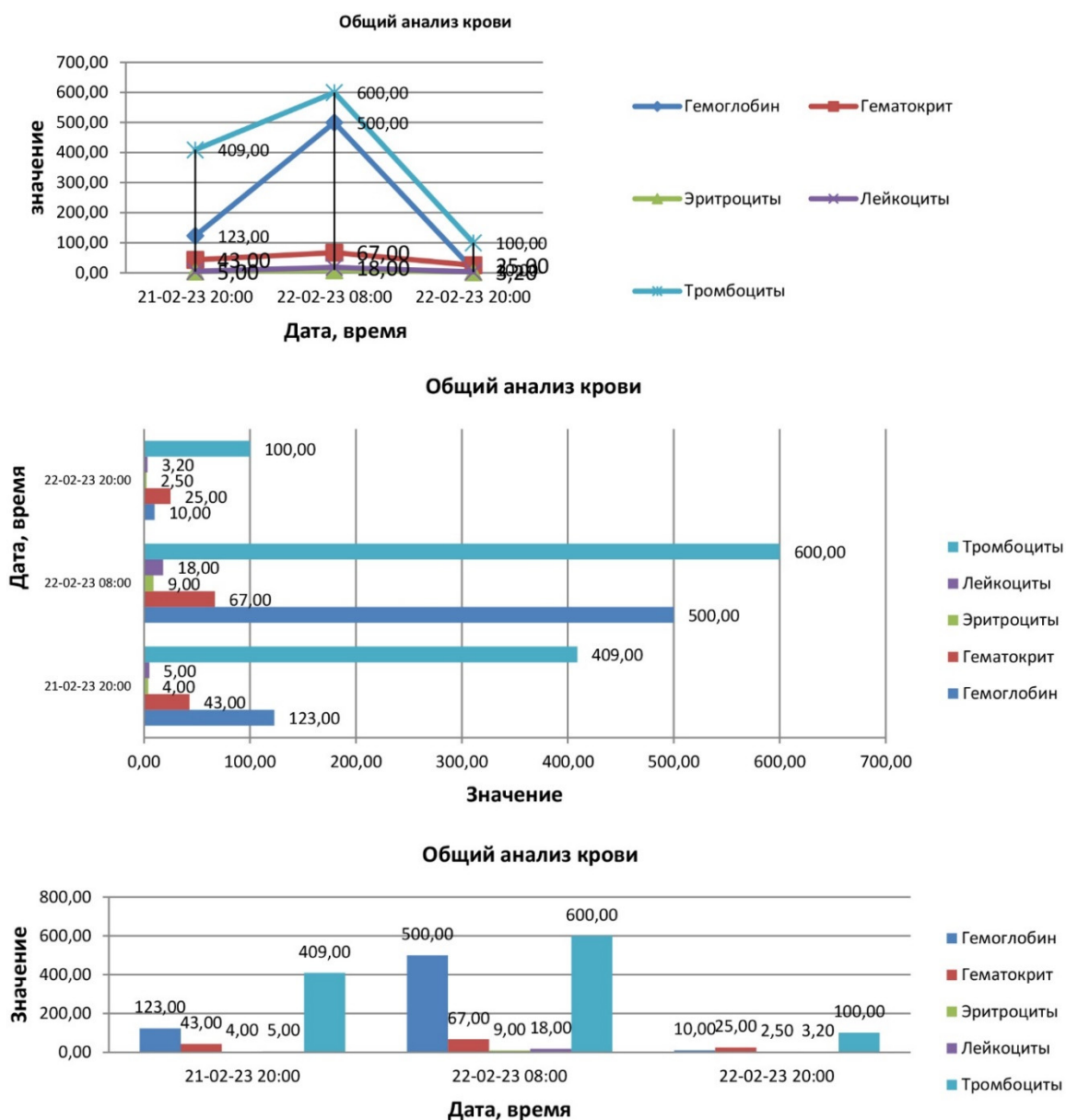


Рис. 5. Пример отображения показателей крови в динамике в виде спарклайнов

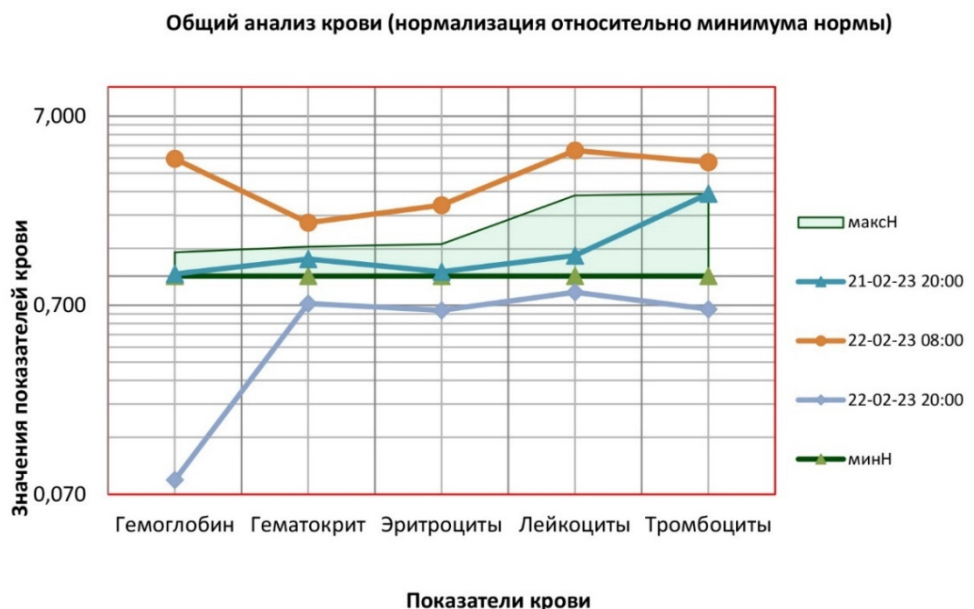
При оценивании полученных результатов сделан вывод о том, что приведенные варианты графической визуализации информации не дают полной картины сведений о состоянии пациента на время его нахождения в ОРИТ. Поэтому, по мнению авторов статьи, необходимо подготовить план эксперимента, для этого провести исследования по группировке показателей крови по признаку их функционального значения (например, с учетом выполняемых органами функций). Таким образом сформировано несколько подгрупп показателей крови. Для каждой подгруппы с целью оценки адекватности исследований норвежских медиков по значениям соответствующих параметров крови построены несколько типов диаграмм и таблица, отражающая их числовые значения (рис. 6).



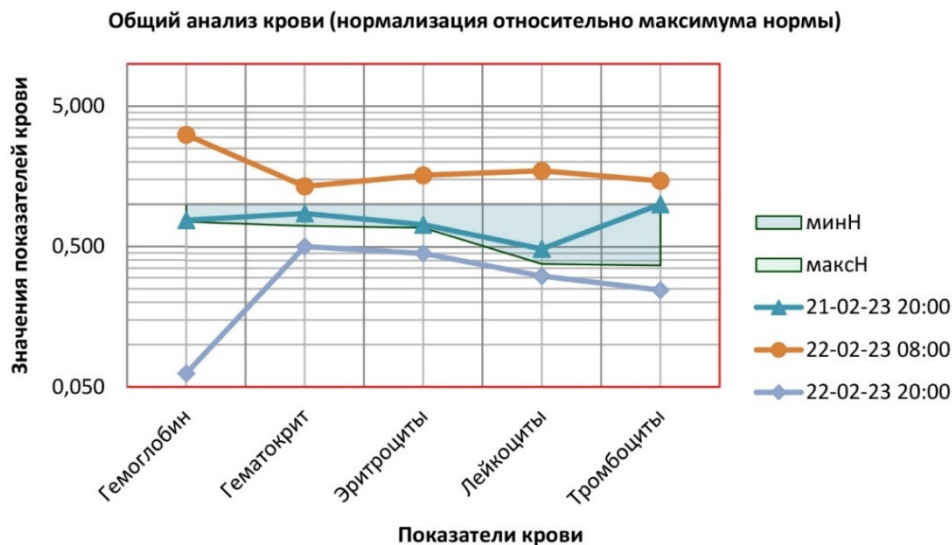
Общий анализ крови	Дата, время			Единицы измерения
	21-02-23 20:00	22-02-23 08:00	22-02-23 20:00	
Гемоглобин	123,00	500,00	10,00	г/л
Гематокрит	43,00	67,00	25,00	%
Эритроциты	4,00	9,00	2,50	*10 ¹² /л
Лейкоциты	5,00	18,00	3,20	*10 ⁹ /л
Тромбоциты	409,00	600,00	100,00	*10 ⁹ /л

Рис. 6. Пример типов диаграмм и таблица со значениями показателей крови подгруппы «Общий анализ крови»

Проведенный авторами статьи анализ представленных графиков показывает низкую информационную составляющую подобных результатов. Неинформативными и ненаглядными являются графические сведения о состоянии пациента, отсутствуют данные о попадании показателей крови в интервалы «норма» и «патология». Поэтому было принято решение сменить тип диаграммы, указать интервал «нормы» и провести нормировку шкалы, так как все показатели крови имеют разную размерность (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7. Диаграмма отображения показателей крови подгруппы «Общий анализ крови» с учетом нормировки

Диаграммы на рис. 7 нормированы по показателям «минимум нормы» (а) и «максимум нормы» (б). По мнению авторов статьи, представленные диаграммы являются наиболее информативными по сравнению с гистограммами и спарклайнами. Но для их анализа по-прежнему приходится концентрировать внимание. Учитывая данное обстоятельство, авторы предлагают подобрать такой тип диаграмм, при котором четко визуализировался бы интервал «нормы». Подобный подход реализован в разработанной СУМД с помощью программного модуля С#. Пример практической визуализации графической информации представлен на рис. 8.

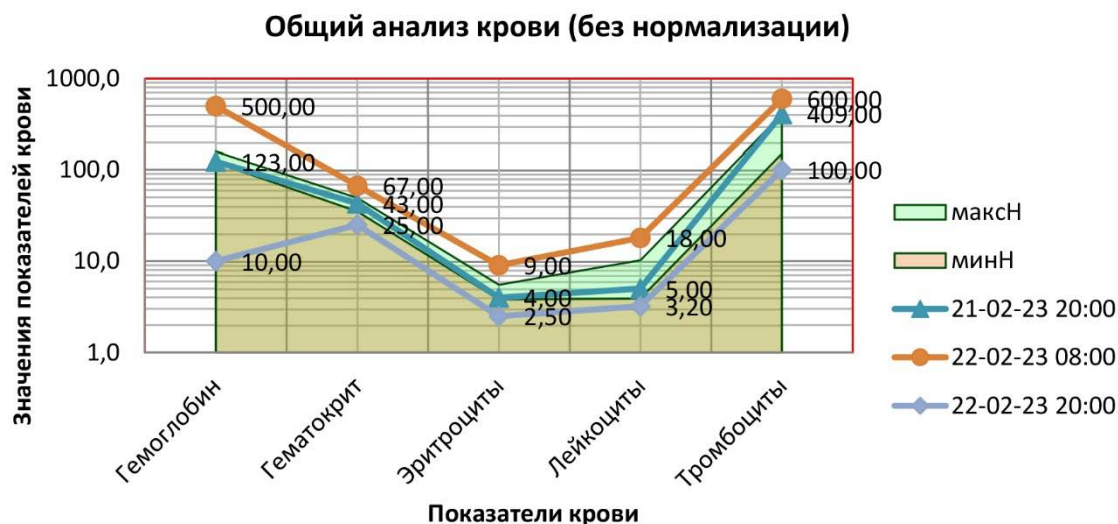


Рис. 8. Диаграмма подгруппы «Общий анализ крови»

Таким образом, по мнению авторов, информация на диаграмме подгруппы «Общий анализ крови» представлена наиболее наглядно. Виден интервал «нормы», а также просматриваются значения показателей крови на день и время их анализа, что облегчает интерпретацию полученных результатов.

Заключение

Проанализировав способы визуализации динамических данных, можно сделать вывод о том, что наглядное представление нормального/критического состояния пациента отображают «Тепловая карта» и диаграмма с областями с учетом распределения показателей крови по функциональному значению. Визуальная информация о состоянии пациента в форме когнитивного графа не только показывает его реальное состояние, но и представляется в удобном виде врачу ОРИТ [3–5, 11], что снижает временные затраты на принятие решения для восстановления нормального состояния пациента.

Список литературы

1. Соловов А. В. Проектирование компьютерных систем учебного назначения : учеб. пособие. Самара : СГАУ, 1995. 138 с.
2. Zenkin A. A. Когнитивная компьютерная графика : учеб. пособие. М. : Наука, 1991. 192 с.
3. Объективная оценка тяжести состояния и прогноза у больных в критических состояниях. URL: <https://www.rosmedlib.ru/doc/ISBN9785970417850-KLINREK1546069392/-esf2k2z11-tabrel-mode-pgs.html>
4. Jevon P., Ewens B., Pooni J. S. Monitoring the Critically Ill Patient. 3rd ed. by. Wiley-Blackwell, 2012.
5. Реаниматология – это всегда коллективный труд. URL: <https://www.vishnevskogo.ru/news/doktor-kleuzovich-reanimatologiya-eto-vsegda-kollektivnyj-trud.html>
6. Тозик В. Т., Корпан Л. М. Компьютерная графика и дизайн. М. : Академия, 2013. 200 с.
7. Емельянова Ю. Г., Хачумов В. М. Когнитивная визуализация устойчивых физиологических и личностных факторов // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 1. С. 25–30.
8. Хиггинс К. Расшифровка клинических лабораторных анализов : пер. с англ. / под ред. проф. В. Л. Эмануэля. 7-е изд. М. : Лаборатория знаний, 2016. 592 с.
9. Костенкова М. Ю., Сидорова М. А. Разработка программного модуля отображения текущего состояния пациента на основе методов когнитивной графики // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2022 : сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов (г. Рязань, 7–9 декабря 2022 г.) / под общ. ред. В. И. Жулева. Рязань : Индивидуальный предприниматель Коныхин Александр Викторович, 2022. С. 317–319.
10. Torsvik T., Lillebo B., Mikkelsen G. Presentation of clinical laboratory results: an experimental comparison of four visualization techniques // Journal of the American Medical Informatics Association. 2013. Vol. 20. P. 325–331. doi: 10.1136/amiajnl-2012-001147
11. Марухина О. В., Берестнева О. Г., Мокина Е. Е. Визуализация и анализ многомерных экспериментальных данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 90–95.

References

1. Solovov A.V. *Proektirovanie komp'yuternykh sistem uchebnogo naznacheniya: ucheb. posobie = Designing computer systems for educational purposes : textbook*. Samara: SGAU, 1995:138. (In Russ.)
2. Zenkin A.A. *Kognitivnaya komp'yuternaya grafika: ucheb. posobie = Cognitive computer graphics : textbook*. Moscow: Nauka, 1991:192. (In Russ.)
3. *Ob"ektivnaya otsenka tyazhesti sostoyaniya i prognoza u bol'nykh v kriticheskikh sostoyaniyakh = Objective assessment of the severity of the condition and prognosis in patients in critical conditions*. (In Russ.). Available at: <https://www.rosmedlib.ru/doc/ISBN9785970417850-KLINREK1546069392/-esf2k2z11-tabrel-mode-pgs.html>
4. Jevon P., Ewens B., Pooni J.S. *Monitoring the Critically Ill Patient*. 3rd ed. Wiley-Blackwell, 2012.
5. *Reanimatologiya – eto vsegda kollektivnyy trud = Intensive care is always a team effort*. (In Russ.). Available at: <https://www.vishnevskogo.ru/news/doktor-kleuzovich-reanimatologiya-eto-vsegda-kollektivnyj-trud.html>
6. Tozik V.T., Korpan L.M. *Komp'yuternaya grafika i dizayn = Computer graphics and design*. Moscow: Akademiya, 2013:200. (In Russ.)
7. Emel'yanova Yu.G., Khachumov V.M. Cognitive visualization of stable physiological and personal factors. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high-tech technologies*. 2021;(1):25–30. (In Russ.)
8. Khiggins K. *Rasshifrovka klinicheskikh laboratornykh analizov: per. s angl. 7-e izd. = Decoding of clinical laboratory analyses: translated from English. 7th ed*. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2016:592. (In Russ.)
9. Kostenkova M.Yu., Sidorova M.A. Development of a software module for displaying the current state of the patient based on cognitive graphics methods. *Biotehnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy, izmeritel'nye ustroystva i robototekhnicheskie komplekсы – Biomedсистемы-2022: sb. tr. XXXV Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov (g. Ryazan', 7–9 dekabrya 2022 g.) = Biotechnical, medical and environmental systems, measuring devices and robotic complexes – Biomedsystems-2022 : sb. tr. XXXV All-Russian Scientific and Technical. conf. of students, young scientists and specialists (Ryazan, December 7-9, 2022)*. Ryazan': Individual'nyy predprinimatel' Konyakhin Aleksandr Viktorovich, 2022:317–319. (In Russ.)
10. Torsvik T., Lillebo B., Mikkelsen G. Presentation of clinical laboratory results: an experimental comparison of four visualization techniques. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2013;20: 325–331. doi: 10.1136/amiajnl-2012-001147
11. Marukhina O.V., Berestneva O.G., Mokina E.E. Visualization and analysis of multidimensional experimental data. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2016;(4-2):90–95. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Юрьевна Костенкова

соискатель,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: marikost83@mail.ru

Maria Yu. Kostenkova

Applicant,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Маргарита Александровна Сидорова

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

Margarita A. Sidorova

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.10.2023

Принята к публикации / Accepted 27.11.2023

УДК 004.93'1:159.942.33
doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-10

АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО МЕДИАКОНТЕНТА

О. Н. Бодин¹, В. М. Жигачев²

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

¹bodin_o@inbox.ru, ²mkk7619@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Бурное развитие компьютерных коммуникаций за последние 15 лет привело к появлению фактически новых форм межличностного и общественного общения, зачастую замещающего реальное общение – социальные сети и мессенджеры. Такие средства коммуникации в отличие от традиционных форм общения основаны на передаче медиаконтента и, с одной стороны, имеют эффект, располагающий к общению и исключающий барьеры, вызванные психоэмоциональными паттернами, а с другой – являются активной средой появления новой формы правонарушений – кибермошенничества и киберпреступности, ежегодный ущерб от которых в России исчисляется десятками миллиардов рублей. По мнению авторов, определение психоэмоциональных паттернов для выявления подобных правонарушений является актуальной проблемой. Целью данного исследования является создание алгоритма комплексной оценки психоэмоциональных состояний и выявления пороговых значений этих состояний у пользователей социальных сетей на основе анализа медиаконтента. *Материалы и методы.* Рассмотрены библиотеки FER 2013 и text2emotion, которые применяются в составе систем распознавания для анализа медиаконтента. *Результаты и выводы.* Разработан алгоритм комплексной оценки психоэмоционального состояния пользователя социальных сетей на основе анализа его страницы социальной сети. При этом осуществляется построение психоэмоциональной диаграммы с указанием проявлений экстремальных психологических состояний пользователя. Наличие алгоритма комплексной оценки психоэмоционального состояния пользователя социальных сетей позволит повысить достоверность определения психоэмоциональных паттернов для выявления кибермошенничества и киберпреступности.

Ключевые слова: медиаконтент, эмоции, сегментация эмоций, алгоритм оценки психоэмоционального состояния, нейронные сети

Для цитирования: Бодин О. Н., Жигачев В. М. Алгоритм комплексной оценки психоэмоционального состояния пользователя социальных сетей на основе анализа его медиаконтента // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 81–92. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-10

ALGORITHM FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE PSYCHOEMOTIONAL STATE OF A SOCIAL NETWORK USER BASED ON ANALYSIS OF ITS MEDIA CONTENT

O.N. Bodin¹, V.M. Zhigachev²

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

¹bodin_o@inbox.ru, ²mkk7619@mail.ru

Abstract. *Background.* The rapid development of computer communications over the past 15 years has led to the emergence of virtually new forms of interpersonal and public communication, often replacing real communication – social networks and instant messengers. Such means of communication, unlike traditional forms of communication, based on the transmission of media content and, on the one hand, have an effect that encourages communication and eliminates barriers caused by psycho-emotional patterns. And on the other hand, they are an active environment for the emergence of a new form of crime – cyber fraud and cybercrime, the annual damage from which in Russia amounts to tens of billions of rubles. According to the authors, definition psycho-emotional patterns to identify such offenses is an urgent problem. The purpose of this study is to create an algorithm for a comprehensive assessment of psycho-emotional states and identify the threshold values of these states in social network users based on analysis of media content. *Materials and methods.* The article discusses the FER 2013 and text2emotion libraries, which used as part of recognition systems for analyzing media content. *Results and conclusions.* An algorithm developed for a comprehensive assessment of the psycho-emotional

state of a social network user based on an analysis of his social network page. In this case, a psycho-emotional diagram constructed indicating the manifestations of extreme psychological states of the user. The presence of an algorithm for a comprehensive assessment of the psycho-emotional state of a social network user will increase the reliability of determining psycho-emotional patterns for identifying cyber fraud and cybercrime.

Keywords: media content, emotions, segmentation of emotions, algorithm for assessing psycho-emotional state, neural networks

For citation: Bodin O.N., Zhigachev V.M. Algorithm for comprehensive assessment of the psychoemotional state of a social network user based on analysis of its media content. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):81–92. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-10

Введение

Информатизация общества и бум социальных сетей оказали огромное значение на все стороны жизни общества: промышленное производство, образование, медицину, культуру и позволили удовлетворить и материальные, и духовные потребности человека, связанные с развитием и самоактуализацией. Социальные сети в современном обществе являются наиболее значимыми и востребованными средствами коммуникации. 68 % населения Земли пользуется Интернетом [1].

Социальная сеть (сокр. соцсеть, SNS от *social networking service*) – онлайн-платформа, которая используется для общения, знакомств, создания социальных отношений между людьми, которые имеют схожие интересы или офлайн-связи, а также для развлечения (музыка, фильмы) и работы. Социальные сети играют большую роль в социальной и духовной сфере общественной жизни, формируют новые структуры взаимодействий, образуют новый особый социальный институт [2].

Задуманные изначально больше как электронные записные книжки социальные сети быстро освоили сегмент развлекательных услуг и сравнительно недавно начали экспансию из мира виртуального в мир реальный, которая с каждым годом только усиливается. Сегодня без преувеличения можно сказать, что для миллионов пользователей соцсеть уже настолько сильно проникла в их жизнь, что стала ее неотъемлемой частью, поэтому изучение виртуальных социальных сетей является актуальной темой [3].

Мониторинг социальной активности и анализ психоэмоционального состояния пользователей позволит осуществлять более эффективное целенаправленное воздействие на развитие нежелательных ситуаций, возникающих в обществе.

Постановка проблемы

Понятие медиа существенно изменилось за последние десятилетия и в настоящий момент включает в себя средства коммуникации, способы передачи информации, а также образываемую ими среду.

Формирующим элементом выступает контент – текстовый, графический и визуальный (видео). Очевидно, что мониторинг и анализ медиаконтента позволит выявить и предотвратить социально опасные тенденции – кибермошенничество и киберпреступления [4].

В отличие от классической модели преступлений кибермошенничество и киберпреступники имеют ряд существенных отличий – редкое самостоятельное объединение в группы, а в силу кажущегося эффекта анонимности в сети более частое проявление отклонений поведения и психологических расстройств, неконтролируемого поведения.

В 2021 г. зарегистрировано 517 722 преступлений, связанных с хищениями с использованием информационных технологий (ИТ), при этом хищения в сети Интернет характеризуются высокой латентностью и низкой раскрываемостью, в том числе из-за возможности дистанционного совершения данных преступлений. Общая раскрываемость категории данных дел составляет в среднем 20 % ежегодно, а сумма ущерба от действий интернет-мошенников ежегодно превышает 150 миллиардов рублей.

Особенностью киберпреступлений является эффект анонимности, снижающий пороговые значения самоконтроля и позволяющий размещать такой медиаконтент, который личность в реальной жизни считает скрытым или личным. В соцсетях личность часто выглядит не тем, кем является на самом деле.

Проблема киберпреступности – сложная социальная проблема, которая требует комплексного решения с активным участием различных заинтересованных сторон: государственных органов, коммерческих и некоммерческих организаций, научного сообщества, международных партнеров.

Одним из решений проблемы киберпреступности является мониторинг социальной активности и анализ психоэмоционального состояния пользователей социальных сетей с последующим выявлением социально опасных пользователей.

К настоящему времени в науке усилиями зарубежных (5 – Дж. Тернер (Turner), 1999, 6 – Дж. Джаспер (Jasper), 2011, 7 – И. Берикат (Bericat), 2016) и отечественных (8 – О. А. Симонина, 2016, 9 – Е. Г. Ефимов, 2015, 10 – А. В. Коновалова, 2020) ученых сформировались теоретические основы и методические предпосылки для проведения подобных исследований.

Например, эмоциональные переживания российских пользователей социальных сетей подробно исследованы в работе [11]. В основу исследования положены методика «Колесо эмоций» Р. Плутчика [12] и полуструктурированное интервью, что позволило авторам исследования [11] углубленно оценить причины и следствия влияния социальных сетей на эмоциональные переживания пользователей, создало условия для работы в контексте использования дополнительных вопросов для уточнения позиции информанта.

Однако следует отметить, что к настоящему времени в науке отсутствует единое мнение об определении понятия «психоэмоциональное состояние» из-за его особенностей: сложности, фоновом характере (слабой интенсивности), значительной длительности (продолжительностью во времени), беспредметности (скрытом характере возникновения), оценочном характере самого субъекта и специфичностью динамики протекания [13]. В работе [14] рассматривается формирование описания информационного образа пользователя социальной сети «ВКонтакте» с учетом определения его психологической характеристики.

Целью данной работы является создание алгоритма оценки психоэмоционального состояния пользователей социальной сети на основе анализа их графических и текстовых сообщений.

Понятие «психоэмоциональное состояние» рассматривается как относительно устойчивое переживание человека по отношению к самому себе, к другим людям, к окружающему миру, влияющее на его деятельность, поведение, поступки. Психоэмоциональное состояние определяется активностью, самочувствием и настроением человека, может проявляться в течение длительного времени, влиять на развитие его личностных качеств, на физическое и психическое здоровье человека.

Построение алгоритмов автоматизированного анализа открытых данных участников медиаобобщения открывает новые возможности в выявлении и ранней диагностике критических проявлений медиаконтента, ранней диагностики пороговых психосоматических состояний.

Материалы и методы

В модели взаимодействия человек – интерфейс при размещении контента происходит формирование медиа. Покажем это. Так, VK.com API является API социальной сети «ВКонтакте» и представляет собой интерфейс, который позволяет получать информацию из базы данных vk.com с помощью запросов к специальному серверу. Синтаксис запросов и тип возвращаемых ими данных строго определены на стороне самого сервиса. Методы представляют собой условные команды, которые соответствуют той или иной операции с базой данных – получению информации, записи или удалению. Например, для работы с сообществами нужны методы `groups`, для работы с фотографиями – `photos`. Запрос осуществляется по ID пользователя.

После названия метода передаются его входные данные (если они есть) как обычные query-параметры. Входные параметры всегда перечислены на странице с описанием метода.

В ответ сервер вернет JSON-объект (JavaScript Object Notation) с запрошенными данными или сообщение об ошибке.

JSON-объект представляет собой текстовый формат обмена данными, основанный на JavaScript (JS). Но при этом формат независим от JS и может использоваться в любом языке программирования.

Результатом запроса является графический и текстовый контент.

Характеристики современных средств, анализирующих профили пользователей социальных сетей с помощью технологий big data [15–26] и опубликованные в открытом доступе, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики современных средств,
анализирующих профили пользователей социальных сетей

Особенности / Наименование	Функциональные возможности	Психометрика	Анализ медиа контента	
			Изображение	Текст
AIData [15]	Сегментация аудитории на основе «умных данных», таргетированная реклама	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Amber data [16]	Сегментация аудитории, таргетированная реклама	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Double data [17]	Определение надежности заемщиков; выявление мошенников; анализ социальных связей; выявление ботов. 99,8 % – точность идентификации	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Relation hint [18]	Анализ профиля человека в социальной сети «ВКонтакте» и выдача рекомендации, как с ним правильно общаться. Анализ включает в себя два пункта – демографическую и психологическую совместимость	Составление психологического портрета человека в социальной сети	Нет данных	Нет данных
ФОРС [19]	Автоматический поиск и идентификация клиентов в социальных медиа; сбор и мониторинг информации о пользователях; обогащение данных о пользователях сетей; формирование общего профиля клиента; анализ и исследование клиентских данных; мониторинг данных, своевременное обновление информации	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Skillaz [20]	Таргетированный поиск и подбор персонала на основе инф. следа пользователей, автоматическая оценка кандидата	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Dataset fer2013 [21, 22]	Оценка входного медиа контента по критериям angry: злость; disgust: отвращение; fear: страх; sad: досада; happy: счастье; neutral: нейтральные; surprise: сюрприз; каждый критерий в оценочном диапазоне [0 – 100] с шагом 0,01	Составление эмоционального портрета человека в социальной сети	Да	Нет
text2emotion [23]	Обнаруживает эмоции в тексте. Обрабатывает любое текстовое сообщение и распознает заложенные в нем эмоции. Совместим с 5 различными категориями эмоций: счастье, злость, грусть, удивление и страх	Составление эмоционального портрета человека в социальной сети	Нет	Да
Microsoft Cognitive Services [24]	Реализует оценку входных медиа по критериям angry: злость; disgust: отвращение; fear: страх; sad: досада; happy: счастье; neutral: нейтральные; surprise: сюрприз; и далее в расширенном диапазоне (всего 8 критериев) каждый критерий в оценочном диапазоне [0 – 100] с шагом 0,01	Составление эмоционального портрета человека в социальной сети	Да	Нет
Cloud Vision API [25, 26]	Реализует комплекс оценки и распознавания объектов окружающего мира и оптическое распознавание символов – Optical Carecter Recognition (OCR)	Нет	Да	Да

Анализ табл. 1 показывает, что современным средствам, анализирующим профили пользователей социальных сетей, присущи следующие недостатки:

- 1) наличие отклонений в оценке из-за отклонения значений оценки в сторону одного весового коэффициента (например, surprise);
- 2) зависимость от весовых значений, корректируемых онлайн;
- 3) отсутствие оценок психических состояний (агрессивность, депрессия, истеричность, паранойя).

Кроме того, особенностями современных средств, анализирующих профили пользователей социальных сетей, являются высокие требования к производительности, закрытый код и платный сервис.

Самыми распространенными из современных средств, анализирующих профили пользователей социальных сетей, являются нейронные сети (НС). Известно, что НС может выполнить сколь угодно сложное преобразование «вход–выход» [27]. Нейросетевая парадигма анализа поведенческого паттерна пользователей социальных сетей (ПППСС) приведена на рис. 1.

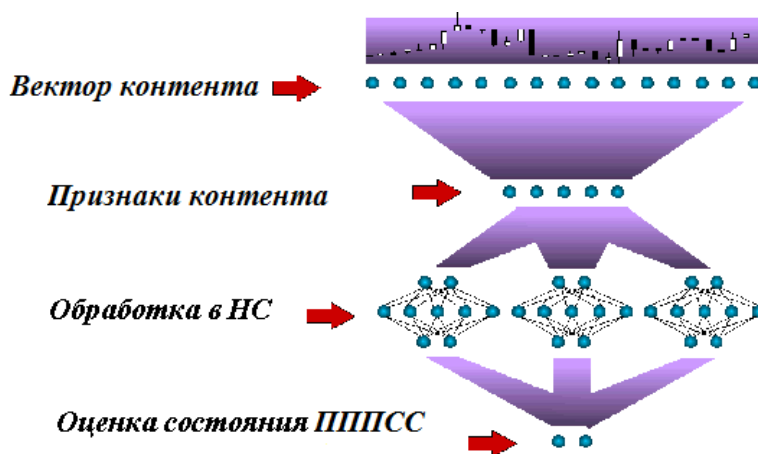


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса анализа профилей пользователей социальных сетей

В отличие от простой шкалы оценки эмоций (например, система лайков и эмодзи), применение нейронных сетей позволяет быстро получить независимую и точную оценку эмоционального состояния в широком диапазоне.

Результаты и обсуждение

По мнению авторов, для повышения качества современных средств, анализирующих профили пользователей социальных сетей с помощью технологий big data, необходимо расширить спектр психоэмоциональных состояний человека. Авторами для описания процесса оценки психоэмоционального состояния пользователя социальных сетей предлагается использовать технологию диаграмм потоков данных, Data flow diagram (DFD) [28]. DFD представляет собой графическое изображение совокупности взаимосвязанных ресурсов и взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы. Контекстная диаграмма процесса анализа профилей пользователей социальных сетей приведена на рис. 2.



Рис. 2. Контекстная диаграмма процесса анализа профилей пользователей социальных сетей

Следующим этапом построения модели процесса анализа профилей пользователей социальных сетей является построение диаграммы декомпозиции, в результате которой выделяются составные части, совокупность которых образует единое целое процесса. После построения законченной модели системы выявления и прогнозирования личностных поведенческих паттернов в динамическом медиаконтенте социальных сетей ее необходимо верифицировать (проверить на полноту и согласованность). В полной модели все ее объекты (подсистемы, процессы, потоки данных) должны быть подробно описаны и детализированы. Выявленные недетализированные объекты следует детализировать, вернувшись на предыдущие шаги разработки. В согласованной модели для всех потоков данных и накопителей данных должно выполняться правило сохранения информации: все поступающие куда-либо данные должны быть считаны, а все считываемые данные должны быть записаны.

Авторами на основе модели процесса анализа профилей пользователей социальных сетей разработан алгоритм выявления поведенческого паттерна пользователя социальной сети (ПППСС), схема которого приведена на рис. 3.

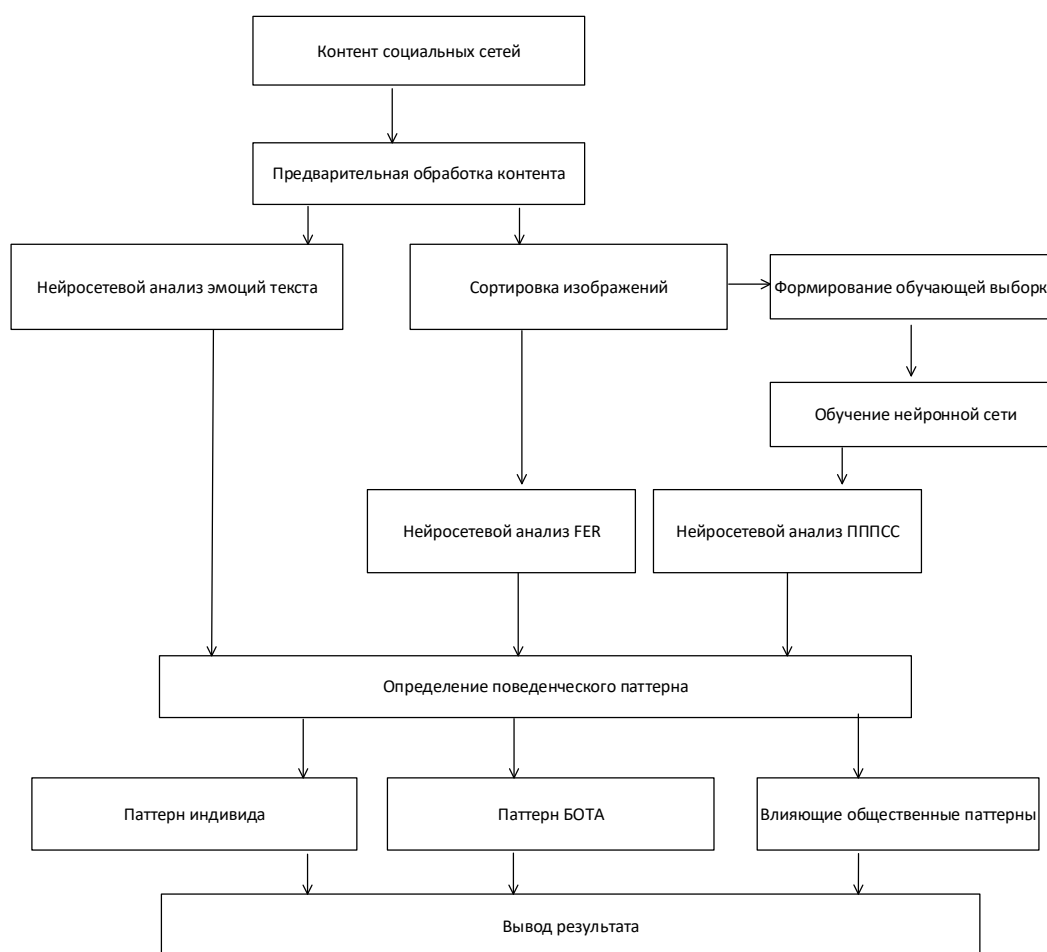


Рис. 3. Алгоритм выявления поведенческого паттерна пользователей социальных сетей

Как следует из анализа рис. 3, предлагаемый алгоритм содержит два этапа обработки контента: этап предварительной обработки и этап определения поведенческого паттерна. При этом отличительными особенностями этапа предварительной обработки предлагаемого алгоритма являются нейросетевой анализ эмоций текста и сортировка изображений по критерию наличия в контенте признаков принадлежности к поисковому запросу. Из отсортированных изображений формируется обучающая выборка, по которой осуществляется обучение нейронных сетей.

Кратко опишем работу используемых в предлагаемом алгоритме библиотек.

Библиотека FER 2013 [21, 22] предназначена для оценки входных медиа по критериям angry: злость; disgust: отвращение; fear: страх; sad: досада; happy: счастье; neutral: нейтральные; surprise: сюрприз; каждый критерий в оценочном диапазоне [0 – 100] с шагом 0,01.

Источником разнородного в эмоциональном составе контента выбраны посты пользователей в социальной сети VK.com в связи с наличием удобного и производительного API получения информации.

Контент формируется по древовидному принципу – входной точкой является произвольный ID в социальной сети. После обработки этого ID осуществляется проход по ID в ID групп и ID друзей.

Такой подход позволяет сформировать достаточный по объему контент из 1000+ текстов в разном эмоциональном фоне и дополнительно фотографии графического контента (загрузка фото профиля или фото из постов).

Контент проходит оценку в библиотеке FER, который состоит из изображений лиц в градациях серого размера 48x48 пикселей. Лица находятся более или менее по центру и занимают примерно одинаковое количество места на каждом изображении. Каждое лицо на основе отображаемых эмоций может быть классифицировано в одну из семи категорий (0 – злость, 1 – отвращение, 2 – страх, 3 – радость, 4 – грусть, 5 – удивление, 6 – нейтрально). Обучающий набор состоит из более 28 500 примеров, а тестовый набор состоит из более 3500 примеров. Примеры фото, проходящих оценку в библиотеке FER, приведены на рис. 4.

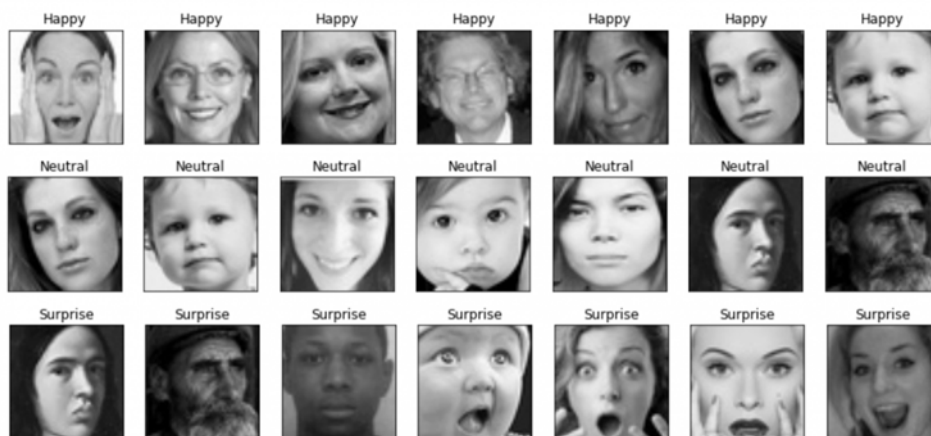


Рис. 4. Примеры фотоизображений пользователей социальных сетей

По умолчанию лица обнаруживаются с помощью классификатора OpenCV Haar Cascade (каскады Хаара). Когда установлено значение "True", используется модель MTCNN (Multi-task Cascaded Neural Network) для более точного обнаружения лица, а когда установлено значение "Ложь", функция использует классификатор OpenCV Haar Cascade. Например, эмоции мальчика на рис. 5 характеризуются следующими показателями:

'emotions': {'angry': 0.04, 'disgust': 0.0, 'fear': 0.09, 'happy': 0.02, 'sad': 0.64, 'surprise': 0.1, 'neutral': 0.09} (рис. 5).



Рис. 5. Оценка эмоционального состояния библиотекой FER 2013 [21, 22]

Библиотека text2emotion [23] позволяет оценивать текст по таким же критериям и в диапазоне, как и FER. Библиотека text2emotion с применением библиотеки google translate (перевод иностранных слов в тексте).

Этапы обработки текста [29]:

- 1) препроцессинг текста – удаление ненужных элементов из текста; реализация лингвистических процедур; извлечение обработанных элементов текста;
- 2) изучение эмоций – распознавание и подсчет эмоций из каждого слова, полученного из обработанного текста; нахождение слов, которые описывают эмоции; сопоставление категорий эмоций каждого слова; создание структуры эмоций, соответствующих найденным словам;
- 3) анализ эмоций – полученная структура формируется в виде словаря, состоящего из ключевых категорий эмоций и значений оценки. Чем выше оценка определенной категории эмоций, тем больше мы можем заключить, что сообщение относится к этой категории.

Важным показателем объективности полученных оценок является релевантность оценки эмоционального содержания медиаматериала – фотографии и текста. Например, если фотография передает схожий набор эмоций так же, как и текст, описывающий фото, – можно утверждать о точной оценке состояния пользователя социальной сети в момент публикации.

Набор оценок формирует изменяемый профиль пользователя и позволяет выявить периоды (диапазоны) состояний.

С междисциплинарной точки зрения агрессия рассматривается как совокупность механизмов, сформированных в ходе эволюции с целью самоутверждения себя, родственников или друзей против других, получения или защиты ресурсов (конечных причин) вредными средствами, наносящими ущерб. Эти механизмы часто мотивируются такими эмоциями, как страх, разочарование, гнев, чувство стресса, доминирования или удовольствия (непосредственные причины). [30]

Набор параметров позволяет выявить динамику агрессии – динамику роста показателей злости, отвращения и страха.

Агрессивный контекст может использоваться для продвижения призывов в большой аудитории:

```
text = 'Голосуй за Ивана Петрова. Новые рабочие места, гарантия успешной жизни и достатка.'
{'Happy': 0.0, 'Angry': 0.0, 'Surprise': 0.0, 'Sad': 0.0, 'Fear': 1.0}
text = 'Все на протест. Митинг сегодня в 10 утра.'
{'Happy': 0.0, 'Angry': 0.0, 'Surprise': 0.0, 'Sad': 0.0, 'Fear': 1.0}
```

Пользователь социальной сети подсознательно выделяет контент по индивидуальным установкам. Агрессивность усиливает эффект узнавания и восприятия.

Для расширения восприятия контент может содержать элементы: логотипы, фотографии, символика. Чем выше узнаваемость таких элементов для группы, тем выше внимание группы к этому контенту и ответная реакция.

Сортировка таких изображений по заданным параметрам и диапазона возможного отклонения на этапе предварительной обработки существенно снижает временные затраты на анализ, повышает точность оценки.

Для проверки предложенного алгоритма был проведен эксперимент по анализу фотографии (при наличии) участника дискуссии при наличии отклоняющихся (экстремальных) значений в комментариях.

Анализируемая фотография приведена на рис. 6 [31].

Анализируемый текст:

«Грустный день рождения.»

Результаты эксперимента:

Оценка стандартными средствами эмоционального состояния на основе анализа фотографии библиотекой FER 2013 [21, 22] и на основе анализа текста библиотекой text2emotion [23] показала следующие результаты:

```
{'Happy': 0.0, 'Angry': 0.0, 'Surprise': 0.0, 'Sad': 1.0, 'Fear': 0.0}
```

Приведенный в примере явно не связанный текст в оценке стандартными средствами имеет максимально выраженное грустное значение (sad = 1.0).

Оценка предлагаемыми средствами эмоционального состояния на основе анализа фотографии и на основе анализа текста показала следующие результаты:

```
emotions: {'angry': 0.0, 'disgust': 0.0, 'fear': 0.0, 'happy': 0.0, 'sad': 1.0, 'surprise': 0.0, 'neutral': 0.0}
```

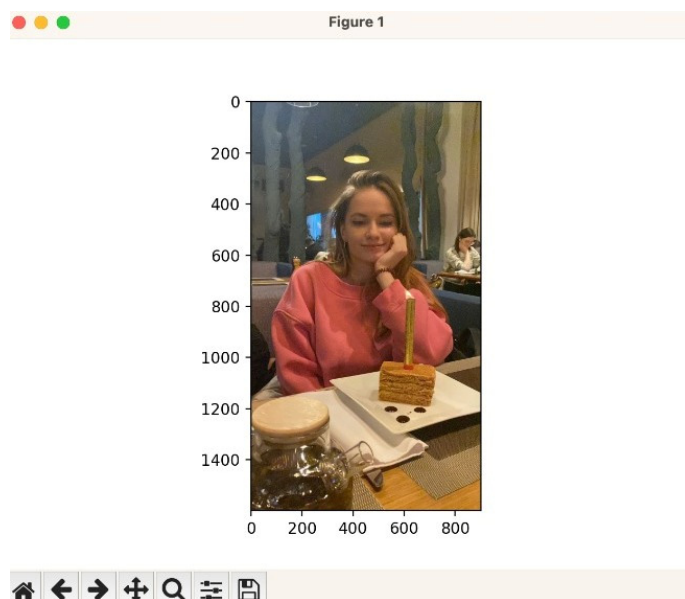


Рис. 6. Анализируемая библиотекой FER 2013 [21, 22] фотография

Точность оценки подтверждается наличием равных коэффициентов в оценке фотографии и текста.

Эта оценка подтверждена собственными интроспективными оценками респондента – она переживала непростые эмоции в жизни, испытывала досаду.

Заключение

Проведенный анализ современных средств, анализирующих профили пользователей социальных сетей, показал наличие возможностей выявления различных состояний пользователей. Применение совместного анализа фотографических и текстовых данных пользователя социальных сетей позволит улучшить показатели выявления эмоционального состояния, повысить точность определения эмоций, расширить диапазон выявления сложных состояний, агрессии – страха, отвращения и досады. За счет предварительной обработки медиаконтента улучшается точность, сокращается объем анализируемого медиаконтента и существенно повышается скорость его обработки.

В результате предлагаемого анализа профилей пользователей социальных сетей строится психоэмоциональная диаграмма с указанием проявлений экстремальных психологических состояний и влияющих на это факторов.

Список литературы

1. Статистика Интернета и соцсетей на 2023 год – цифры и тренды в мире и в России. URL: <https://www.web-canape.ru/business/statistika-interneta-i-socsetej-na-2023-god-cifry-i-trendy-v-mire-i-v-rossii/>
2. Азбука интернета : учеб. пособие для пользователей старшего поколения: работа на компьютере и в сети Интернет. М., 2023. 192 с.
3. Панченко И. М. Социальные сети как новая форма коммуникации: польза или опасность для общества? // Sociology of Science and Technology. 2018. Vol. 9, № 2. P. 86–94.
4. Швыряев П. С. Киберпреступность в России: новый вызов для общества и государства // Государственное управление. Электронный вестник. 2021. № 89.
5. Turner J. H. Toward a General Sociological Theory of Emotions // Journal for the Theory of Social Behaviour. 1999. Vol. 29. P. 133–161. doi: 10.1111/1468-5914.00095
6. Jasper J. M. Emotions and Social Movements: Twenty Years of Theory and Research // Annual Review of Sociology. 2011. Vol. 37. P. 285–303. doi: 10.1146/annurev-soc-081309-150015
7. Bericat E. The Sociology of Emotions: Four Decades of Progress // Current Sociology. 2016. Vol. 64. P. 491–513. doi: 10.1177/0011392115588355
8. Симонова О. А. Базовые принципы социологии эмоций // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2016. № 4. С. 12–27. doi: 10.21638/11701/spbu12.2016.401

9. Ефимов Е. Г. Социальные интернет-сети (методология и практика исследования). Волгоград, 2015. 217 с.
10. Коновалова А. В. Перфекционизм и перфекционистская самопрезентация в социальных сетях // Вестник РГГУ. Сер.: Психология. Педагогика. Образование. 2020. № 2. С. 151–165. doi: 10.28995/2073-6398-2020-2-151-165
11. Рязанова Т. А., Крейк А. И., Саломатова Д. Ф., Бердова Е. А. Влияние социальных сетей на эмоциональные переживания пользователей: социологический аспект // Общество: социология, психология, педагогика. 2023. № 5. С. 16–25.
12. Plutchik R. Emotions and Life: Perspectives from Psychology, Biology, and Evolution. Portland, 2003. 592 p.
13. Бутузова Ю. А. Психологическая сущность эмоционального состояния личности // Омский научный вестник. 2011. № 5. С. 173–175.
14. Крылова О. С., Власов Д. А., Шишков В. В. [и др.]. Описание информационного образа пользователя социальной сети с учетом его психологической характеристики // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Vol. 6, № 4. P. 24–37.
15. AIData. URL: https://s3.aidata.me/public/aidata_new2.pdf
16. Amber data. URL: <https://amberdata.ru/>
17. Double data. URL: <https://doubledata.ru/>
18. Relation hint. URL: <http://relation-hint.ru/>
19. ФОПС. URL: <https://www.fors.ru/>
20. Skillaz. URL: <https://skillaz.ru/>
21. Dataset fer2013. URL: <http://deeplearning.net/icml2013-workshop-competition/challenges>
22. Обнаружение эмоций на лице в браузере с помощью глубокого обучения и TensorFlow.js. Часть 2. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/544850/>
23. text2emotion 0.0.5. URL: <https://pypi.org/project/text2emotion/>
24. Microsoft Cognitive Services. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/archive/msdn-magazine/2016/october/cognitive-services-face-and-emotion-recognition-in-xamarin-forms-with-microsoft-cognitive-services>
25. Google Cloud Vision API. Будущее Computer Vision as a service настало? URL: <https://habr.com/ru/articles/312714/>
26. EITC/AI/GVAPI Google Vision API – это европейская программа ИТ-сертификации по использованию API Vision искусственного интеллекта Google Cloud для предварительно обученного понимания изображений. URL: <https://ru.eitca.org/programmes/eitc-ai-gvapi-google-vision-api/>
27. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А. И. Галушкина. М. : ИПРЖР, 2000. Кн. 1. 416 с.
28. Избачков Ю. С., Петров В. Н. Информационные системы. 2-е изд. СПб. : Питер, 2008. 655 с.
29. Ениколопов С. Н., Медведева Т. И., Воронцова О. Ю. Лингвистические характеристики текстов при депрессии и шизофрении. URL: http://www.medpsy.ru/mpj/archiv_global/2019_5_58/num02.php?ysclid=llks794mop718145021
30. Амеличева А. А. Агрессия. URL: <https://klinikarassvet.ru/patients/simptom/agressiya>
31. Маркин Е. И., Бершадская Е. Г., Мартышкин А. И. Методы идентификации личности по изображению лица // XXI век итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. Т. 9, № 1. С. 49–53.

References

1. *Statistika Interneta i sotssetey na 2023 god – tsifry i trendy v mire i v Rossii = Statistics of the Internet and social networks for 2023 – figures and trends in the world and in Russia.* (In Russ.). Available at: <https://www.web-canape.ru/business/statistika-interneta-i-socsetey-na-2023-god-cifry-i-trendy-v-mire-i-v-rossii/>
2. *Azbuka interneta: ucheb. posobie dlya pol'zovateley starshego pokoleniya: rabota na komp'yutere i v seti Internet = The ABC of the Internet: studies. a manual for older users: working on a computer and on the Internet.* Moscow, 2023:192. (In Russ.)
3. Panchenko I.M. Social networks as a new form of communication: benefit or danger for society? *Sociology of Science and Technology*. 2018;9(2):86–94. (In Russ.)
4. Shvyryaev P.S. Cybercrime in Russia: a new challenge for society and the state. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyy vestnik = Public administration. Electronic bulletin*. 2021;(89). (In Russ.)
5. Turner J.H. Toward a General Sociological Theory of Emotions. *Journal for the Theory of Social Behaviour*. 1999;29:133–161. doi: 10.1111/1468-5914.00095
6. Jasper J.M. Emotions and Social Movements: Twenty Years of Theory and Research. *Annual Review of Sociology*. 2011;37:285–303. doi: 10.1146/annurev-soc-081309-150015
7. Bericat E. The Sociology of Emotions: Four Decades of Progress. *Current Sociology*. 2016;64:491–513. doi: 10.1177/0011392115588355
8. Simonova O.A. Basic principles of sociology of emotions. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Sotsiologiya = Bulletin of St. Petersburg University. Sociology*. 2016;(4):12–27. (In Russ.). doi: 10.21638/11701/spbu12.2016.401

9. Efimov E.G. *Sotsial'nye internet-seti (metodologiya i praktika issledovaniya) = Social Internet networks (methodology and practice of research)*. Volgograd, 2015:217. (In Russ.)
10. Konovalova A.V. Perfectionism and perfectionist self-presentation in social networks. *Vestnik RGGU. Ser.: Psikhologiya. Pedagogika. Obrazovanie = Bulletin of the Russian State University. Ser.: Psychology. Pedagogy. Education*. 2020;(2):151–165. (In Russ.). doi: 10.28995/2073-6398-2020-2-151-165
11. Ryazanova T.A., Kreyk A.I., Salomatova D.F., Berdova E.A. The influence of social networks on the emotional experiences of users: a sociological aspect. *Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika = Society: sociology, psychology, pedagogy*. 2023;(5):16–25. (In Russ.)
12. Plutchik R. *Emotions and Life: Perspectives from Psychology, Biology, and Evolution*. Portland, 2003:592.
13. Butuzova Yu.A. The psychological essence of the emotional state of a person. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk scientific bulletin*. 2011;(5):173–175. (In Russ.)
14. Krylova O.S., Vlasov D.A., Shishkov V.V. et al. Description of the information image of a user of a social network, taking into account his psychological characteristics. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018;6(4):24–37. (In Russ.)
15. *AIData*. Available at: https://s3.aidata.me/public/aidata_new2.pdf
16. *Amber data*. Available at: <https://amberdata.ru/>
17. *Double data*. Available at: <https://doubledata.ru/>
18. *Relation hint*. Available at: <http://relation-hint.ru/>
19. *FORS*. Available at: <https://www.fors.ru/>
20. *Skillaz*. Available at: <https://skillaz.ru/>
21. *Dataset fer2013*. Available at: <http://deeplearning.net/icml2013-workshop-competition/challenges>
22. *Obnaruzhenie emotsiy na litse v brauzere s pomoshch'yu glubokogo obucheniya i TensorFlow.js. Chast' 2 = Face emotion detection in the browser using deep learning and TensorFlow.js . Part 2*. (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/544850/>
23. *text2emotion 0.0.5*. Available at: <https://pypi.org/project/text2emotion/>
24. *Microsoft Cognitive Services*. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/archive/msdn-magazine/2016/october/cognitive-services-face-and-emotion-recognition-in-xamarin-forms-with-microsoft-cognitive-services>
25. *Google Cloud Vision API. Budushchee Computer Vision as a service nastalo?* Available at: <https://habr.com/ru/articles/312714/>
26. *EITC/AI/GVAPI Google Vision API – eto evropeyskaya programma IT-sertifikatsii po ispol'zovaniyu API Vision iskusstvennogo intellekta Google Cloud dlya predvaritel'no obuchennogo ponimaniya izobrazheniy = EITC/AI/GVAPI Google Vision API is a European IT certification program for using the Google Cloud Artificial Intelligence Vision API for pre-trained image understanding*. (In Russ.). Available at: <https://ru.eitca.org/programmes/eitc-ai-gvapi-google-vision-api/>
27. Galushkin A.I. *Teoriya neyronnykh setey: ucheb. posobie dlya vuzov = Theory of neural networks : textbook for universities*. Moscow: IPRZhR, 2000;(Bk.1):416. (In Russ.)
28. Izbachkov Yu.S., Petrov V.N. *Informatsionnye sistemy. 2-e izd. = Information systems. 2nd ed.* Saint Petersburg: Piter, 2008:655. (In Russ.)
29. Enikolopov S.N., Medvedeva T.I., Vorontsova O.Yu. *Lingvisticheskie kharakteristiki tekstov pri depressii i shizofrenii = Linguistic characteristics of texts in depression and schizophrenia*. (In Russ.). Available at: http://www.medpsy.ru/mpj/archiv_global/2019_5_58/nomer02.php?ysclid=llks794mop718145021
30. Amelicheva A.A. *Agressiya = Aggression*. (In Russ.). Available at: <https://klinikarassvet.ru/patients/symptom/agressiya>
31. Markin E.I., Bershadskaya E.G., Martyshkin A.I. Methods of identification of a person by face image. *XXI vek itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century results of the past and problems of the present plus*. 2020;9(1):49–53. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Николаевич Бодин

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

Oleg N. Bodin

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

Василий Маратович Жигачев

кандидат технических наук, докторант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mkk7619@mail.ru

Vasily M. Zhigachev

Candidate of technical sciences, doctoral student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 28.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 07.10.2023

Принята к публикации/Accepted 24.11.2023