

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

№ 3, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Полтавский А. В., Кузин Н. А., Юрков Н. К.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО
ТРАКТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

5

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Ватутин М. А., Ефимов В. П., Борматов Е. В., Зубков А. В.

МЕТОДИКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АНАЛОГОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ
ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

16

Ефремов А. С., Пузанков С. В.

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ВАРИАНТА
КОМПЛЕКТОВАНИЯ СОСТАВА ВЫЕЗДНЫХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП С УЧЕТОМ РИСКОВ

23

Антипенко В. В., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Карпанин О. В.

СИММЕТРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ БИОИМПЕДАНСА

33

Артамонов Д. В., Мыскин В. М., Семенов А. Д.

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ
В РЕЖИМЕ С ОБОСТРЕНИЕМ

39

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Спринджук М. В., Владыко А. С., Чжочжуан Лу, Титов А. П., Берник В. И.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА БИОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ
ГЕНОМНОЙ ПРИРОДЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ
МУЛЬТИЭПИТОПНЫХ АНТИКОРОНАВИРУСНЫХ ВАКЦИН

48

Бодин О. Н., Сержантова Н. А., Едемский М. В., Кручинина Н. Э.
РАЗРАБОТКА БАЗЫ МОДЕЛЕЙ ИОННЫХ ТОКОВ
ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

59

Бодин О. Н., Сержантова Н. А., Едемский М. В., Кручинина Н. Э.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИОННЫХ ТОКОВ
В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НЕИНВАЗИВНОЙ
КАРДИОДИАГНОСТИКИ

70

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 3, 2023

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Poltavsky A.V., Kuzin N.A., Yurkov N.K.

A MODEL FOR CONTROLLING THE STATE OF THE OPTOELECTRONIC
PATH OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

5

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Vatutin M.A., Efimov V.P., Bormatov E.V., Zubkov A.V.

THE METHODOLOGY OF CIRCUIT CONSTRUCTION
OF THE ANALOG VALUE CONVERTER IN THE TIMEFRAME

16

Efremov A.S., Puzankov S.V.

APPROACH TO THE SUBSTANTIATION OF THE OPTION
OF COMPOSITION OF THE METROLOGICAL
OFFICE GROUPS IN CONSIDERING RISKS

23

Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Karpanin O.V.

SYMMETRICAL CURRENT SOURCE
FOR BIOIMPEDANCE MEASUREMENTS

33

Artamonov D.V., Myskin V.M., Semenov A.D.

ANALYSIS OF EMERGENCY SITUATIONS DEVELOPING
IN THE MODE WITH AGGRAVATION

39

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Sprindzuk M.V., Vladyko A.S., Zhuozhuang Lu, Titov L.P., Bernik V.I.

TECHNIQUE FOR THE ANALYSIS OF BIOINFORMATION DATA
OF GENOMIC NATURE FOR THE DEVELOPMENT
OF MULTIEPITOPE ANTICORONAVIRUS VACCINE MODELS

48

Bodin O.N., Serzhantova N.A., Edemsky M.V., Kruchinina N.E.

DEVELOPMENT OF IONIC CURRENT MODEL BASE FOR MEDICAL
INFORMATION SYSTEM OF CARDIOVASCULAR DISEASES DIAGNOSTICS

59

Bodin O.N., Serzhantova N.A., Edemsky M.V., Kruchinina N.E.

**USE OF DETAILED MODELS OF ION CURRENTS IN THE INFORMATION
SYSTEM OF NON-INVASIVE CARDIAC DIAGNOSIS**

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 519.71

doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-1

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

А. В. Полтавский¹, Н. А. Кузин², Н. К. Юрков³

¹ Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

¹ Институт математики, информатики и естественных наук

Московского городского педагогического университета, Москва, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ avp57avp@yandex.ru, ² sputnik1985nk3y@mail.ru, ³ yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы – исследовать модели и один из подходов при контроле параметров на ранних стадиях испытаний с построением алгоритмов для системы управления фото и видеокамерами оптико-электронных приборов в целях осуществления задач дистанционного наблюдения за объектами. *Материалы и методы.* Методы, модели и алгоритмы для проведения информационного моделирования и исследования задач данных систем, а также контроля и испытаний разрабатываются, как правило, на основе фундаментальных общепринятых подходах, они являются и сегодня первичным звеном обоснования в задачах для предварительного их анализа, в том числе в задачах по управлению различными камерами обнаружения, слежения и опознавания объекта. *Результаты.* Разработаны информационные модели к информационно-измерительным и управляющим системам и для электронного тракта – канала связи и управления камерами оптико-электронных приборов (ОЭП) в общей телекоммуникационной сети информационно-управляющей системы, созданы действующие алгоритмы, основанные на процедурах поиска оптимального управления фото и видеокамерой дистанционного наблюдения. Предлагаются интегрированный подход и алгоритмы осуществления задачи поиска управления и контроля с оценкой предварительных испытаний применительно к подсистемам фото/видеонаблюдения ОЭП в составе информационно-измерительных и управляющих систем. *Выводы.* Разработан подход поиска и построения оптимального алгоритма управления в звеньях ОЭП с моделью оценки возможных потенциальных рисков потери информации, а также создана новая информационная технология в задачах предварительных измерений и испытаний объектов систем для видеонаблюдения перспективных и уже имеющихся объектов ОЭП на основе классических методов оптимального управления.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, камера видеонаблюдения, электронный тракт, управление, мониторинг, слежение, объекты ИИУС

Для цитирования: Полтавский А. В., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Модель управления состоянием оптико-электронного тракта информационно-измерительных и управляющих систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-1

A MODEL FOR CONTROLLING THE STATE OF THE OPTOELECTRONIC PATH OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

A.V. Poltavsky¹, N.A. Kuzin², N.K. Yurkov³

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ Institute of Mathematics, Computer Science and Natural Sciences
of Moscow City Pedagogical University, Moscow, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ avp57avp@yandex.ru, ² sputnik1985nk3y@mail.ru, ³ yurkov_nk@mail.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the work is to investigate models and one of the approaches for monitoring parameters at the early stages of testing with the construction of algorithms for the control system of photo and video cameras of optoelectronic devices in order to carry out the tasks of remote monitoring of objects. *Materials and methods.* Methods, models and algorithms for information modeling and research of tasks of these systems, as well as control and testing are developed, as a rule, on the basis of fundamental generally accepted approaches, they are still the primary link of justification in tasks for their preliminary analysis, including in tasks for managing various cameras of detection, tracking and identification of an object. *Results.* Information models have been developed for the IIUS and for the electronic path – the communication channel and control of the cameras of the OEP devices in the general telecommunication network of the information management system (IUS), operating algorithms based on the procedures for finding optimal control of a remote surveillance camera and video camera have been created. An integrated approach and algorithms for the implementation of the task of searching for control and control with the assessment of preliminary tests in relation to photo/video surveillance subsystems of the ECO as part of the IIUS are proposed. *Conclusion.* An approach has been developed to search and build an optimal control algorithm in the links of the ECO with a model for assessing possible potential risks of information loss, and a new information technology has been created in the tasks of preliminary measurements and tests of objects of systems for video surveillance of promising and already existing ECO objects based on classical optimal control methods.

Keywords: optoelectronic device, video surveillance camera, electronic path, management, monitoring, tracking, IIUS object

For citation: Poltavsky A.V., Kuzin N.A., Yurkov N.K. A model for controlling the state of the optoelectronic path of information-measuring and control systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-1

Введение

Функционирование различных систем для информационно-управляющих систем, информационно-измерительных и управляющих систем, оптико-электронных приборов и других связано с контролем испытаний и получением первичных оценок их показателей. Сами испытания завершаются принятием определенного решения. Выработка и принятие этого решения обычно осуществляются в условиях ограниченного числа объектов, отпускаемых на испытания, и ограниченного числа наблюдений за каждым таким объектом. В свою очередь, для испытываемого объекта характерно два возможных состояния, определяемые тем – удовлетворяют ли его показатели качества требованиям заказчика или нет. По оценкам и результатам проводимых испытаний проводится проверка выдвинутых ранее гипотез. В настоящий период времени разработки моделей различных систем контроля испытаний объектов сложных технических объектов и приборов информационно-измерительных и управляющих систем, создание действующих методик, алгоритмов и программных продуктов к ним подразумевают использование интегративных путей их анализа – способов и подходов создания информационных моделей для выявления первичных характеристик [1, 2]. Среди множества объектов для приборов ИИУС рассматриваются разработки моделей к построению системы управления в электронных трактах управления видеокамерами (как правило, вертикальный и горизонтальный каналы наблюдения-слежения) и др. Обоснование алгоритма управления и программ в них, как правило, на имитационных моделях осуществляется на предварительном этапе их проектирования. Данные модели к оптико-электронным приборам (ОЭП) с их алгоритмами обнаружения, распознавания и идентификации объектов (и подвижных, и неподвижных), как было отмечено,

относятся к классу сложных информационных конструкций для технических и эргатических систем, которые в таких постановочных задачах часто рассматриваются как стохастические динамические системы. В свою очередь, эти блоки из программ и динамические модули (модели и алгоритмы) дополняют структуру современных информационно-аналитических систем (ИАС), а также являются неотъемлемой частью контроля испытаний, проводимых измерений при принятии управленческих решений [4, 5]. Вероятностные методы из теории автоматического управления по своей природе сложны и требуют применения современной вычислительной техники. Построение комплекса информационных моделей ИИУС, алгоритмов и программ для анализа динамических модулей в составе информационной системы ИАС предполагает также множество подходов к поиску оптимального управления объектом. Развитие теоретико-множественных и логико-вероятностных методов исследования ОЭП и процессов управления в них является необходимым инструментом при их анализе и синтезе. Практически все нам известные методы исследования автоматических систем управления базируются, как принято, на создании математических моделей динамических систем с оценками измерений и состояний. Понятие для состояния динамической системы (ДС) было ранее введено в 1936 г. Это понятие адекватно минимально необходимой совокупности из оцениваемых параметров, содержащей всю информацию о положении и движении системы в данный момент и дающей возможность судить о ее поведении в будущем, т.е. определить реакцию системы на произвольное возмущение для них. Покажем это применительно к построению динамических модулей и звеньев объектов ИИУС, которые являются необходимым инструментом в структурах сетевой модели ИАС.

Модель управления состоянием информационно-измерительной системы

На ранних стадиях проектирования и разработки объектов управления оптико-электронных приборов, находящихся, как правило, в составе блоков и моделей для информационно-измерительных и управляющих систем [4–6], ставится вопрос по постановке задачи поиска управления конечным состоянием объекта или прибора. Для современных объектов ИИУС характерно то, что многие модели создаются в составе из блоков-модулей сложных технических систем (СТС) и информационно-управляющих систем в сети. Например, для объектов беспилотного воздушного судна характерна имитационная модель для ИИУС в составе объектов ИУС, изображенная на рис. 1. Общепринято, что сама модель должна отражать основные функциональные свойства СТС и ИУС с оценкой основных показателей качества и процесса. Среди показателей имеются показатели функциональной безопасности, которые достаточно тесно связаны с вероятностью правильного функционирования приборного оборудования, вероятности правильной выдачи команд управления и др. Данные процессы сегодня рассматривают в комплексе решаемых задач ИУС. Например, оператор в сети ИУС должен быстро перевести камеру на объект-цель в условиях помех, подать управляющий сигнал объектам ИУС, например на разворот всех беспилотных средств с ОЭС в «одну точку», «построить» их в ряд и т.д.



Рис. 1. Типовая схема построения моделей в телекоммуникационной сети ИУС

Постановка задачи для поиска оптимального управления в моделях выбираемых объектов в ИИУС заключается в следующем. Классическая теория управления – это раздел теории управления (теория управления – составная часть кибернетики), изучающий научно-прикладные задачи анализа и синтеза централизованного автоматического управления одним объектом. Пусть первичная модель объекта для электронного тракта слежения и управляемый случайный процесс в звеньях цепи для ОЭП, находящихся в составе функциональных блоков для ИИУС, описывается уравнениями стохастической динамической системы в следующем виде [7]:

$$\dot{Y}_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y, \quad j = \overline{1, n}, \quad Y_j(t_0) = Y_j^0, \quad (1)$$

где Y , u , N_j – векторы состояния размерности $(n \times 1)$, управления $(r \times 1)$ и помехи $(s \times 1)$; a_{ji} и b_{ji} – известные коэффициенты в информационном моделировании ОЭП.

Как видим, принципиальной особенностью для процесса является то, что он носит случайный характер, об этом свидетельствует наличие помехи N_j^y в правой части, коэффициенты уравнения a_{ji} и b_{ji} являются постоянными. Так как справа имеется помеха, то следует получить оценки для фазового вектора координат, т.е. должен быть измеритель, который описывается также уравнениями, работающий также с помехами (внутренними и внешними). Модель измерителя представляет формула

$$Z_\ell = \sum_{i=1}^m c_\ell Y_i + N_\ell^z, \quad \ell = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Функционал качества оптимизации ДС в информационной среде ИАС выглядит

$$J_{OK} = (Y_K, u) = F(Y_1^k, Y_u^k), \quad (3)$$

где $Y_j^{(k)} = Y_j(t_k)$; t_k – конечный момент времени моделируемого процесса в ОЭП. На управление в модели ДС приняты определенные ограничения $|u(t)| \leq d$, $(i = 1, 2)$.

Таким образом, требуется определить u_{opt} , обеспечивающее минимум функционалу качества (3). Решение задачи поиска оптимального управления в такой постановке сводится к реализации действующего алгоритма для модели (1) в виде:

1) функционал качества преобразуем к виду

$$J_{OK} = (Y_K, u) \rightarrow J_o(Y, u);$$

2) сформируем дополнительную фазовую координату в виде

$$\dot{Y}_{n+1} = \Phi_{n+1}(Y, u, t); \quad y_{n+1}(Y, u, t) = J_o(Y, u); \quad (4)$$

3) имеем также формулу

$$J_o(Y, u) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial Y_j} \dot{Y}_j; \quad (5)$$

4) учитывая равенство в модели (1), запишем далее следующее выражение:

$$J_o(Y, u) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial Y_j} \left(\sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y \right);$$

5) следовательно,

$$\Phi_{n+1}(Y, u, t) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial Y_j} \left(\sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y \right); \quad (6)$$

6) из формулы (1) видно, что

$$\Phi_j(Y, u, t) = \sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y; \quad (7)$$

7) на данном шаге алгоритма запишем функцию Гамильтона в форме

$$H = \sum_{j=1}^{n+1} \psi_j \varphi_j, \quad H = \sum_{j=1}^n (\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) (\sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y); \quad (8)$$

8) дифференцируя функцию Гамильтона по фазовым координатам, получим систему из сопряженных уравнений для координаты Ψ

$$\dot{\psi}_v = -\frac{\partial H}{\partial Y_v} = -\sum_{j=1}^n \left[(\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) a_{vj} + \psi_{n+1} \frac{\partial^2 F}{\partial Y_j \partial Y_v} (\sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y) \right];$$

$$\dot{\psi}_{n+1} = 0; \quad (9)$$

9) система, представленная (9), решается при $\psi_v(t_k) = 0, v = \overline{1, n}, \psi_{n+1}(t_k) = -1$.

Так как речь (в постановочной части задачи) идет о стохастической системе, то следует пользоваться стохастическим принципом максимума, т.е. принять в моделировании условное математическое ожидание от функции Гамильтона при фиксированном значении для координаты z , оно будет следующим:

$$M[H(Y, u, \psi, t | z)] = M \left\{ \left[\sum_{j=1}^n (\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) (\sum_{i=1}^n a_{ji} Y_i + \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i + N_j^y) \right] | z \right\}; \quad (10)$$

10) задача состоит в том, чтобы обеспечить максимум для M^* по u

$$\Delta M = M \left\{ \left[\sum_{j=1}^n (\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) \sum_{i=1}^r b_{ji} u_i \right] | z \right\}$$

или

$$\Delta M = M \left\{ \left[\sum_{j=1}^n u_i \sum_{j=1}^n (\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) b_{ji} \right] | z \right\}; \quad (11)$$

11) таким образом, имеем выражение

$$\max \Delta M = \sum_{i=1}^r \max \Delta M_i; \quad (12)$$

12) учитывая ограничения и равенства (11), (12), получим управление (рис. 2):

$$u_i^* = d \operatorname{sgn} Mzi,$$

$$Mzi = M \left\{ \left[\sum_{j=1}^n (\psi_j + \psi_{n+1} \frac{\partial F}{\partial Y_j}) b_{ji} \right] | z \right\}. \quad (13)$$

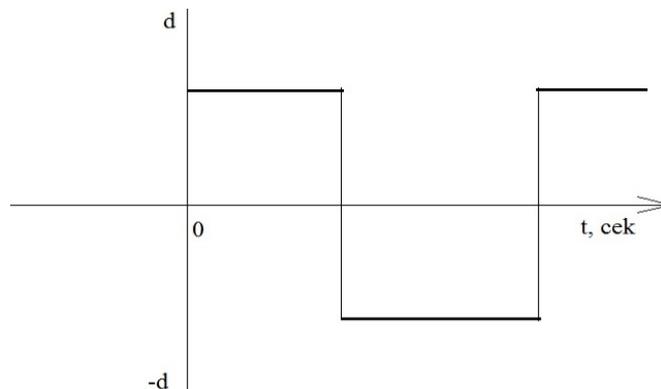


Рис. 2. Схематизация поиска оптимального управления в электронном тракте ОЭП

Приведем один из важных примеров к решению задачи в автоматизированной системе ИАС, связанной с разработкой действующего алгоритма с переменными режимами управления (как с переменными структурами) системой, которые часто возникают у разработчиков на начальной стадии исследований и проектирования подобных информационно-измерительных и управляющих систем в сети ИУС [8].

Дополненная структура модели ДС. Как правило, часто осуществление управления в звеньях к ОЭП, входящих в блоки для ИИУС (применяют к различным моделям для беспилотных систем), производится дистанционно. В компьютеризированной среде из блоков ИАС разработчикам может понадобиться еще одна модель – модель динамического модуля для дистанционного канала связи и управления объектом (фото и видеокamerой ОЭП, приводом антенного блока в ИИУС и др.) в ИУС. В основу разработки информационной модели для блоков канала управления и линии связи пункта дистанционного управления в одном из таких электронных трактов ОЭП положим основные положения из общей теории для систем со случайной структурой [1], признаком для классификации данных стохастических систем ДС является учет характера процесса и наличие фазового вектора состояния $Y(t)$, где время t может быть или непрерывным или дискретным: $t_{(k)} = kT_n$. По этому признаку различают многие стохастические системы с независимой, а также и с зависимой от вектора состояния $Y(t)$ структурой объектов ИИУС. В данном случае информационный процесс влияет на состояние вектора $Y(t)$ ДС, так как при смене номера $s(t)$ происходит прерывание функционирования отдельных подсистем в ДС и подключение других. Известно, что множество известных моделей и систем со случайной структурой разделяют на три основные [1]: с независимой случайной структурой, с зависимой случайной структурой при распределенных переходах в пространстве состояний для вектора $Y(t)$, с зависимой случайной структурой при сосредоточенных переходах на моделируемых гиперплоскостях переключения в пространстве состояний $Y(t)$ к рассматриваемым ДС. В подобных задачах принято рассматривать системы при условиях учета в модели марковских скачкообразных входных воздействий. Уравнения информационной модели для приборов ИИУС с оцениванием стохастической системы (и подсистемы) составляют [1, 7]

$$\dot{Y} = A^{(s)}(t)f^{(s)}(Y) + B^{(s)}(t)u(t) + \{F^{(s)}(t) + g^{(s)}\Psi^{(s)T}(Y)\}\xi(t), (s = 1, \bar{n}), \quad (14)$$

где $s(t)$ – индекс структуры системы – марковская цепь; $f^{(s)}(Y)$ и $\psi^{(s)}(Y)$ – некоторые нелинейные функции Y ; $\xi(t)$ – векторный гауссовский белый шум; $u(t)$ – векторный детерминированный входной сигнал (управляющее воздействие).

Из уравнения (14) несложно перейти к записи его в дискретном представлении динамической системы объектов ИИУС с марковской структурой при $g(\cdot) \equiv 0$ (при отсутствии мультипликативных (параметрических) возмущений) с матрицами $A(\cdot)$ и $B(\cdot)$, которые не зависят от изменения структуры, т.е. индекса $s(k)$:

$$Y(k+1) = A(k+1, k)Y(k) + B(k+1, k)u(k) + F(s(k+1), s(k), k+1, k)\xi(k). \quad (15)$$

В моделировании сетевой ИУС принимается то, что с мобильного наземного пункта управления по каналу радиолинии поступает сигнал управления разворотом камеры в ОЭП. В свою очередь, канал управления и связи в сети ИУС подвергается помехам, которые, как правило, приводят к случайным перерывам передачи команд и информации. Передаваемый управляющий сигнал (как и сами команды для ОЭП) представляет собой некоторую последовательность радиоимпульсов, поступающих через одинаковые промежутки (моделируемые интервалы в ИАС) во времени: $u(k)$ с $k = 0, 1, 2, 3, 4$. Амплитуда для импульсов практически постоянна, в течение всего времени переходного процесса в модели для фильтра $u(k) = u$, длительность для импульса достаточно мала по сравнению с этим временем. Модель для фильтра на входе ИИУС является дискретным аналогом апериодического звена, а вероятности нарушения и восстановления связи равны соответственно q и l ($q + l < 1$). Требуется найти устойчивость и вероятности для исправного и неисправного состояний канала управления и связи пункта с объектом ОЭП, а также определить вероятностные характеристики моментов – математические ожидания и дисперсии передаваемого сигнала на выходе из фильтра при допущении об установившемся режиме работы измерительного прибора и информационном процессе. Представим дискретную модель канала управления и связи в блоках для объектов сетевой ИУС уравнениями следующего вида:

$$Y(k+1) = AY(k) + u^{(r)}(k), 0 < A < 1, \quad (16)$$

где $u^{(r)} \triangleq u(s(k), k)$; $r \triangleq s(k)$ – марковская цепь с двумя возможными состояниями системы ДС ($r = 1, 2$), заданная соответствующими вероятностями переходов в виде

$$\begin{aligned} q^{(sr)} &\triangleq q(s(k+1) | s(k)), (s, r = 1, 2), \\ q^{(11)} &= 1 - q^{(21)}, q^{(22)} = 1 - q^{(12)}, q^{(21)} = q, q^{(12)} = \ell. \end{aligned} \quad (17)$$

Сигнал $u^{(r)}(k)$ имеет значения – $u_1 = (1 - A)u$, $u_2 = 0$; $A = \alpha$, уравнения поиска искомым характеристик в моделировании объекта принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} P^{(1)}(k+1) &= (1 - q - \ell)P^{(1)}(k) + \ell, P^{(2)}(k+1) = 1 - P^{(2)}(k+1), \\ \mu^{(1)}(k+1) &= \alpha \left[(1 - q)\mu^{(1)}(k) + \ell\mu^{(2)}(k) \right] + (1 - q)(1 - \alpha)uP^{(1)}(k), \\ \mu^{(2)}(k+1) &= \alpha \left[q\mu^{(1)}(k) + (1 - \ell)\mu^{(2)}(k) \right] + q(1 - \alpha)uP^{(1)}(k), \\ \Phi(k+1) &= \alpha^2\Phi(k) + 2\alpha(1 - \alpha)\mu^{(1)}(k) + (1 - \alpha)^2u^2P^{(1)}(k), \end{aligned} \quad (18)$$

где $\Phi(k+1)$ – переходная матрица состояния в информационной модели ИИУС.

В установившемся состоянии имеем выражения к анализу процесса в виде

$$\begin{aligned} P^{(s)}(k+1) &= P^{(s)}(k) = P^{(s)}, \\ \mu^{(s)}(k+1) &= \mu^{(s)}(k) = \mu^{(s)}, \\ \Phi(k+1) &= \Phi(k) = \Phi. \end{aligned} \quad (19)$$

Искомые характеристики из выражения оцениваемого информационного процесса:

$$\begin{aligned} P^{(1)} &= \frac{\ell}{L}, P^{(2)} = \frac{q}{L}, \\ m &= \mu^{(1)} + \mu^{(2)} = \frac{\ell u}{L}, \\ \Theta &= \Phi - m^2 = \frac{\ell q u}{L^2} \left[1 - \frac{2\alpha(1 - \alpha)L}{(1 + \alpha)(1 - \alpha(1 - L))} \right], L = q + \ell. \end{aligned} \quad (20)$$

Представленная выше информационная дискретная стохастическая модель для каналов навигации, управления и линии связи пункта наблюдения с ОЭП в составе ИИУС имеет упрощенный ее вариант, но в первичных задачах оценивания и поисковых научных исследований, а также и информационного моделирования с получением основных оценок измерений к контролю испытаний она может быть вполне применима. Представленные выше уравнения к решению не сложные. Физическая модель для широкого класса систем ИИУС со случайной структурой принимается следующей (в задачах контроля испытаний и первичных измерений):

- система состоит из ряда звеньев различной или однородной физической природы;
- система является динамической, а ее фазовые координаты состояния изменяются с течением времени;
- система рассматривается как стохастическая, так входные сигналы и возмущения ИИУС являются непрерывными или непрерывнозначными случайными функциями времени, а время изменяется непрерывно или дискретно;
- структура для системы в целом или отдельных ее звеньев и значения параметров скачкообразно изменяются по случайному закону в случайные моменты времени, зависящие или не зависящие от фазовых координат вектора состояния, т.е. система «скачком» переходит от одной структуры в другую;
- состояния или сами структуры, в которых может находиться система, являются детерминированными;
- число рассматриваемых структур, в которых может находиться система, является счетным и конечным.

Проектируемые блоки динамических модулей для ИАС позволяют разработчикам ИИУС проводить ускоренные испытания с дальнейшим принятием решений ЛПР. Наряду с ними, как

правило, в организации принятия управленческих решений в компьютеризированной среде ИАС по предварительным оценкам контролируемых параметров ИИУС применяют методы, модели и алгоритмы из экспертных оценок, например часто в информационных системах ИАС используют дисперсионный или энтропийный коэффициент конкордации $W_{эн}$, который находят по следующей рабочей формуле [9]:

$$W_{эн} = 1 - H/H_{\max}, \quad (21)$$

где H , H_{\max} – информационная энтропия оценивания принимаемых решений в автоматизированной системе ИАС и ее максимум к выбираемой для ЛПР шкале измерений, основанной на известных методах и моделях из экспертных оценок.

Реализуют в информационно-аналитической среде ИАС экспертные методы – Дельфы, Саати, взвешенных сумм, поэтапного ранжирования, уступок и др. [10]. Различные оцениваемые процессы, решения и действия, направленные, прежде всего, на достижение функциональной безопасности для ИУС, они принимаются и проводятся не только на ранних стадиях их разработки, но и на этапах жизненного цикла при эксплуатации любого приборного оборудования к ним.

Заключение

Эволюция измерительной техники, объектов в ИИУС и современный научно-технический прогресс, стремительная цифровизация моделей и блоков аппаратно-программных средств информационно-вычислительных систем открывают широкие возможности по автоматизации информационных процессов с анализом сложных динамических систем в условиях их более полного контроля в ИАС, они позволяют адаптировать алгоритмы к изменению параметрической и структурной неопределенности. Сегодня принято различать стационарную и нестационарную, а также параметрическую и структурную неопределенности объектов управления в моделях сетевой ИИУС.

Стационарная неопределенность не изменяется в процессе функционирования – динамическая система имеет неопределенные постоянные параметры и структуру. Особенностью для таких ДС являются параметрическая и структурная неопределенности в начальный момент времени работы, а также и стохастичность информационного процесса при воздействии случайных входных сигналов и различного рода помех в блоках ИУС. В свою очередь, нестационарная параметрическая и структурная неопределенности объектов, как правило, состоят в изменении их в процессе функционирования системы. Динамические системы с нестационарной параметрической и структурной неопределенностями получили общепринятое свое название – систем со случайно изменяющейся структурой [1]. Информационный процесс по распознаванию входного полезного сигнала ОЭП на фоне скачкообразно изменяющихся помех можно интерпретировать как изменение структуры основного измерителя. Задачи информационного моделирования ОЭП с нестационарной параметрической и структурной неопределенностями стали более интенсивно изучаться и применяться в области решения задач для статистической радиотехники, моделей к объектам робототехники, информационно-управляющих системах и т.д. Актуальными являются сегодня и сетевые объекты в блоках ОЭП для беспилотных систем. Разработки методов анализа и синтеза, а также моделей и алгоритмов этим сложным техническим системам, к которым относятся и ОЭП различного функционального предназначения, составляют интегративный подход и применяются на всех этапах жизненного цикла для изделия. Сочетание известных ранних подходов и классических методов с созданием информационной модели из динамических модулей объектов для ИАС, адекватных процессам, по существу, составляют отдельный и трудоемкий этап предварительных испытаний сложных информационных конструкций.

Выявление первичных оценок для осуществления первичного контроля испытаний для основных параметров и измерения основных показателей качества с дальнейшей их характеристикой в блоках ИИУС, а также построение динамических модулей в компьютерной среде ИАС с формированием оценок мнений экспертов основным показателям при разработке информационно-измерительной системы ОЭП, которые формируют их первичный технический облик – является одним из ключевых этапов в современных информационных системах ИАС [9, 10].

Сложная информационная конструкция ИАС создается для всех этапов жизненного цикла изделий ИИУС и объектов сетевой ИУС.

Список литературы

1. Казаков И. Е., Артемьев В. М., Бухалев В. А. Анализ систем случайной структуры. М. : Физматлит, 1993. 272 с.
2. Казаков И. Е., Мальчиков С. В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М. : Наука, 1983. 384 с.
3. Гладков Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М. : Энергоиздат, 1984. 256 с.
4. Трапезников В. А. Управление и научно-технический прогресс. М. : Наука, 1983. 223 с.
5. Белов В. С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения. М. : Издат. центр ЕАОИ, 2008. 111 с.
6. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Нгуен Зуи Фыонг. Телекоммуникация сетевых систем на основе высотных платформ // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 46–55.
7. Полтавский А. В. Модель измерительной системы в управлении БпЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 73–77.
8. Кульба В. В., Микрин Е. Н., Павлов Б. В., Платонов В. Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов // Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. М. : Наука, 2006. 579 с.
9. Семенов С. С., Харчев В. Н., Иоффин А. И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М. : Радио и связь, 2004. 552 с.
10. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений. СПб. : Лань, 2015. 448 с.
11. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
12. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модель отказов автоматизированных средств контроля // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 1. С. 63–67.

References

1. Kazakov I.E., Artem'ev V.M., Bukhalev V.A. *Analiz sistem sluchaynoy struktury = Analysis of systems of random structure*. Moscow: Fizmatlit, 1993:272. (In Russ.)
2. Kazakov I.E., Mal'chikov S.V. *Analiz stokhasticheskikh sistem v prostranstve sostoyaniy = Analysis of stochastic systems in the state space*. Moscow: Nauka, 1983:384. (In Russ.)
3. Gladkov D.I. *Optimizatsiya sistem negradientnym sluchaynym poiskom = Optimization of systems by non-gradient random search*. Moscow: Energoizdat, 1984:256. (In Russ.)
4. Trapeznikov V.A. *Upravlenie i nauchno-tekhnicheskij progress = Management and scientific and technical progress*. Moscow: Nauka, 1983:223. (In Russ.)
5. Belov V.S. *Informatsionno-analiticheskie sistemy. Osnovy proektirovaniya i primeneniya = Information and analytical systems. Fundamentals of design and application*. Moscow: Izdat. tsentr EAOI, 2008:111. (In Russ.)
6. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Nguen Zui Fyong. Telecommunications of network systems based on high-rise platforms. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(1):46–55. (In Russ.)
7. Poltavskiy A.V. Model of a measuring system in UAV control. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems*. 2009;(10):73–77. (In Russ.)
8. Kul'ba V.V., Mikrin E.N., Pavlov B.V., Platonov V.N. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya informatsionno-upravlyayushchikh sistem kosmicheskikh apparatov = Theoretical foundations of designing information and control systems of spacecraft*. Moscow: Nauka, 2006:579. (In Russ.)
9. Semenov S.S., Kharchev V.N., Ioffin A.I. *Otsenka tekhnicheskogo urovnya obraztsov vooruzheniya i voennoy tekhniki = Assessment of the technical level of samples of weapons and military equipment*. Moscow: Radio i svyaz', 2004:552. (In Russ.)
10. Mikoni S.V. *Teoriya prinyatiya upravlencheskikh resheniy = Theory of managerial decision-making*. Saint Petersburg: Lan', 2015:448. (In Russ.)
11. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile object on the examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
12. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Model of failures of automated control tools. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(1):63–67. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Александр Васильевич Полтавский**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатизации образования,
Институт математики, информатики
и естественных наук
Московского городского
педагогического университета
(Россия, г. Москва,
2-й Сельскохозяйственный проезд, 4);
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Aleksandr V. Poltavsky

Doctor of technical sciences, professor, professor
of the sub-department of informatization of
education, Institute of Mathematics, Informatics
and Natural Sciences
of the Moscow City Pedagogical University
(4 2nd Selskokhozyaystvennyy passage,
Moscow, Russia);
leading researcher,
V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems
of the Russian Academy of Sciences
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Николай Андреевич Кузин

студент,
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический
университет (МАДИ)
(Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)
E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

Nikolai A. Kuzin

Student,
Moscow Automobile and Road Construction State
Technical University (MADI)
(64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

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

Nikolay K. Yurkov

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

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

Поступила в редакцию / Received 15.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 16.06.2023

Принята к публикации / Accepted 14.07.2023

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.03.83

doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

МЕТОДИКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АНАЛОГОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

М. А. Ватутин¹, В. П. Ефимов², Е. В. Борматов³, А. В. Зубков⁴

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

¹ vatutinm@mail.ru, ^{2,3,4} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В большинстве современных цифровых вольтметров используется аналого-цифровой преобразователь время-импульсного типа с двухэтапным интегрированием, которое проходит в два этапа – интегрирования и счета. Во время счета в соответствии с принципом действия преобразователя входная информация в аналого-цифровой преобразователь не поступает и теряется. Целью является разработка методики преобразования аналоговой величины в дискретную без потери информации о входном сигнале. *Материалы и методы.* Представлен подход к построению интегрирующего преобразователя измеряемого напряжения во временной интервал, в котором интегрирование происходит в течение всего времени преобразования входного сигнала. Новизна подхода заключается в исключении траты времени на служебные сигналы сброса (или обнуления) напряжения на накопительном конденсаторе за счет использования управляемого генератора линейно изменяющегося напряжения на двух операционных усилителях и возможности непосредственного измерения двухполярного входного сигнала. *Результаты.* Представлены: принципиальная электрическая схема преобразователя; математическая модель преобразования входного сигнала во временной интервал; рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя; методика схемотехнического построения преобразователя. *Выводы.* Использование рассмотренной методики позволяет осуществить интегрирование входного сигнала без потери времени на служебные сигналы. Результаты могут использоваться для построения интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для широкого применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

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

Для цитирования: Ватутин М. А., Ефимов В. П., Борматов Е. В., Зубков А. В. Методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины во временной интервал // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 16–22. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

THE METHODOLOGY OF CIRCUIT CONSTRUCTION OF THE ANALOG VALUE CONVERTER IN THE TIMEFRAME

M.A. Vatutin¹, V.P. Efimov², E.V. Bormatov³, A.V. Zubkov⁴

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

¹ vatutinm@mail.ru, ^{2,3,4} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Most modern digital voltmeters use an analog-to-digital converter (ADC) of the time-pulse type with two-stage integration, which takes place in two stages – integration and counting. During the counting, in accordance with the principle of operation of the converter, the input information is not received in the ADC and is lost. The aim is to develop a technique for converting an analog quantity into a discrete one without losing information about

the input signal. *Materials and methods.* An approach to the construction of an integrating converter of the measured voltage in a time and interval in which integration occurs during the entire time of the input signal conversion is presented. The novelty of the approach is to eliminate the waste of time on service signals for resetting (or zeroing) the voltage on the storage capacitor, due to the use of a controlled generator of linearly varying voltage on two op-amps, and the possibility of direct measurement of the bipolar input signal. *Results.* A technique for the circuit design of an analog magnitude converter in a time interval is proposed, which allows the conversion of a bipolar input signal without additional circuit elements. The following are presented: a schematic electrical diagram of the converter; a mathematical model of converting the input signal into a time interval; recommendations for obtaining a digital code at the output of the converter; a method of circuit design of the converter. *Conclusions.* The use of the considered technique makes it possible to integrate the input signal without losing time to perform transformations on service signals. The results can be used to build integrating ADCs for wide application in industrial devices and in other fields of science and technology.

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

For citation: Vatutin M.A., Efimov V.P., Bormatov E.V., Zubkov A.V. The methodology of circuit construction of the analog value converter in the timeframe. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):16–22. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

Введение

В цифровых системах автоматического управления аналого-цифровые преобразователи (АЦП) используются для сопряжения датчиков различных физических величин непрерывного действия [1] (температуры, давления, линейных или угловых перемещений, напряжений, токов и др.) с цифровой управляющей машиной (ЦВМ). В системах контроля АЦП применяются для реализации цифровых способов передачи, обработки и регистрации информации.

В подавляющем большинстве случаев измеряемая аналоговая физическая величина преобразуется в цифровой код опосредованно, а именно: вначале она тем или иным способом преобразуется в напряжение, а затем АЦП, представляющий собой самостоятельное устройство, преобразует этот сигнал в двоичный код. Именно поэтому наиболее распространенными типами АЦП являются преобразователи «напряжение–код».

В различной измерительной технике широко применяются последовательные АЦП [2–4]. Недостаток последовательных АЦП – низкая помехоустойчивость результатов преобразования. Действительно, выборка мгновенного значения входного напряжения обычно включает слагаемое в виде мгновенного значения помехи. В дальнейшем при цифровой обработке последовательности выборок эта составляющая может быть подавлена, однако на это требуется время и дополнительные вычислительные ресурсы. Действенной мерой по снижению влияния различного рода импульсных помех является применение интегрирующих аналого-цифровых преобразователей. В этих АЦП входной сигнал интегрируется на определенном временном интервале, длительность которого обычно выбирается кратной периоду помехи. Это позволяет во многих случаях подавить помеху еще на этапе преобразования. Платой за это является пониженное быстродействие интегрирующих АЦП.

В большинстве современных цифровых вольтметров используется АЦП времяимпульсного типа с двухэтапным интегрированием [2–6]. Преобразование проходит две стадии – интегрирования (t_1) и счета (t_2) (рис. 1).

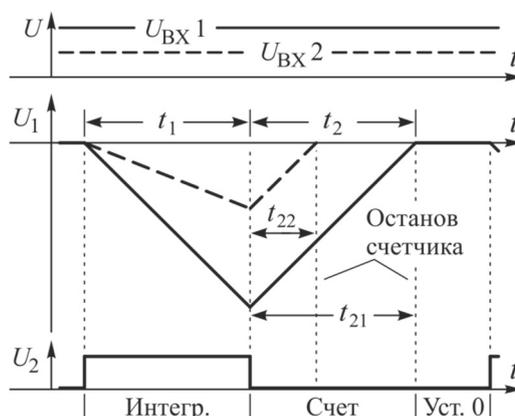


Рис. 1. Временные диаграммы работы АЦП двухтактного интегрирования

На интервале времени t_1 осуществляется интегрирование входного (измеряемого) сигнала. Время t_1 интегрирования входного напряжения постоянно. На интервале t_2 осуществляется преобразование измеренного сигнала в код.

Недостатками этих АЦП являются следующие обстоятельства: во-первых, время интегрирования входного сигнала в цикле преобразования занимает только приблизительно третью часть – две трети цикла преобразователь не принимает входной сигнал, что приводит к потере информации об измеряемом сигнале в течение этого времени и ухудшает преобразовательные свойства интегрирующего АЦП; во-вторых, время преобразования зависит от величины измеряемого напряжения; в-третьих, АЦП многотактного интегрирования должен быть снабжен довольно большим количеством внешних резисторов и конденсаторов с высококачественным диэлектриком, что значительно увеличивает место, занимаемое преобразователем на плате и, как следствие, усиливает влияние помех и увеличивает стоимость изделия.

Анализ работы генератора линейно изменяющегося напряжения

Операционный усилитель (ОУ) широко применяется и в импульсных электронных устройствах [2, 4, 7, 8]. При этом в полной мере используются такие положительные свойства ОУ, как малые дрейфы, высокий и собственный коэффициент усиления, позволяющие получить высокую стабильность работы импульсного устройства.

На рис. 2 показана принципиальная схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) на двух ОУ с входом управления V_x . Упр.

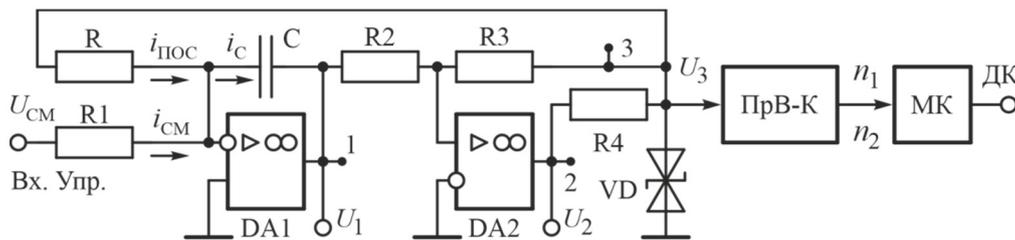


Рис. 2. ГЛИН на ОУ с дополнительным входом управления U_{CM}

На рис. 1 обозначено: $i_{ПЭС}$ – ток положительной обратной связи генератора; i_{CM} – ток смещения, обеспечивающий управление скважностью генератора.

Автоколебательный ГЛИН состоит из двух основных частей – интегратора на ОУ $DA1$ и неинвертирующего триггера Шмитта на ОУ $DA2$. Диаграмма работы ГЛИН на двух ОУ показана на рис. 3.

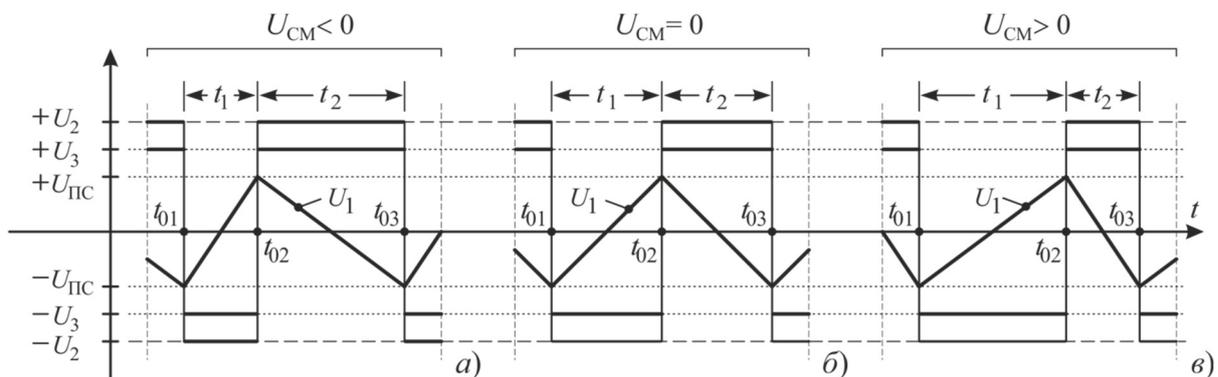


Рис. 3. Диаграмма работы ГЛИН при отсутствии и наличии напряжения смещения

Период колебаний T разделен на два временных интервала t_1 и t_2 ($T = t_1 + t_2$). Ток заряда конденсатора C равен сумме токов $i_C = i_{ПЭС} + i_{CM}$. Ток смещения является случайной величиной, так как это – входной измеряемый сигнал. Ток положительной обратной связи имеет значение $i_{ПЭС} = U_3/R$. Перезаряд конденсатора происходит в пределах значений напряжения порога срабатывания от $-U_{ПС}$ до $+U_{ПС}$, на одну и ту же постоянную величину напряжения $2|U_{ПС}|$. Значение напряжения $U_{ПС}$ определяется как $U_{ПС} = U_3 \cdot (R_2/R_3)$.

Для стабилизации напряжения U_3 , подаваемого на резистор R , в схеме, показанной на рис. 2, введен источник опорного напряжения $U_{\text{ОП}}$ (ИОН) – двухполярный параметрический стабилизатор напряжения [9, 10] на двуханодном стабилитроне VD и резисторе R_4 , который формирует напряжение $U_3 = U_{\text{ИОН}}$. При этом $-|U_3| < |U_2|$.

Математическая модель преобразователя аналоговой величины во временной интервал

В общем виде выражение для выходного напряжения ГЛИН $U_1 = u_C(t)$ [5, 6]

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} i_C(t) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} i_C(t) dt \right) = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} (i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} (-i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt \right) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_{\text{СМ}}(t) dt. \tag{5}$$

Графически выражение (5) можно представить так, как показано на рис. 3.

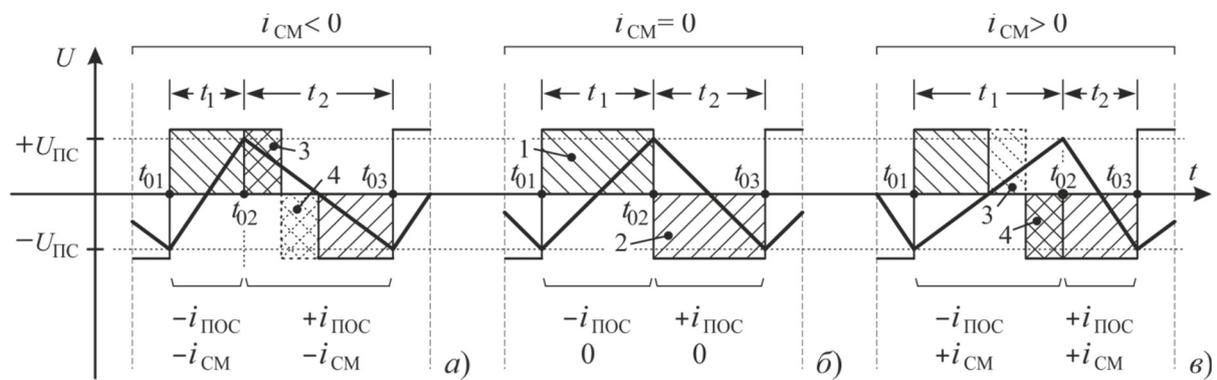


Рис. 3. Диаграмма работы ГЛИН при отсутствии и наличии тока смещения

Площади прямоугольников, обозначенных «1» и «2», формируются током положительной обратной связи $i_{\text{ПОС}}$. Площади прямоугольников, обозначенных «3» и «4», формируются током смещения $i_{\text{СМ}}$.

На рис. 3,а показано, что при отрицательной полярности тока смещения $-i_{\text{СМ}}$ временной интервал t_1 формирует сумма токов $|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|$, а временной интервал t_2 формирует разность токов $|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|$ и при этом $t_1 < t_2$. На рис. 3,в показано, что при положительной полярности тока смещения $+i_{\text{СМ}}$ временной интервал t_1 формирует разность токов $|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|$, а временной интервал t_2 формирует сумма токов $|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|$ и при этом $t_1 > t_2$. На рис. 3,б показано, что при $|i_{\text{СМ}}| = 0$ временные интервалы t_1 формируются только током $i_{\text{ПОС}}$ и при этом $t_1 = t_2$.

Примем, что период колебаний ГЛИН равный $T = t_1 + t_2$ значительно меньше времени изменения тока смещения $i_{\text{СМ}}$: $i_{\text{СМ}} = \text{const}$. Тогда сумма этих токов на интервале времени T также будет иметь постоянную величину $i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}} = \text{const}$.

Для случая, когда $i_C = \text{const}$, напряжение на конденсаторе C [11]

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} i_C(t) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} i_C(t) dt \right) \Bigg|_{i_C = \text{const}} = \frac{i_C}{C} (t_1 + t_2). \tag{6}$$

Анализируя диаграммы работы ГЛИН, показанные на рис. 3, и выражение (6), получаем временные интервалы t_1 и t_2

$$t_1 = \frac{2u_{\text{ОП}}C}{|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|}; t_2 = \frac{2u_{\text{ОП}}C}{|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|}. \tag{7}$$

Так как измеряемая физическая величина – ток $i_{\text{СМ}}$ – находится в знаменателе выражения (7), то линейное изменение тока смещения $i_{\text{СМ}}$ приводит к нелинейному изменению значения временного интервала t_1 (t_2).

Учитывая, что числители ($2u_{\text{ОПС}}$) в выражении (7) для t_1 и t_2 равны между собой, произведем преобразования выражений (7)

$$\begin{aligned} t_1(i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}) &= t_2(i_{\text{ПОС}} - i_{\text{СМ}}) \Rightarrow t_1 i_{\text{ПОС}} + t_1 i_{\text{СМ}} = t_2 i_{\text{ПОС}} - t_2 i_{\text{СМ}} \Rightarrow \\ \Rightarrow t_1 i_{\text{ПОС}} - t_2 i_{\text{ПОС}} &= -t_1 i_{\text{СМ}} - t_2 i_{\text{СМ}} \Rightarrow i_{\text{ПОС}}(t_1 - t_2) = -i_{\text{СМ}}(t_1 + t_2). \end{aligned}$$

После преобразования выражений (7) относительно тока $i_{\text{СМ}}$ получаем

$$i_{\text{СМ}} = -i_{\text{ПОС}} \frac{(t_1 - t_2)}{T} = i_{\text{ПОС}} \frac{(t_2 - t_1)}{T}. \quad (8)$$

Входное напряжение, соответственно, будет определяться как

$$U_{\text{СМ}} = R i_{\text{СМ}} = R i_{\text{ПОС}} \frac{(t_2 - t_1)}{T}. \quad (9)$$

Напряжение смещения $U_{\text{СМ}}$ по своей сути является входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$: $U_{\text{СМ}} = U_{\text{ВХ}}$. Левый по схеме вывод резистора $R1$ является входной клеммой преобразователя аналоговой величины во временной интервал.

Рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя

Для окончательного получения на выходе преобразователя информации в цифровом виде временные интервалы t_1 и t_2 преобразуются в количество импульсов n_1 и n_2 в устройстве преобразования время–код ПрВ-К и в вычислительном устройстве МК выполняется алгебраическая операция [5, 6, 12]

$$K_{\text{П}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} = K_{\text{П}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{N}, \quad (10)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пропорциональности, алгоритмически учитывающий неточности установки номинальных значений сопротивления резисторов ГЛИН, уровень пороговых напряжений и др.; $N = n_1 + n_2$.

В конечном итоге входное напряжение будет определяться как

$$U_{\text{ВХ}} = R1 \cdot i_{\text{ПОС}} \cdot K_{\text{ПР}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{N}, \quad (11)$$

и интегрирование входного сигнала будет происходить в течение всего времени преобразования входного сигнала без потери времени на служебные сигналы сброса (или обнуления) напряжения на накопительном конденсаторе.

Методика схемотехнического построения преобразователя напряжение–временной интервал

Методика схемотехнического построения преобразователя напряжение–временной интервал включает в себя следующие действия:

- 1) использование в качестве объекта модернизации интегрирующего АЦП;
- 2) использование генератора линейно изменяющегося сигнала на двух ОУ в качестве непрерывного интегратора;
- 3) перевод ГЛИН в управляемый режим работы для получения временных интервалов t_1 и t_2 , значения которых зависят от значения входного управляющего сигнала;
- 4) разработка математической модели преобразователя аналоговой величины во временной интервал на базе ГЛИНа;
- 5) выдача рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя аналоговой величины во временной интервал.

Заключение

Использование рассмотренной методики позволяет осуществить интегрирование входного сигнала без потери времени на служебные сигналы. Указанная методика может быть использована для конструирования широкого круга измерительных приборов, в которых необходимо осуществить преобразование аналоговой величины в цифровой код.

Список литературы

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2 кн. М. : Мир, 1992.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М. : Додэка-XXI, 2005. 528 с.
3. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник / подгот. Г. И. Волович, В. Б. Ежов. М. : Додэка-XXI, 2005. 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. М. : Додэка-XXI, 2008. 942 с.
5. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.
6. Слепова С. В. Основы теории точности измерительных приборов : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.
7. Операционные усилители и компараторы : справочник. М. : Додэка-XXI, 2001. Т. 12.
8. Картер Р., Манчини Р. Операционные усилители для всех : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2016. 528 с.
9. Линден Т. Харрисон. Источники опорного напряжения и тока : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2015. 576 с.
10. Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А. [и др.]. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43–46.
11. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Машиностроение, 1978. 831 с.
12. Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5

References

1. Ash Zh. *Datchiki izmeritel'nykh sistem: v 2 kn. = Sensors of measuring systems : in 2 books*. Moscow: Mir, 1992. (In Russ.)
2. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv = Circuitry of analog and analog-digital electronic devices*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:528. (In Russ.)
3. Volovich G.I., Ezhov V.B. (prepared). *Mikroskhemy ATsP i TsAP: spravochnik = ADC and DAC micro-circuits : handbook*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:432. (In Russ.)
4. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: per. s nem. = Semiconductor circuitry : trans. from German*. Moscow: Dodeka-XXI, 2008:942. (In Russ.)
5. Dushin E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)
6. Slepova S.V. *Osnovy teorii tochnosti izmeritel'nykh priborov: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of accuracy of measuring instruments : textbook*. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2008:192. (In Russ.)
7. *Operatsionnye usiliteli i komparatory: spravochnik = Operational amplifiers and comparators : handbook*. Moscow: Dodeka-XXI, 2001;12. (In Russ.)
8. Karter R., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vsekh: per. s angl. = Operational amplifiers for all : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2016:528. (In Russ.)
9. Linden T. Kharrison. *Istochniki opornogo napryazheniya i toka: per. s angl. = Sources of reference voltage and current : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2015:576. (In Russ.)
10. Luchko S.V., Baluev S.Yu., Vatutin M.A. et al. Precision parameters of a nonlinear link for an auto-oscillatory accelerometer. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2013; 56(12):43–46. (In Russ.)
11. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov = Handbook of Mathematics for scientists and engineers*. Moscow: Mashinostroenie, 1978:831. (In Russ.)
12. Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with a semiconductor sensing element. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5

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

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

Mikhail A. Vatutin

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

Виталий Петрович Ефимов

младший научный сотрудник лаборатории
Военного института
(научно-исследовательского),
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vitaliy P. Efimov

Junior researcher at the laboratory
of the Military Institute (Research Institute),
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Евгений Витальевич Борматов

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

Evgeny V. Bormatov

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

Антон Викторович Зубков

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

Anton V. Zubkov

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

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

Поступила в редакцию/Received 26.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 26.06.2023

Принята к публикации/Accepted 24.07.2023

УДК 629.7.017
doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-3

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ВАРИАНТА КОМПЛЕКТОВАНИЯ СОСТАВА ВЫЕЗДНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП С УЧЕТОМ РИСКОВ

А. С. Ефремов¹, С. В. Пузанков²

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важной составляющей метрологического обеспечения технических систем является поверка средств измерений. Процедура поверки средств измерений может осуществляться в местах их эксплуатации выездными метрологическими группами с применением подвижных поверочных лабораторий и комплексов. Для более эффективного решения задач метрологического обслуживания необходима оценка рисков, влияющих на работу выездной метрологической группы. Актуальность темы обусловлена важностью задач в принятии решений комплектования выездных метрологических групп в условиях неопределенностей различного рода. Целью работы является идентификация и анализ факторов риска, которые влияют на результативность метрологического обслуживания. *Материалы и методы.* Исследования основываются на использовании теории вероятностей и математической статистики, теории надежности и квалиметрии применительно к задачам оценки эффективности функционирования выездных метрологических групп. *Результаты.* Рассмотрен состав показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости для оценки эффективности деятельности выездных метрологических групп. Приведено описание задачи определения параметров выездных метрологических групп в условиях обеспечения приемлемого уровня риска. Представлен анализ источников опасных событий и их влияние на результативность метрологического обслуживания. *Вывод.* С использованием рассмотренного подхода может быть определен ряд рациональных или оптимальных вариантов организации деятельности выездных метрологических групп в составе ведомственных метрологических служб в условиях неопределенности ситуации.

Ключевые слова: метрологическое обслуживание, выездная метрологическая группа, средства измерений, результативность, риск

Для цитирования: Ефремов А. С., Пузанков С. В. Подход к обоснованию варианта комплектования состава выездных метрологических групп с учетом рисков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 23–32. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-3

APPROACH TO THE SUBSTANTIATION OF THE OPTION OF COMPOSITION OF THE METROLOGICAL OFFICE GROUPS IN CONSIDERING RISKS

A.S. Efremov¹, S.V. Puzankov²

^{1,2} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia
^{1,2} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* An important component of the metrological support of technical systems is the verification of measuring instruments. The procedure for verification of measuring instruments can be carried out in the places of their operation by visiting metrological groups using mobile verification laboratories and complexes. To more effectively solve the problems of metrological services, it is necessary to assess the risks that affect the work of the field metrological group. The relevance of the topic is due to the importance of tasks in making decisions on the acquisition of field metrological groups under conditions of various kinds of uncertainties. The aim of the work is to identify and analyze risk factors that affect the effectiveness of metrological services. *Materials and methods.* Research is based on the use of probability theory and mathematical statistics, reliability theory and qualimetry in relation to the tasks of evaluating the effectiveness of the functioning of field metrological groups. *Results.* The composition of indicators of effectiveness, efficiency and resource intensity for evaluating the effectiveness of the activity of field metrological groups is considered. The description of the task of determining the parameters of field metrological groups under the conditions of ensuring

an acceptable level of risk is given. An analysis of the sources of hazardous events and their impact on the effectiveness of metrological services is presented. *Conclusion.* Using the considered approach, a number of rational or optimal options for organizing the activities of visiting metrological groups as part of departmental metrological services in the conditions of an uncertain situation can be determined.

Keywords: metrological service, visiting metrological group, measuring instruments, efficiency, risk

For citation: Efremov A.S., Puzankov S.V. Approach to the substantiation of the option of composition of the metrological office groups in considering risks. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):23–32. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-3

Введение

В Федеральном законе № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений» установлены обязательные метрологические требования к измерениям в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Для подтверждения соответствия метрологическим требованиям и обеспечения установленного уровня метрологической надежности средств измерений (СИ) проводится совокупность мероприятий по метрологическому обслуживанию СИ. В состав мероприятий метрологического обслуживания СИ могут входить такие работы и операции, как поверка СИ, аттестация рабочих эталонов, калибровка СИ, не подвергаемых поверке, текущий ремонт СИ, а также при необходимости контроль метрологических характеристик СИ в период между очередными поверками.

Поверка СИ, аттестация рабочих эталонов и другие работы по обеспечению единства измерений выполняются силами аккредитованных организаций, входящих в структуру государственной и ведомственных метрологических служб. Метрологическое обслуживание СИ может осуществляться как в стационарных подразделениях метрологических служб, так и непосредственно в местах эксплуатации СИ выездными метрологическими группами (ВМГ) с применением подвижных поверочных лабораторий и комплексов.

При планировании работ по метрологическому обслуживанию СИ, обосновании состава и порядка функционирования поверочных подразделений ведомственных метрологических служб, при организации работ ВМГ необходим учет множества внешних и внутренних факторов, которые создают неопределенность в отношении достижения поставленных целей. Такой учет может быть реализован на основе применения риск-ориентированного подхода (ГОСТ Р ИСО 9100-2015 «Системы менеджмента качества. Требования», ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» и ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска»).

Постановка задачи

В целях сокращения временных и материальных затрат, а также обеспечения возможности обслуживания СИ, встроенных и входящих в состав технических объектов и систем, метрологическое обслуживание СИ может проводиться непосредственно в местах их применения по назначению (использования).

Работа ВМГ организуется, как правило, в соответствии с планом, определяющим виды, объемы, места и сроки выполнения работ по метрологическому обслуживанию. Для выполнения планируемого объема работ ВМГ комплектуются необходимым составом специалистов, оснащаются средствами поверки, вспомогательными устройствами и оборудованием, необходимой документацией и размещаются, как правило, на базе подвижных лабораторий измерительной техники (ПЛИТ).

В обобщенном виде содержание деятельности ВМГ состоит в выполнении некоторых видов и объемов работ с использованием временных, материальных и иных ресурсов. Исходя из этого, деятельность ВМГ можно характеризовать показателем Y технико-экономической эффективности функционирования [1, 2], включающим показатели результативности, оперативности и ресурсоемкости:

$$Y = (Y_P, Y_T, Y_C), \quad (1)$$

где Y_P – показатели результативности, характеризующие степень достижения целевого (полезного) эффекта функционирования ВМГ; Y_T – показатели оперативности, характеризующие

временные составляющие процессов функционирования ВМГ и метрологического обслуживания СИ; Y_C – показатели ресурсоемкости, характеризующие затраты ресурсов различных видов на оснащение и функционирование ВМГ (посредством пересчета могут быть сведены к экономическим (стоимостным) показателям).

Достижимые значения технико-экономических показателей зависят как от внутренних – структурно-функциональных параметров ВМГ, так и от внешних параметров, включающих параметры совокупности обслуживаемых объектов и параметры условий выполнения работ:

$$Y_i = f(X, O, Z), \quad (2)$$

где Y_i – обобщенное обозначение частного показателя, $i = \overline{1, I}$; X – вектор структурно-функциональных параметров ВМГ (типы транспортных средств, области аккредитации, количество специалистов, количество и типы рабочих мест, интенсивности обслуживания и пр.); O – вектор параметров объектов обслуживания (число и типы обслуживаемых средств, характеристики потоков заявок на обслуживание и пр.); Z – вектор параметров условий выполнения работ.

При организации и планировании работ ВМГ становится важной задача определения такого состава структурно-функциональных параметров ВМГ X^* , при котором обеспечивались бы требуемые значения выбранных технико-экономических показателей Y_i .

При этом планируемые виды, объемы и сроки выполнения работ по метрологическому обслуживанию предполагаются заданными, а условия выполнения работ – предположительно известными и удовлетворяющими имеющимся требованиям. В зависимости от имеющейся системы предпочтений задача выбора параметров ВМГ по совокупности показателей может быть сформулирована с использованием различных критериев.

Однако следует учесть, что реализация даже хорошо спланированных работ сопровождается множеством неопределенностей различного рода, так или иначе влияющих на возможность достижения поставленных целей. Исходя из этого, с позиции риск-менеджмента постановку задачи определения параметров ВМГ следует дополнить условием обеспечения приемлемого уровня риска [3]. В обобщенном формализованном виде такую задачу можно представить в виде

$$\begin{aligned} X^* : Y_i(X^*, O, Z) \in \{Y_i^{\text{доп}}\}, \\ R_j \leq R_j^{\text{доп}}, j = \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Y_i и $\{Y_i^{\text{доп}}\}$ – значения определяемых частных показателей и множества их допустимых значений соответственно; R_j и $R_j^{\text{доп}}$ – уровень риска j -го типа и допустимый (приемлемый) уровень риска j -го типа соответственно.

Поэтому при решении задачи определения параметров ВМГ X^* необходима оценка рисков для их учета и последующего управления ими для снижения количества и последствий опасных и неблагоприятных факторов или их нейтрализации.

Оценка рисков

Неопределенность в общем случае характеризует состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и их вероятностей. Под риском понимается следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей. Применительно к рассматриваемой задаче под следствием влияния неопределенности будем понимать негативное отклонение от ожидаемого результата или события. 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.

Оценка риска является частью процесса менеджмента риска и представляет собой процесс, охватывающий идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска.

Идентификация рисков предполагает определение перечня источников риска и описание событий и последствий рисков, которые могут помешать достижению целей. Поэтому для идентификации рисков следует вначале определить цели создания и функционирования ВМГ.

Цель ВМГ состоит в качественном выполнении за установленный интервал времени некоторого запланированного объема работ по метрологическому обслуживанию СИ различных типов. Планируемые объемы работ на рассматриваемый период обычно определены потребностями обслуживаемых объектов и заведомо должны соответствовать потенциальной производительности ВМГ. Однако в силу тех или иных случайных факторов и причин, фактически достигаемый результат деятельности становится случайным, а результат работ может отличаться от запланированного. Поэтому в качестве показателя результативности ВМГ, характеризующего степень достижения цели запланированной деятельности, возможно использовать соотношение между фактическими результативными и плановыми объемами работ по метрологическому обслуживанию [4].

Если в составе метрологического обслуживания можно выделить K видов относительно единообразных работ, и целевые показатели определены по каждому виду работ отдельно, то результативность работы ВМГ можно характеризовать вектором показателей $Y_p = Y_{p1}, \dots, Y_{pk}, \dots, Y_{pK}$, $k=1, \overline{K}$, компоненты которого характеризуют результативность по каждому виду работ и могут быть определены соотношением

$$Y_{pk} = \frac{N_{pk}(T_{пл})}{N_{ok}(T_{пл})} = \frac{K_{yk} K_{тик} P_{pk} n_{фk} \mu_k}{n_{ok} \lambda_k}, \quad (4)$$

где $N_{ok}(T_{пл})$ – запланированный на интервал времени $T_{пл}$ объем работ k -го вида; $N_{pk}(T_{пл})$ – объем качественно выполненных (результативных) работ k -го вида за время $T_{пл}$; n_{ok} и λ_k – изначально планируемое количество работ и интенсивность потока заявок на выполнение работ соответственно; $n_{фk}$ и μ_k – фактическое количество заявок на выполнение работ и интенсивность выполнения работ соответственно; K_{yk} – коэффициент укомплектованности рабочих мест для выполнения работ; $K_{тик}$ – коэффициент технического использования рабочих мест для выполнения работ; P_{pk} – вероятность правильного (результативного) выполнения работ вида (определяется ошибками 1-го и 2-го рода).

В случае, если частные задачи по метрологическому обслуживанию подчинены единой цели и вклад (важность) каждого вида выполняемых работ может быть определен с помощью коэффициентов весомости m_k ($\sum m_k = 1, k=1, \overline{K}$), то обобщенный показатель результативности можно определить в виде

$$Y_p = \sum_{k=1}^K m_k \frac{N_{pk}(T_{пл})}{N_{ok}(T_{пл})} = \sum_{k=1}^K m_k Y_{pk}. \quad (5)$$

Введенный показатель результативности характеризует удельную долю выполненных работ, определяемую с учетом фактического числа заявок, укомплектованности, технической готовности средств, а также правильности выполнения работ.

Для определения величины ущерба будем полагать, что ущерб отсутствует, когда результаты работ полностью соответствуют плану, в противном случае – зависит от объема невыполненных работ, т.е. от разности между плановым и фактически выполненным результативным объемом работ по метрологическому обслуживанию. Если некоторой установленной единице работ каждого вида по метрологическому обслуживанию поставлен в соответствие размер ущерба u_k , то ущерб U_k от неполного выполнения работ k -го вида за интервал времени $T_{пл}$ может быть определен из соотношения

$$U_k = u_k (N_{ok}(T_{пл}) - N_{pk}(T_{пл})) = u_k (1 - Y_{pk}) N_{ok}(T_{пл}). \quad (6)$$

Суммарная величина ущерба от неполного выполнения всех видов работ может быть определена для случая равноразмерных единиц ущерба каждого вида с учетом важности работ по формуле

$$U = \sum_{k=1}^K m_k U_k. \quad (7)$$

Как видно из приведенных соотношений, в общем случае несоответствие результата работ ВМГ поставленной цели, приводящее к появлению ущерба, обусловлено неполным соответствием фактических возможностей ВМГ (оснащенности, готовности, производительности и пр.) в реальных условиях функционирования фактическим характеристикам (типам и интенсивностям) потоков заявок на метрологическое обслуживание.

Для выявления возможных источников рисков проведем вначале идентификацию рисков на качественном уровне, для чего проанализируем факторы внутренней и внешней среды (причины, события и последствия) и их возможные влияния на достижение целей функционирования ВМГ.

Источники неопределенностей целесообразно сгруппировать в соответствии со структурой параметров анализируемой системы: свойства и характеристики самих ВМГ, параметры объектов обслуживания, условия выполнения работ.

Неопределенность параметров ВМГ может выразиться в непредвиденном изменении характеристик транспортной базы, персонала, системы измерений (рабочих мест поверки), системы обеспечения, состоящей из подсистемы жизнеобеспечения и электропитания (табл. 1).

Таблица 1

Неопределенность параметров ВМГ

Объекты риска	Типовые риски	Возможные последствия, влияющие на результативность
1	2	3
Транспортное средство	Техническая неисправность	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение времени следования ВМГ • Отсутствие возможности прибытия ВМГ • Невыполнение запланированного объема работ
	Транспортная доступность	
ДТП		
Водитель	Временная нетрудоспособность	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение времени выполнения работ • Невыполнение запланированного объема работ
	Полная потеря трудоспособности	
Начальник ВМГ, поверитель (сотрудник ВМГ)	<ul style="list-style-type: none"> Временная нетрудоспособность Полная потеря трудоспособности 	
Рабочие места по поверке СИ	Метрологический отказ	<ul style="list-style-type: none"> • Перегрузки и отказы в обслуживании • Снижение вероятности результативного выполнения работ • Увеличение времени выполнения работ • Невыполнение запланированного объема работ • Снижение производительности рабочих мест
	Технический отказ	
ПЭВМ со специализированным программным обеспечением	Выход из строя системы в целом	<ul style="list-style-type: none"> • Невыполнение запланированного объема или увеличение времени выполнения работ • Невыполнение запланированного объема работ по видам измерений • Увеличение времени выполнения работ • Увеличение времени подготовки отчетных документов
	Отказ, сбой ПО	
	Отказ орг. техники	
Подсистема жизнеобеспечения (фильтровентиляционная установка, кондиционер, отопительно-вентиляционная установка)	Технический отказ	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение времени выполнения работ • Увеличение вероятности ошибок • Проявление нестабильности метрологических характеристик СИ и РЭ • Появление дополнительных погрешностей

Окончание табл. 1

1	2	3
Подсистема автономного электропитания	Технический отказ	<ul style="list-style-type: none"> Отсутствие возможности проведения метрологического обслуживания СИ, требующего электропитания Увеличение времени выполнения работ
	Отсутствие топлива	
	Разрядка АКБ	
Промышленные сети	Отсутствие возможности подключения	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение расхода ресурсов Отсутствие возможности проведения метрологического обслуживания СИ Увеличение времени выполнения работ
	Технический отказ	
	Временное отключение	
	Перебой в обеспечении ресурсами	

Неопределенность параметров объектов на различных этапах метрологического обслуживания может состоять в непредвиденном изменении характеристик потоков заявок на обслуживание, причем как в части видов и объемов работ, так и в части интенсивностей потоков заявок и сроков поступления заявок (табл. 2).

Таблица 2

Неопределенность параметров объектов обслуживания
на различных этапах метрологического обслуживания

Этапы	Типовые риски	Возможные последствия, влияющие на результативность
Поступление и прием СИ	Некомплектность СИ, представленного на поверку	<ul style="list-style-type: none"> Несоблюдение графика работ Невыполнение запланированного объема работ Изменение интенсивности потока заявок на обслуживание
	Представление СИ не в запланированное время	
	Несоответствие областей аккредитации ВМГ представленным видам СИ	
Обеспечение условий выполнения работ	Несоответствие требованиям выделенных и оборудованных помещений (мест) для размещения и работы ВМГ	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение времени выполнения работ Уменьшение вероятности результативного выполнения работ Отсутствие возможности проведения метрологического обслуживания СИ Невыполнение запланированного объема работ
	Отсутствие личного состава, необходимого для оказания помощи специалистам ВМГ	
	Отсутствие вспомогательного оборудования для проведения работ	
Процесс метрологического обслуживания	Представление на обслуживание СИ, отсутствующих в плане работ	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение времени выполнения работ Увеличение количества работ Увеличение интенсивности потока заявок на обслуживание
	Выявление в ходе работ дополнительных видов и объемов работ	

Неопределенность условий выполнения работ заключается в возможном изменении целого ряда эксплуатационных факторов, которые по источнику их возникновения можно разделить на две большие группы: естественные и искусственные (табл. 3).

Проведенный на качественном уровне анализ чувствительности позволил установить характер влияния изменений рассматриваемых факторов на параметры процесса функционирования ВМГ, что влечет изменение значений показателей результативности.

Анализ рисков является следующим этапом оценки рисков, выполняется на основе проведенной идентификации и требует применения, в том числе и количественных методов. Количественная мера риска определяется из закона распределения ущерба, а в качестве меры риска используются показатели, учитывающие характеристики закона распределения ущерба – вероятности появления и размеры ущерба.

Таблица 3

Неопределенность условий выполнения работ

Вид факторов риска	Типовые риски	Условия проявления	Возможные последствия, влияющие на результативность
Естественные			<ul style="list-style-type: none"> • Появление дополнительных погрешностей • Возрастание вероятности технических отказов • Возрастание вероятности метрологических отказов • Увеличение времени выполнения работ • Уменьшение объема результативных работ • Снижение коэффициента технического использования средств поверки • Возрастание вероятности возникновения ошибок
Климатические	Нарушение герметичности изделий	При нарушении условий хранения, перевозки и эксплуатации СИ	
Атмосферное давление	Нарушение герметичности и разрушений деталей; расслоение и растрескивание покрытий; появление утечки наполнителей		
Температурная среда			
Влажность	Ускорение процессов коррозии материалов; гидролиз; повреждение изделий	При работе в необорудованных или не предусмотренных для этого помещениях	
Среда с коррозионно-активными агентами	Расслоение и растрескивание покрытий деталей		
Атмосферное осадки	Резкое ускорение процессов коррозии материалов		
Пыль (песок)	Изменение режима теплообмена; коррозия и механические повреждения	В определенных географических районах, при нарушении условий хранения, перевозки и эксплуатации СИ	
Биологические (грибы, плесень, бактерии)	Химическое разложение материалов и потеря свойств конструктивных элементов и деталей	При нарушении условий хранения, перевозки и эксплуатации СИ	
Сейсмические удары	Износ прочности конструкций; механические повреждения	В сейсмически активных районах	
Искусственные			
Механические (статические, динамические)	Деформация изделий; нарушение герметичности и разрушение деталей; расслоение и растрескивание покрытий; разупрочнение и разрушение твердых материалов	При нарушении правил размещения СИ при перевозке и эксплуатации, невыполнении мер защиты с помощью амортизаторов и демпферов	
Термические	Снижение механических характеристик элементов; частичное поверхностное разрушение покрытий; набухание и усадка уплотнителей	При нарушении условий теплового режима работы СИ на который они рассчитаны	
Электромагнитные	Нарушение стабильности оптических и теплофизических характеристик материалов; нарушение или нестабильность функционирования элементов и деталей	При нарушении экранирования, несоблюдение правил расположения СИ	

Данные о вероятности событий и их последствиях используют для определения уровня риска. В зависимости от целей исследований и используемой системы предпочтений степень риска при определении параметров ВМГ может оцениваться на основе использования различных показателей качества, и в первую очередь – через показатели результативности и ущерба, непосредственно характеризующие степень достижения основной цели.

При определении параметров ВМГ следует выполнять поиск наилучшего или приемлемого решения на множестве допустимых вариантов в условиях неопределенности.

На множестве возможных значений частных параметров ВМГ X в их допустимых сочетаниях может быть сформировано конечное число N решений – вариантов построения ВМГ $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$. А на множестве возможных значений параметров обслуживаемых объектов O и условий работ Z может быть сформировано конечное число M вариантов внешней по отношению к ВМГ среды S_1, S_2, \dots, S_M , отражающих возможные реальные ситуации, характеризующиеся значениями влияющих факторов.

В этом случае множество возможных исходов результатов деятельности ВМГ можно характеризовать матрицей результативности вида

$$Y_{P_{\{N,M\}}} = \begin{bmatrix} Y_{P11} \dots Y_{P1m} \dots Y_{P1M} \\ \dots \dots Y_{Pnm} \dots \dots \\ Y_{PN1} \dots \dots \dots Y_{PNM} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

компоненты Y_{Pnm} которой характеризуют результативность ВМГ при n -м варианте параметров ВМГ и m -м варианте реальной ситуации.

Аналогичным образом можно построить матрицу ущербов

$$U_{P_{\{N,M\}}} = \begin{bmatrix} U_{11} \dots U_{1m} \dots U_{1M} \\ \dots \dots U_{nm} \dots \dots \\ U_{N1} \dots \dots \dots U_{NM} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

компоненты U_{nm} которой характеризуют размер ущерба при n -м варианте параметров ВМГ и m -м варианте ситуации.

В качестве меры риска каждый вариант построения ВМГ можно характеризовать математическим ожиданием ущерба R_U , определяемым по формуле

$$R_U = U_{cp} = \sum_{m=1}^M P_m U_m, \quad (10)$$

где P_m – вероятность наступления события, приводящего к получению ущерба размером U_m , ($m = \overline{1, M}$); M – общее число возможных ситуаций, которые могут иметь место, включая и ситуации с нулевым ущербом.

Для оценки степени риска целесообразно использовать величину среднеквадратического отклонения риска

$$\sigma_U = \sqrt{\sum_{m=1}^M (U_m - U_{cp})^2 P_m}, \quad (11)$$

а также коэффициент вариации риска:

$$K_U = \frac{\sigma_U}{R_U}. \quad (12)$$

Чем больше среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации, тем больше степень неопределенности, и тем выше риск [5].

Также степень риска можно оценить через вариацию параметров результативности функционирования ВМГ: как отношение среднеквадратичного отклонения показателя результативности к средневзвешенному по вероятности событий значению показателя результативности. Кроме того, уровень риска также можно характеризовать и временными показателями, оценивая возможные превышения плановых сроков выполнения работ по метрологическому обслуживанию. Также риск возможно оценивать на основе анализа изменений ресурсных или стоимостных показателей в зависимости от рассматриваемых факторов и событий.

Достаточно сложной и ответственной задачей при оценке рисков является определение вероятностей возникновения событий и ситуаций, влияющих на достижение целей и приводящих к появлению ущерба. Для оценки вероятностей отдельных опасных событий могут быть применены различные подходы: использование статистических данных, аналитический анализ зависимости состояния системы и процесса функционирования от соответствующих факторов; использование экспертных оценок [6, 7].

Проведенный анализ источников опасных событий при функционировании ВМГ показал, что состав влияющих факторов достаточно многочислен, кроме того, ряд событий и факторов оказываются взаимозависимыми. Это существенно затрудняет перебор всех возможных ситуаций и их сочетаний, а также делает проблематичным достоверное определение вероятностей. Поэтому применительно к рассматриваемой задаче для оценивания уровня рисков представляется возможным использование сценарного подхода и смешанных методов определения вероятностей реализации сценариев. При этом необходимо экспертным методом сформировать множество сценариев S , каждый из которых характеризовал бы некоторое сочетание состояний факторов, влияющих на достижение целей функционирования ВМГ. Число таких сценариев должно быть обзримым, но достаточным, чтобы в совокупности охватить все наиболее вероятные варианты сочетаний событий. В качестве варианта возможно использование всего трех сценариев – базового, пессимистического и оптимистического.

В каждом из сценариев экспертами устанавливаются значения влияющих факторов, а также производится экспертная оценка вероятностей каждого сценария. В случае полной неопределенности в части определения вероятностей сценариев может быть использовано правило равновероятности Лапласа [6], когда предполагается, что все варианты развития реальной ситуации равновероятны. После этого по каждому сценарию производится расчет показателей, характеризующих степень достижения цели, после чего производится оценка степени риска через среднюю величину риска и коэффициент вариации.

Сравнительная оценка риска включает в себя сопоставление полученного уровня риска с некоторыми установленными границами в соответствии с принятыми критериями риска. В качестве критерия могут использоваться различные правила, например, установление одного граничного уровня, разделяющего риск на допустимый и недопустимый (т.е. требующий обработки). Возможно также применение двух граничных уровней и, соответственно, деление рисков на три группы: однозначно допустимый, однозначно недопустимый, а также средний уровень риска, относительно которого принятие решения требует дальнейшей проработки возможных способов обработки риска и соотнесения преимуществ и недостатков.

Выбор варианта оснащения ВМГ Π^* в условиях неопределенности может быть произведен на основе критерия минимума среднего ущерба при ограничениях на значения показателей результативности, временных и стоимостных показателей, а также на уровень приемлемого риска:

$$\begin{aligned} \Pi^* &= \operatorname{argmin}_{\Pi^i \in \{\Pi_n^{\text{доп}}\}} \{R_{U_n}\}, n = \overline{1, N}; \\ Y_i &\in \{Y_i^{\text{доп}}\}; \\ R_U &\leq R_U^{\text{доп}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Решение задачи по выбору варианта комплектования ВМГ в условиях неопределенности предполагается рассмотреть в последующих работах.

Заключение

Оценка риска является основой для определения степени приемлемости риска и принятия решений относительно необходимости учета риска. Детальная идентификация и анализ рисков позволяют установить причинно-следственные связи между изменениями влияющих факторов, опасными событиями и их последствиями, что является источником информации для выбора методов учета риска.

Приведенные результаты могут быть использованы при оценке рисков в принятии решений по комплектованию ВМГ, выборе рациональных или оптимальных вариантов организации деятельности выездных метрологических групп в составе ведомственных метрологических служб.

Список литературы

1. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 502 с.
2. 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

3. 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.
4. Бессонов Е. И., Бессонов П. Е., Чагин Д. А., Шестопалова О. Л. Интеллектуальное управление риском при эксплуатации сложных технологических систем : моногр. / под ред. А. Н. Миронова. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2008. 523 с.
5. Щеглов Д. М. Применение риск-ориентированного подхода к оценке влияния погрешности измерений параметров объекта на эффективность его испытаний // Вестник метролога. 2019. № 2. С. 15–19.
6. Гурнович Т. Г., Остапенко Е. А., Молчаненко С. А. Оценка и анализ рисков : учебник / под общ. ред. Т. Г. Гурнович. М. : КНОРУС, 2019. 252 с.
7. Восканян А. А., Кострикина И. А. Методика оценки рисков деятельности по поверке средств измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 51–57. doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-7

References

1. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremlynykh system = Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems*. Moscow: AST, 2006:502. (In Russ.)
2. Efremov A.S., Vasyukovich D.S., Puzankov S.V. Evaluation 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
3. 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.)
4. Bessonov E.I., Bessonov P.E., Chagin D.A., Shestopalova O.L. *Intellektual'noe upravlenie riskom pri ekspluatatsii slozhnykh tekhnologicheskikh sistem: monogr. = Intelligent risk management in the operation of complex technological systems : monogr*. Saint Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhayskogo, 2008:523. (In Russ.)
5. Shcheglov D.M. Application of a risk-based approach to assessing the impact of the measurement error of the object parameters on the effectiveness of its tests. *Vestnik metrologa = Bulletin of the Metrologist*. 2019;(2):15–19. (In Russ.)
6. Gurnovich T.G., Ostapenko E.A., Molchanenko S.A. *Otsenka i analiz riskov: uchebnik = Risk assessment and analysis : textbook*. Moscow: KNORUS, 2019:252. (In Russ.)
7. Voskanyan A.A., Kostrikina I.A. Methodology for risk assessment of activities for verification of measuring instruments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):51–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-7

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Станиславович Ефремов

кандидат технических наук, доцент, 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

Andrey S. Efremov

Candidate of technical sciences, associate professor, lecturer of the sub-department of metrological support of armament, military and special equipment, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky (13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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, Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 29.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2023

Принята к публикации / Accepted 28.07.2023

СИММЕТРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ БИОИМПЕДАНСА

В. В. Антипенко¹, Е. А. Печерская², Д. В. Якушов³, О. В. Карпанин⁴

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

¹v.antipenko7@yandex.ru, ²pea1@list.tu, ³hammer.fate@yandex.ru, ⁴karpanino@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является симметричный источник тока для измерений биоимпеданса. Предметом исследования является определение путей возникновения погрешностей измерения биоимпеданса. Целью является разработка метода уменьшения паразитных утечек высокочастотного тока в процессе измерения биоимпеданса. *Материалы и методы.* Для определения источников возникновения погрешности измерений используется представление о путях прохождения паразитных токов утечки в землю. *Результаты.* Предложен метод устранения паразитного влияния тока утечки из объекта измерения в землю. В результате схема измерения биоимпеданса нечувствительна к любым видам токов утечки от объекта измерения в землю. *Выводы.* Предложенный симметричный источник тока для измерений биоимпеданса позволяет полностью устранить влияние паразитного тока утечки из объекта измерения в землю, что положительным образом влияет на точность и достоверность определения параметров тела человека.

Ключевые слова: биоимпеданс, ток, утечка, человек, измерение, погрешность, электроды

Для цитирования: Антипенко В. В., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Карпанин О. В. Симметричный источник тока для измерений биоимпеданса // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 33–38. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-4

SYMMETRICAL CURRENT SOURCE FOR BIOIMPEDANCE MEASUREMENTS

V.V. Antipenko¹, E.A. Pecherskaya², D.V. Yakushov³, O.V. Karpanin⁴

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

¹v.antipenko7@yandex.ru, ²pea1@list.tu, ³hammer.fate@yandex.ru, ⁴karpanino@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is a symmetrical current source for bioimpedance measurements. The subject of the study is to determine the ways of occurrence of errors in the measurement of bioimpedance. The aim is to develop a method for reducing parasitic leakage of high-frequency current in the process of bioimpedance measurement. *Materials and methods.* To determine the sources of measurement error, the idea of the paths of parasitic leakage currents into the ground is used. *Results.* A method is proposed to eliminate the parasitic effect of leakage current from the measuring object into the ground. As a result, the bioimpedance measurement circuit is insensitive to any types of leakage currents from the measuring object into the ground. *Conclusions.* The proposed symmetrical current source for bioimpedance measurements makes it possible to completely eliminate the influence of parasitic leakage current from the measuring object into the ground, which positively affects the accuracy and reliability of determining the parameters of the human body.

Keywords: bioimpedance, current, leakage, person, measurement, error, electrodes

For citation: Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Karpanin O.V. Symmetrical current source for bioimpedance measurements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3): 33–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-4

Введение

Биоимпедансный анализ – метод диагностики состава тела человека посредством измерения комплексного электрического сопротивления участков тела в разных частях организма. Данный метод диагностики позволяет неинвазивно на ранних стадиях определить патологические

процессы в организме и предпринять своевременное лечение [1]. В данный момент биоимпедансный анализ достаточно хорошо изучен, однако используется преимущественно как дополнение к основным видам медицинской диагностики [2]. Низкая достоверность результата обусловлена невозможностью обеспечить стабильность результата измерения, значительное влияние оказывает положение пациента, ориентация в пространстве и т.д. [3]. Целью является повышение стабильности измерения биоимпеданса за счет устранения влияния паразитных утечек тока.

Принцип измерения

В процессе измерения на объект подается высокочастотный стабильный ток через токовые электроды. Через потенциальные электроды измеряется падение напряжения на определенном участке тела человека. Фактически реализован четырехзондовый метод измерения сопротивления (рис. 1) [4, 5].

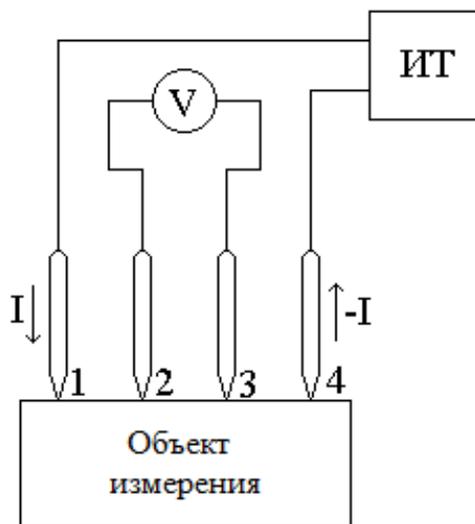


Рис. 1. Четырехзондовый метод измерения сопротивления:

ИТ – источник тока; V – вольтметр (дифференциальный усилитель);

I и 4 – токовые электроды; 2 и 3 – потенциальные электроды; I – прямой ток; $-I$ – возвратный ток

Частота тока меняется согласно установленной сетке частот и может составлять единицы мегагерц. В результате цикла измерения возможно получение зависимости напряжения от частоты, а также фазы измеренного сигнала от частоты. По двум характеристикам можно определить параметры эквивалентной модели человека (сопротивления, емкости), а уже исходя из них пересчитать биологические параметры [6, 7].

Пути утечки тока и их влияние на измерения

В реальности все окружающие нас объекты имеют паразитную емкость и сопротивление относительно земли [8]. В биоимпедансной измерительной системе участвуют объект измерения (человек), измерительный блок, в состав которого входит источник тока и дифференциальный усилитель, а также персональный компьютер, где отражается процесс и результат измерения. Все эти объекты имеют паразитные емкости и сопротивления утечки в землю. Кроме того, в большинстве бытовых приборов специально устанавливаются конденсаторы на землю для повышения безопасности эксплуатации приборов. При биоимпедансных измерениях на объект измерения подаются частоты вплоть до нескольких мегагерц и на этих частотах паразитные емкости становятся сравнимыми с емкостями эквивалентной модели человека, что приводит к увеличению погрешности измерений. Учесть данные паразитные емкости – задача нетривиальная, поэтому необходимо создать устройство, нечувствительное к такого рода утечкам [9]. С учетом паразитных емкостей утечки схема измерения примет вид, отображенный на рис. 2.

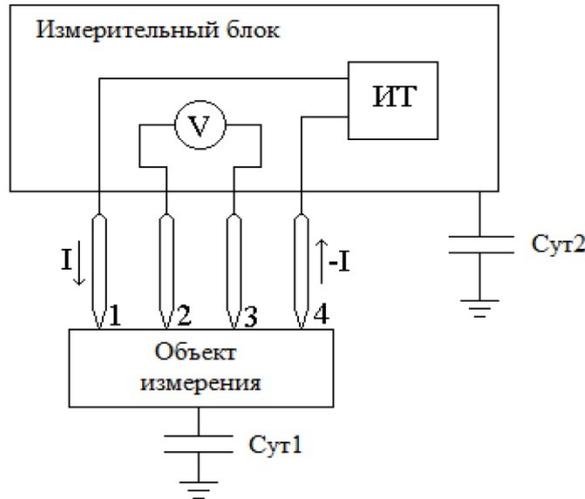


Рис. 2. Схема измерения с учетом емкостей утечки ($C_{ут1}$ и $C_{ут2}$)

В подавляющем большинстве в биоимпедансных измерителях используется «классический» источник тока на операционном усилителе, представленный на рис. 3, либо источник тока с заземленной нагрузкой.

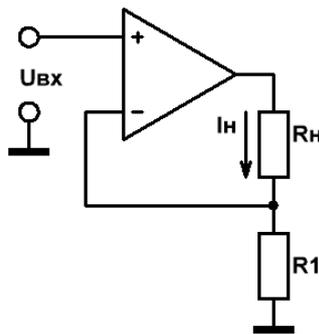


Рис. 3. «Классический» источник тока

В обоих вариантах источников тока подразумевается, что возвратный ток будет втекать в общую шину схемы. Поскольку, как правило, общая шина устройства имеет наибольшую паразитную емкость относительно земли (а зачастую эта емкость вводится искусственно для безопасности), то часть измерительного тока течет мимо объекта измерения в землю и возвращается обратно в измерительный блок (рис. 4).

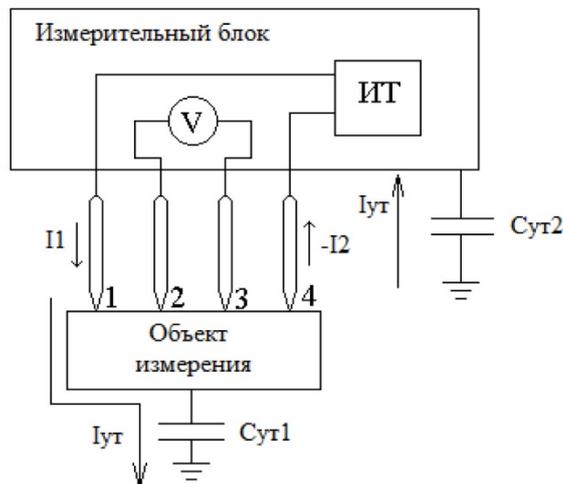


Рис. 4. Путь тока утечки

В таком случае втекающий в объект измерения ток (I_1) не равен вытекающему току ($-I_2$), что оказывает сильное влияние на точность измерения падения напряжения. Паразитные емкости имеют нестабильный характер и могут зависеть от положения человека в пространстве, а также иметь частотную зависимость [10].

Устранение влияния тока утечки на результат измерения

Для устранения паразитного влияния тока утечки необходимо применить симметричный источник тока. В таком источнике тока напряжение на положительном токовом электроде равно напряжению на отрицательном токовом электроде со знаком минус. Происходит инверсия напряжения на отрицательном токовом электроде. Это легко достигается введением дополнительного операционного усилителя в схему, который будет инвертировать напряжение на положительном токовом электроде, а на его выход подключается отрицательный токовый электрод. В результате при симметричном подключении человека к схеме измерения (рука–рука, нога–нога) и горизонтальном его расположении удастся почти устранить влияние паразитного тока утечки на результат измерения. При таком подключении объект измерения можно представить в виде Т-образной схемы (рис. 5).

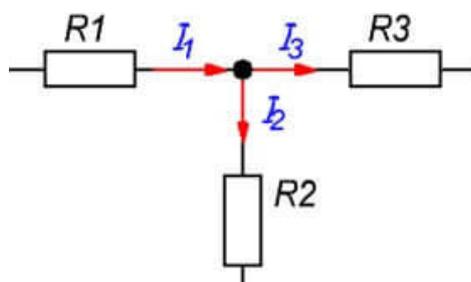


Рис. 5. Упрощенная модель измерений

На рис. 5 резисторы R_1 и R_3 – комплексные сопротивления левой и правой части объекта измерения, а резистор R_2 – комплексное сопротивление утечки. При равенстве R_1 и R_3 и применении симметричного источника тока значение сопротивления R_2 не оказывает влияния на падение напряжения на резисторах R_1 и R_3 согласно закону Кирхгофа, а значит, повышается стабильность и точность измерений.

В случае наиболее распространенного подключения рука–нога удастся также добиться значительного снижения погрешности измерения за счет применения симметричного источника тока. Это обусловлено тем, что минимальное сопротивление и максимальные утечки у человека в области туловища и объект измерения можно также представить в виде Т-образной схемы, хотя и менее идеальной. Путь протекания измерительного тока в случае подключения рука–нога отражен на рис. 6.

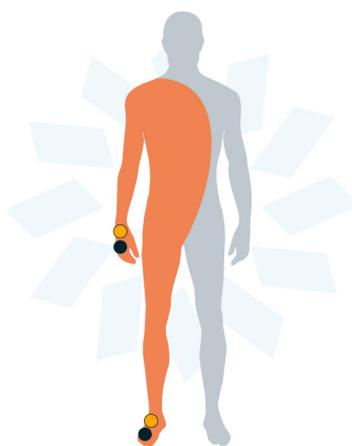


Рис. 6. Путь протекания тока рука-нога

Из рис. 6 видно, что чем шире область протекания тока, то тем ниже сопротивление участка тела, также наблюдается некоторая симметрия объекта измерения по отношению к электродам. При варьировании точек подключения электродов можно достичь наилучших результатов.

Заключение

Симметричный источник тока для измерений биоимпеданса в совокупности с горизонтальным расположением человека позволяет значительно уменьшить влияние тока утечки на результат измерения. Это обеспечивает высокую повторяемость результатов измерения и позволяет считать биоимпедансный анализ достоверным методом диагностики.

Список литературы

1. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review // *Biosystems engineering*. 2020. Vol. 197. P. 170–178.
2. Tronstad C., Strand-Amundsen R., Possibilities in the application of machine learning on bioimpedance time-series // *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2019. Vol. 10. P. 24–33.
3. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy // *Malawi Medical Journal*. 2017. Vol. 29. P. 155–159.
4. Антипенко В. В., Печерская Е. А., Левин А. И. [и др.]. Исследование взаимодействия электродов с тканью при биоимпедансной диагностике // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 2. С. 114–119.
5. Печерская Е. А., Антипенко В. В., Карпанин О. В. [и др.]. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 3. С. 78–84.
6. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O. et al. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1515 (5). P. 052075. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052075
7. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O. et al. Analysis of methodological errors in measuring a digital automated bio-impedance meter // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1695 (1). P. 012051. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012051
8. Антипенко В. В., Кульков В. Н., Печерская Е. А., Антипенко С. А. Разработка алгоритма функционирования системы для определения достижения эффекта трансмуральности // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 4. С. 92–100.
9. Антипенко В. В., Печерская Е. А., Антипенко С. А. Схема для одновременного измерения биоимпеданса кожи, восприимчивости и потенциала // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы*. Пенза, 2021. С. 270–272.
10. Levin A. I., Pecherskaya E. A., Varenik Yu. A. et al. Application of an automated complex resistance and phase difference measuring method for rheographic studies of human cardiovascular system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 2086 (1). P. 012113. doi: 10.1088/1742-6596/2086/1/012113

References

1. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review. *Biosystems engineering*. 2020;197:170–178.
2. Tronstad C., Strand-Amundsen R., Possibilities in the application of machine learning on bioimpedance time-series. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2019;10:24–33.
3. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy. *Malawi Medical Journal*. 2017;29:155–159.
4. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Levin A.I. et al. Metrological aspects of the automated method of measuring bioimpedance. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):114–119. (In Russ.)
5. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V. et al. Metrological aspects of the automated method of measuring bioimpedance. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(3):78–84. (In Russ.)
6. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. et al. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1515):052075. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052075
7. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. et al. Analysis of methodological errors in measuring a digital automated bio-impedance meter. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1695):012051. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012051

8. Antipenko V.V., Kul'kov V.N., Pecherskaya E.A., Antipenko S.A. Development of a system functioning algorithm to determine the achievement of the transmural effect. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(4):92–100. (In Russ.)
9. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Antipenko S.A. Scheme for simultaneous measurement of skin bioimpedance, susceptibility and potential. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy = Information technologies in science and education. Problems and prospects.* Penza, 2021: 270–272. (In Russ.)
10. Levin A.I., Pecherskaya E.A., Varenik Yu.A. et al. Application of an automated complex resistance and phase difference measuring method for rheographic studies of human cardiovascular system. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;(2086):012113. doi: 10.1088/1742-6596/2086/1/012113

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Викторович Антипенко

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: v.antipenko7@yandex.ru

Vladimir V. Antipenko

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Дмитрий Викторович Якушов

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

Dmitriy V. Yakushov

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

Олег Валентинович Карпанин

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

Oleg V. Karpanin

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

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

Поступила в редакцию / Received 05.06.2023

Поступила после рецензирования / Revised 03.07.2023

Принята к публикации / Accepted 07.08.2023

УДК 681.5.017
doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-5

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В РЕЖИМЕ С ОБОСТРЕНИЕМ

Д. В. Артамонов¹, В. М. Мыскин², А. Д. Семенов³

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

² Научно-производственная фирма «Круг», Пенза, Россия

¹ dva@pnzgu.ru, ² myskin.vlad97@gmail.com, ³ sad-50@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данной разработки обусловлена научной популярностью развития применения нейронных сетей и интеллектуальных технологий в промышленности и низкой эффективностью современных систем противоаварийных защит, которые имеют существенные недостатки, основные из которых - «пропуск цели» и «ложная тревога». Целью данной работы, является повышение безопасности и технико-экономической эффективности существующих систем контроля и управления, на основе методов теории развивающихся процессов с обострением. *Материалы и методы.* В рамках выполнения данной исследования были использованы методы современной теории автоматического управления, методы индетификации технологических объектов и методы компьютерного моделирования. *Результаты.* Проведён анализ аварийных ситуаций, развивающихся в режиме с обострением, характерной особенностью которых является степенной закон развития и три стадии развития аварии. Проведено прогнозирование аварийной ситуации в системе температурного контроля электрогенератора с использованием метода скользящей линеаризации, позволяющей установить начало её возникновения и выделить все три стадии развития аварии. *Вывод.* Для достижения поставленных целей необходимо совершенствовать современные систем противоаварийных защит. Предлагается рассматривать развитие аварии, как развивающийся процесс с обострением. Для анализа предлагается использовать методы скользящей линеаризации реальных временных рядов, с последующим прогнозированием развития аварий.

Ключевые слова: авария, аварийная ситуация, режим с обострением, скользящая линеаризация

Для цитирования: Артамонов Д. В., Мыскин В. М., Семенов А. Д. Анализ аварийных ситуаций, развивающихся в режиме с обострением // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 39–47. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-5

ANALYSIS OF EMERGENCY SITUATIONS DEVELOPING IN THE MODE WITH AGGRAVATION

D.V. Artamonov¹, V.M. Myskin², A.D. Semenov³

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

² Scientific and production company "Krug", Penza, Russia

¹ dva@pnzgu.ru, ² myskin.vlad97@gmail.com, ³ sad-50@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this development is due to the scientific popularity of the development of the use of neural networks and intelligent technologies in industry and the low efficiency of modern emergency protection systems, which have significant drawbacks, the main of which are "missing the target" and "false alarm". The purpose of this work is to improve the safety and technical and economic efficiency of existing control and management systems, based on the methods of the theory of developing processes with aggravation. *Materials and methods.* Within the framework of this study, methods of modern theory of automatic control, methods of identification of technological objects and methods of computer modeling were used. *Results.* The analysis of emergency situations developing in the mode with aggravation, the characteristic feature of which is the power law of development and three stages of accident development. The prediction of an emergency situation in the temperature control system of an electric generator was carried out using the method of sliding linearization, which allows to establish the beginning of its occurrence and to distinguish all three stages of the accident development. *Conclusion.* To achieve these goals, it is necessary to improve modern emergency protection systems. It is proposed to consider the development of the accident as a developing process with aggravation. For the analysis, it is proposed to use methods of sliding linearization of real time series, followed by forecasting the development of accidents.

Keywords: accident, emergency situation, mode with aggravation, sliding linearization

For citation: Artamonov D.V., Myskin V.M., Semenov A.D. Analysis of emergency situations developing in the mode with aggravation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):39–47. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-5

Введение

Известно, что возникновение аварий на технологических объектах наносит большой материальный ущерб как самим объектам, так и окружающей среде. Одной из мер, служащих для обеспечения безопасности взрывопожароопасных технологических процессов, предусматриваются автоматические системы противоаварийной защиты (ПАЗ). Практика эксплуатации таких систем показала, что при возникновении аварийной ситуации система ПАЗ, построенная на допусковом контроле, не всегда предотвращает возникновение аварии.

Согласно РФ ГОСТ Р 22.0.05–2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения», авария – опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей, и приводящее к разрушению или повреждению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, нанесению ущерба окружающей среде.

Возникновению аварии предшествует аварийная ситуация, представляющая собой сочетание опасных состояний (положений или условий существования и функционирования) объектов природно-техногенной сферы, определяющих переход из нормальной (штатной) обстановки или ситуации к аварийной, связанной с поражением объектов, человека и среды жизнедеятельности [1]. Аварийная ситуация является частью или показателем аварийной обстановки, когда превзойдены ее предельно допустимые границы и начинаются опасные обратимые или необратимые изменения параметров состояния объектов, человека (операторов, персонала, населения) и среды жизнедеятельности, приводящие к аварии.

Постановка задачи

В соответствии с введенным определением аварийную ситуацию, возникающую в некотором объекте или системе, можно рассматривать как процесс неограниченного роста во времени переменных системы, приводящего к возникновению аварии.

В качестве примера на рис. 1 приведено изменение показаний датчика радиальных вибраций турбины Саян-Шушенской ГЭС [2].

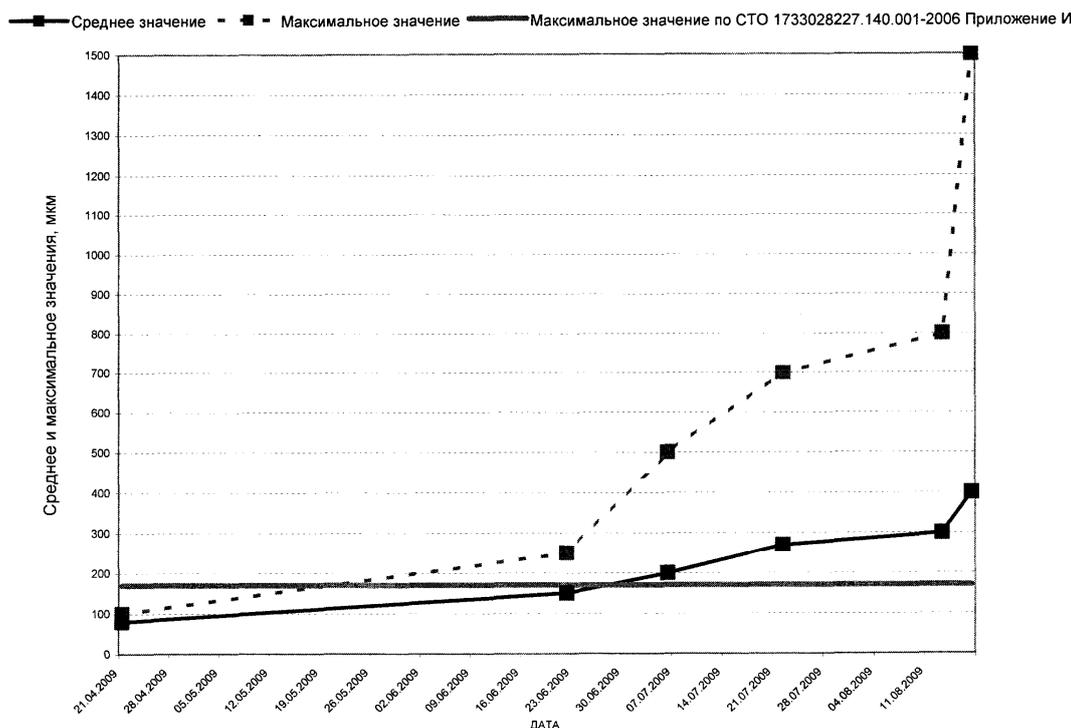


Рис. 1. Изменение показаний датчика радиальных вибраций турбины Саян-Шушенской ГЭС

Рост переменных системы в процессе ее развития присущ развивающимся системам [3]. Общим же для развивающихся процессов и систем (РПС) является степенной закон их развития [4].

Степенные законы часто встречаются в физике, биологии, науках о Земле и космосе, в экономике и финансах, информатике, демографии и прочих социальных науках. Например, степенным законам отвечают распределения размеров городов, силы землетрясений, вспышек на Солнце, размеры кратеров на Луне, масштабы военных конфликтов и богатство людей и пр.

Для степенного закона характерны три фазы развития [3]:

– в первой фазе развития скорость развития системы остается постоянной или увеличивается незначительно и линейно;

– во второй фазе развития скорость развития увеличивается и растет уже не линейно, но коэффициент нелинейного роста незначителен по величине, и общая картина изменений на этом этапе близка к линейной, хотя уже и заметно от нее отличается;

– на третьей фазе развития наблюдается резкое увеличение скорости, близкой к скорости роста геометрической прогрессии – так называемый экспоненциальный рост.

Переход системы на третью фазу развития в соответствии с теорией катастроф необратим и неизбежно приводит к аварии системы.

Заметим, что на рис. 1 четко видны все три фазы развития аварийной ситуации турбины Саяно-Шушенской ГЭС.

Относительно большая длительность первой и второй фазы развития аварийной ситуации и линейная скорость ее развития, в принципе, позволяют с высокой степенью надежности прогнозировать ее возникновение и развитие.

Математическая модель развития аварийной ситуации

Покажем, что развитие аварийной ситуации осуществляется по степенному закону и происходит в режиме с обострением.

Начиная с работ А. Н. Колмогорова, И. Г. Петровского, Г. С. Пискунова, А. Тюринга, И. Пригожина, Г. Хакена и других при моделировании явлений самоорганизации в различных системах часто используют математические модели, в основе которых лежат системы нелинейных параболических уравнений типа реакция–диффузия:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[C(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + Q(u), \quad (1)$$

где t – время; x – пространственная координата; u – это физические переменные системы (концентрация, температура, производительность и т.п.). Объемные источники и стоки в правой части могут толковаться как нелинейное влияние обратных связей в физических, биологических, экономических и других системах. В работах [5, 6] было показано, что нелинейные зависимости $C(u)$ и $Q(u)$ в уравнении (1) во многих случаях приводят к неограниченному возрастанию функции и за конечное время – режиму с обострением. Особенностью режимов с обострением (для одного уравнения вида (1)) является вырождение многих сложных нелинейных зависимостей $C(u)$ и $Q(u)$ в (1) в более простые виды зависимостей. В таких случаях на асимптотической стадии уравнение (1) можно заменить (в зависимости от вида $C(u)$ и $Q(u)$) на уравнение с экспоненциальными коэффициентами; уравнение со степенными коэффициентами и уравнение Гамильтона – Якоби. При этом только уравнения со степенными зависимостями обладают сложным спектром устойчивых (или метастабильных) динамических структур. Эти математические идеи и выводы были сформулированы в работе [7] в виде антропного принципа в синергетике – при развитии режимов с обострением только узкий класс моделей со степенными зависимостями для $C = C_0 u^\sigma$ и $Q = Q_0 u^\rho$, и только в определенном диапазоне значений σ , ρ может описывать эволюцию сложных систем с большим числом различных структур и форм организации.

Полагая среду, где развивается аварийная ситуация, однородной, перейдем к обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$\frac{du}{dt} = au^2 + bu + c, \quad (2)$$

где a , b и c – постоянные коэффициенты. Однородность среды делает инвариантным выбор точки отсчета, поэтому в уравнение (2) $b = c = 0$, тогда

$$\frac{du}{dt} = au^2. \quad (3)$$

Решение (3) имеет вид

$$u = \frac{1}{\frac{1}{u(0)} - at}, \quad (4)$$

$u(0)$ – начальное значение переменной u .

Переменная в уравнении (4) изменяется по степенному закону в режиме с обострением, поскольку за конечный отрезок времени:

$$\Delta t = \frac{1}{\frac{1}{au(0)}}, \quad \lim_{t \rightarrow \Delta t} u \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Анализ аварийной ситуации в системе температурного контроля электрогенератора

На рис. 2 показана система температурного контроля синхронного генератора типа ТФ-60-2УЗ.

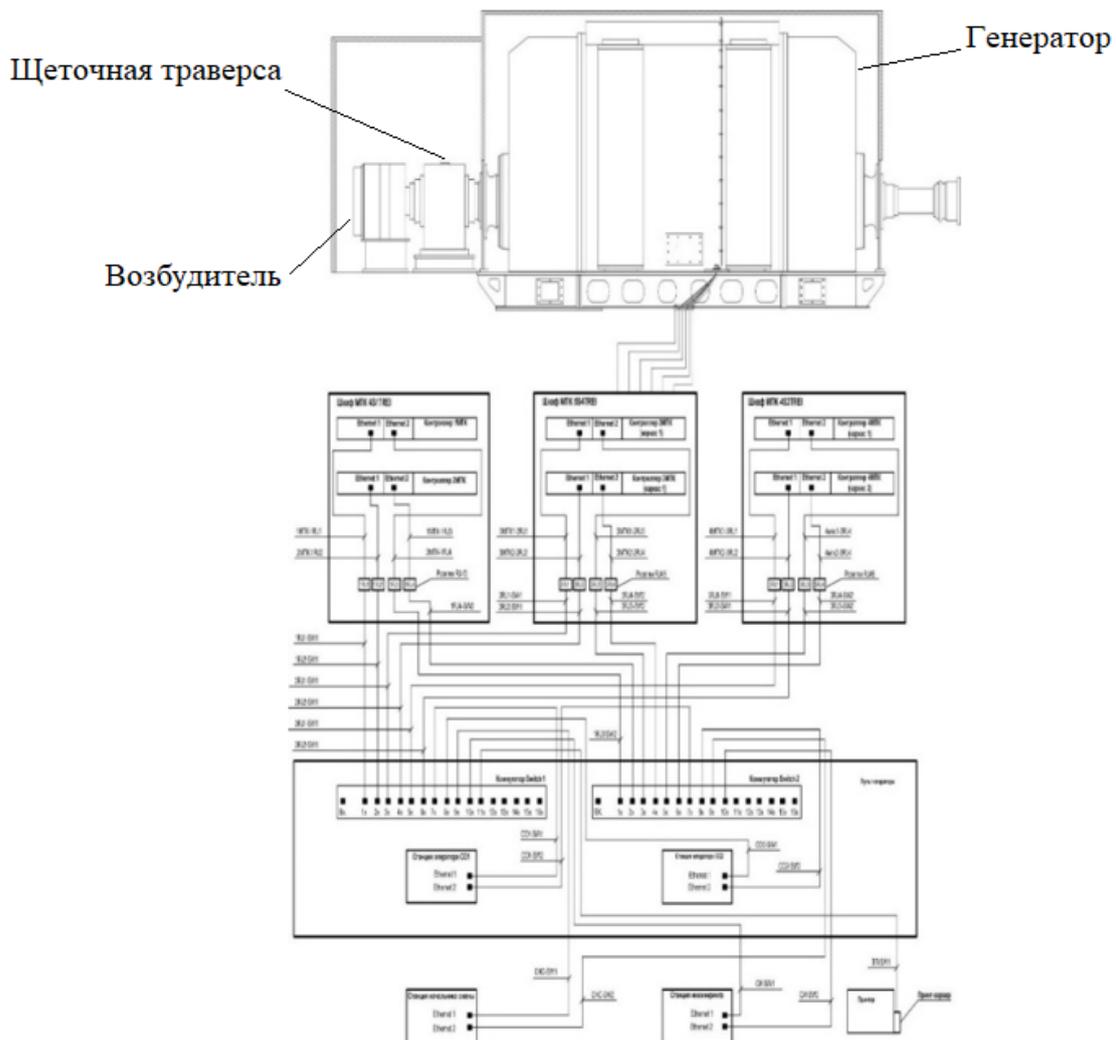


Рис. 2. Подсистема температурного контроля генератора

Система температурного контроля генератора выполнена на базе ПТК КРУГ, реализующего допускной алгоритм температурного контроля.

При контроле технологических параметров генератора должны соблюдаться следующие требования:

- периодичность измерения контролируемых параметров – 7 с;
- в нормальном режиме работы генератора должна быть обеспечена запись значений контролируемых параметров с интервалом 1 ч;
- при выходе любого контролируемого параметра за пределы допустимых значений и поступлении сигнала должна быть обеспечена автоматическая регистрация значений параметров с интервалом 1 мин;
- должен быть обеспечен вывод результатов измерений параметра и установки для осуществления визуального контроля его величины до возвращения ее в норму.

Если регистрируемые температуры превышают допустимые, то нагрузка генератора должна быть снижена до значения, при котором температуры не превышают допустимых, и при первой возможности генератор должен быть остановлен для выявления и устранения причин повышенного нагрева.

На рис. 3 представлено изменение температуры воздуха на выходе из щеточной траверсы при возникновении ее аварии, зарегистрированной системой контроля.

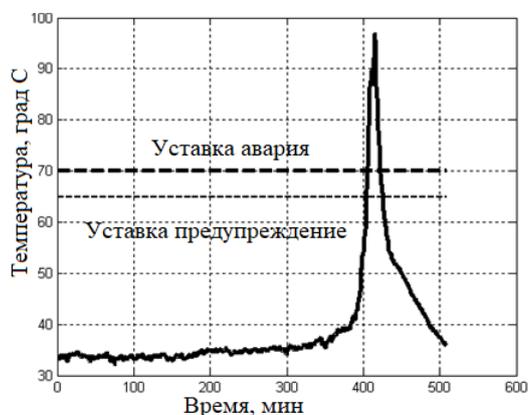


Рис. 3. Развитие аварии щеточной траверсы генератора

Для предотвращения ложных срабатываний системы противоаварийной защиты уставки предупредительной и аварийной сигнализации были заданы на уровне в 650 и 700 С. При таких уставках произошел «пропуск цели» и из-за сгорания щеточной траверсы произошла авария, в результате которой генератор на длительное время был выведен из строя.

Процесс изменения температуры воздуха на выходе щеточной траверсы, график которого показан на рис. 3, с полным основанием можно рассматривать как развивающийся процесс с обострением. Процесс развития аварии состоит из трех этапов, отмеченных на рис. 4.

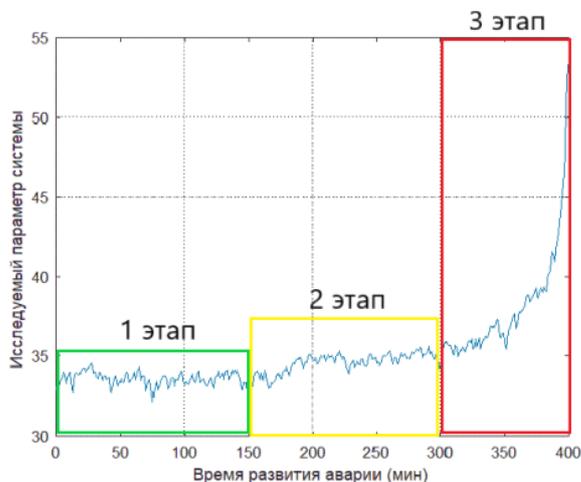


Рис. 4. Стадии развития аварии

Первый этап развития аварии – медленный количественный рост значений контролируемой переменной (температуры).

Второй этап – некоторое ускорение роста температуры.

Третий этап – резкое ускорение роста в режиме обострения, во время которого срабатывание системы предаварийной защиты уже не предотвращает аварии.

Резкое изменение контролируемой переменной на третьем этапе развития аварии делает неработоспособной систему допускового контроля, поскольку снижение уставок для обнаружения аварийной ситуации на втором этапе развития аварии приводит к «ложным тревогам», а желание устранить возникновение ложных тревог путем увеличения уровня уставок приводит к переходу системы на третий этап развития аварии и неизбежному «пропуску цели».

Аппроксимация кривых развития аварийной ситуации, приведенных на рис. 5 степенным законом в режиме с обострением [4], подтверждает обоснованность применения этого закона для анализа возникновения и развития аварийных ситуаций и возникновения аварии.

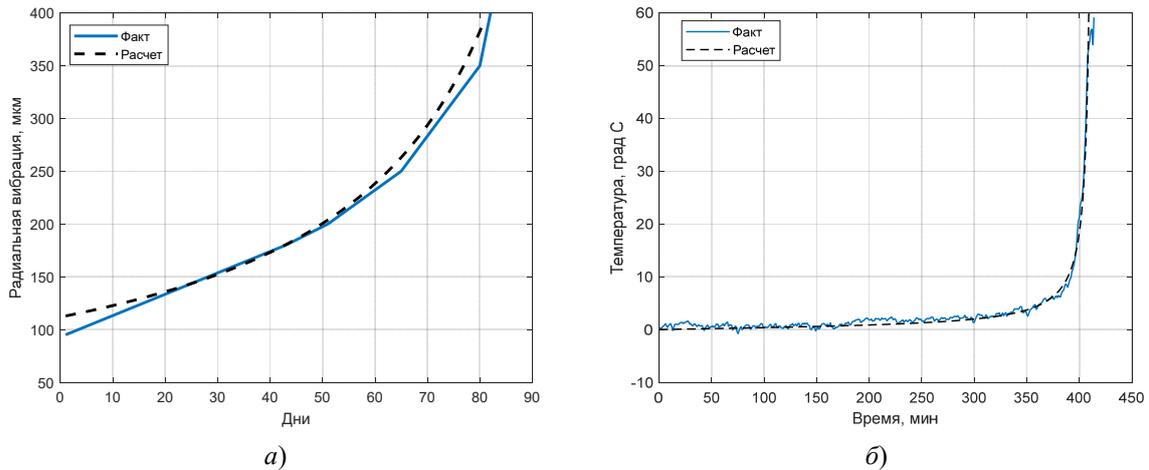


Рис. 5. Аппроксимация кривых развития аварии степенным законом:
а – генератор; б – щеточная траверса

Аппроксимация проводилась средствами MATLAB с использованием генетического алгоритма, минимизировался квадрат невязки:

$$\sum_{i=1}^n \left(u_i - \frac{1}{b - at_i} \right)^2 = \min. \quad (5)$$

Окно программы минимизации показано на рис. 6.

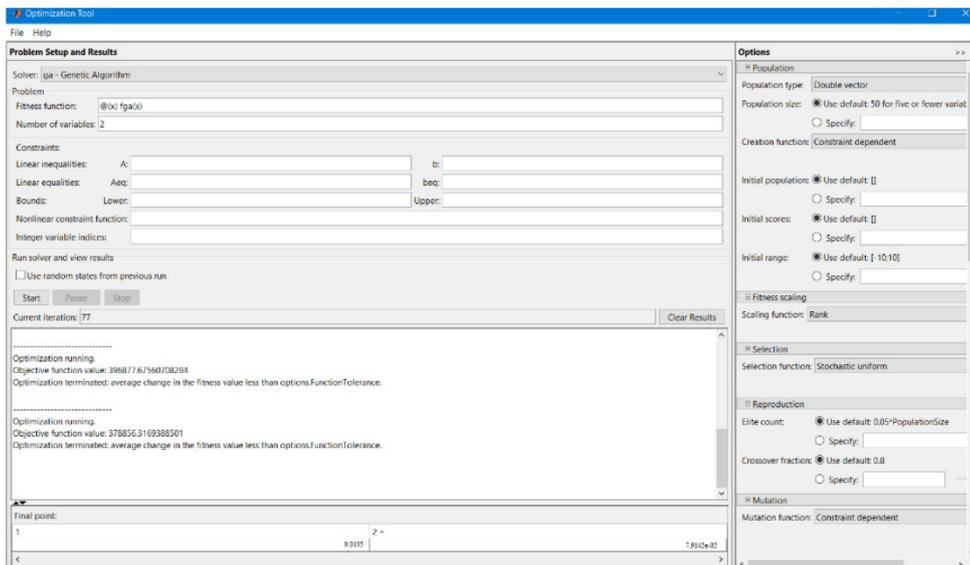


Рис. 6. Окно программы минимизации невязки

Прогнозирование аварийных ситуаций, развивающихся по степенному закону, в режиме с обострением

Как отмечается в работе [3], в первой и во второй фазе развития аварийной ситуации скорость развития близка к линейной. Это обстоятельство позволяет выявлять линейный закон изменения контролируемого параметра, используя алгоритм скользящей линеаризации. В соответствии с этим алгоритмом в исходном временном ряде $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ выделяется скользящее окно s_j длиной L $s_j = [x_j, x_{j+1}, \dots, x_{j+L}]$ и производится аппроксимация находящегося в окне отрезка временного ряда уравнением прямой $y = k_j x + b_j$. Очевидно, что по мере смещения окна вдоль временного ряда коэффициенты аппроксимирующей прямой будут изменяться, а их увеличение будет свидетельствовать о возникновении аварийного режима.

На рис. 7,а приведено изменение коэффициентов аппроксимирующей прямой, полученных в результате скользящей линеаризации временного ряда аварии, приведенного на рис. 7,б.

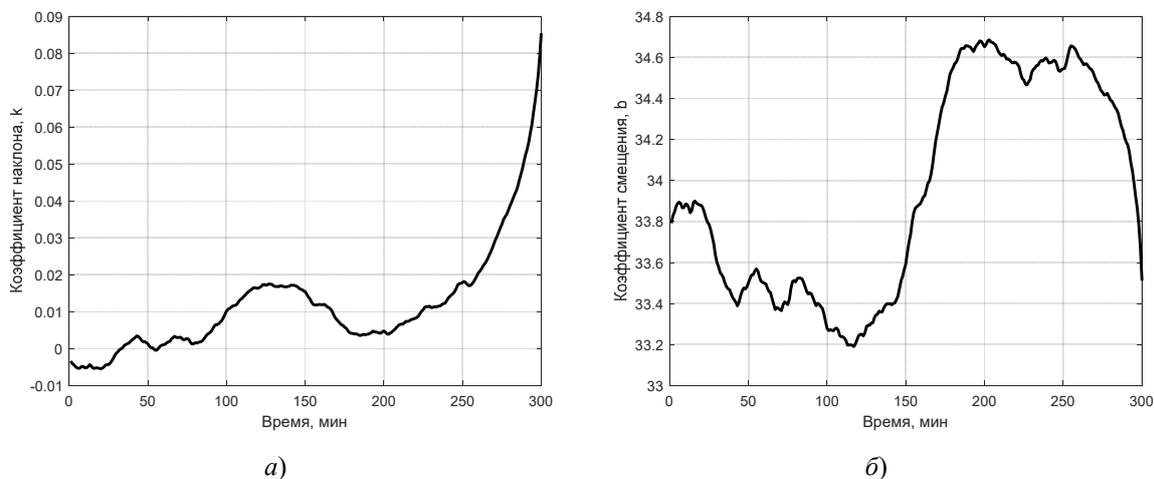


Рис. 7. Изменение коэффициентов аппроксимирующей прямой:
 а – изменение коэффициентов; б – временной ряд развития аварии

На рис. 8 изображена фазовая траектория изменения коэффициентов аппроксимирующей прямой, на которой четко видно все три этапа развития аварии.

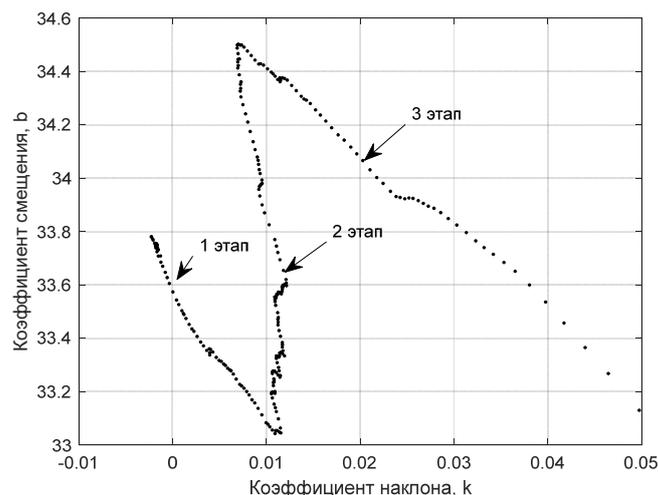


Рис. 8. Фазовая траектория изменения коэффициентов аппроксимирующей прямой

Заключение

1. Проведен анализ развития аварийной ситуации в системе температурного контроля электрогенератора, показано, что традиционные средства допускового контроля не обеспечивают надежной защиты. Стремление повысить надежность обнаружения аварийной ситуации путем

снижения уровня уставок допускового контроля приводит к частому возникновению «ложных тревог» при изменении режимов работы генератора, повышение уровня уставок для исключения «ложных тревог» приводит к недопустимым «пропускам цели».

2. Установлено что аварийная ситуация состоит из трех этапов, развивается в режиме с обострением и ее развитие происходит по степенному закону.

3. Возникновение аварийной ситуации предложено выявлять по методу скользящей линейаризации, позволяющей обнаружить все три этапа ее развития.

Список литературы

1. Аварийная ситуация. URL: <https://fireman.club/inseklodepia/avarijnaya-situaciya>.
2. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Александров В. В. Развивающиеся системы в науке, технике, обществе и культуре. СПб. : СПбГТУ, 2000. 244 с.
4. Hofstadter D. R. Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. N.Y. : Basic Books, 1979. 779 p.
5. Галактионов В. А., Самарский Д. А. Методы построения приближенных автомодельных решений нелинейных уравнений теплопроводности // Математический сборник. 1982. Т. 118, № 3. С. 222–322 ; Т. 121, № 2. С. 131–155.
6. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М. : Наука, 1987. 480 с.
7. Князева Е. Л., Курдюмов С. П. Антропный принцип в синергетике // Вопросы философии. 1997. № 3. С. 62–79.

References

1. *Avarijnaya situatsiya = Emergency situation.* (In Russ.). Available at: <https://fireman.club/inseklodepia/avarijnaya-situaciya>
2. *Avariya na Sayano-Shushenskoy GES = Accident at the Sayano-Shushenskaya HPP.* (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Aleksandrov V.V. *Razvivayushchiesya sistemy v nauke, tekhnike, obshchestve i kul'ture = Developing systems in science, technology, society and culture.* Saint Petersburg: SPbGTU, 2000:244. (In Russ.)
4. Hofstadter D.R. *Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid.* New York: Basic Books, 1979:779.
5. Galaktionov V.A., Samarskiy D.A. Methods for constructing approximate self-similar solutions of nonlinear heat conduction equations. *Matematicheskij sbornik = Mathematical collection.* 1982;118(3):222–322, 121(2):131–155. (In Russ.)
6. Samarskiy A.A., Galaktionov V.A., Kurdyumov S.P., Mikhaylov A.P. *Rezhimy e obostreniem v zadachakh dlya kvazilineynykh parabolicheskikh uravneniy = Modes with aggravation in problems for quasi-linear parabolic equations.* Moscow: Nauka, 1987:480. (In Russ.)
7. Knyazeva E.L., Kurdyumov S.P. The anthropic principle in synergetics. *Voprosy filosofii = Questions of philosophy.* 1997;(3):62–79. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Владимирович Артамонов

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

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector of the university,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Михайлович Мыскин

инженер по автоматизированным системам
управления технологическим процессом,
Научно-производственная фирма
«Круг» (Россия, г. Пенза, ул. Германа
Титова, 1); аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Краснова, 40)
E-mail: myskin.vlad97@gmail.com

Vladislav M. Myskin

Engineer for automated process control systems,
Scientific and production company "Krug"
(1 Germana Titova street, Penza, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анатолий Дмитриевич Семенов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Краснова, 40)
E-mail: sad-50@mail.ru

Anatoliy D. Semenov

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

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

Поступила в редакцию/Received 24.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2023

Принята к публикации/Accepted 24.07.2023

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.056

doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-6

МЕТОДИКА АНАЛИЗА БИОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ ГЕНОМНОЙ ПРИРОДЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ МУЛЬТИЭПИТОПНЫХ АНТИКОРОНАВИРУСНЫХ ВАКЦИН

М. В. Спринджук¹, А. С. Владыко², Чжочжуан Лу³, Л. П. Титов⁴, В. И. Берник⁵

¹ Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

^{2,4} Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии
Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Минск, Беларусь

³ Китайский центр по контролю и профилактике заболеваний, Пекин, Китай

⁵ Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

¹stepanenkomatvei@yandex.ru, ²vladuko@belriem.by, ³luzzbj@aliyun.com,

⁴leotit310@gmail.com, ⁵bernik@im.bas-net.by

Аннотация. *Актуальность и цели.* Коронавирусная эпидемия продолжается, однако есть свидетельства того, что обществом уже освоены эффективные меры профилактики и лечения этого заболевания. Нерешенными проблемами являются предупреждение, ранняя диагностика и своевременное лечение новых вирусных эпидемий, профилактика и лечение постковидных осложнений, смертность от которых проявляется латентно под маской других заболеваний и не попадает в статистику коронавирусной пандемии. *Материалы и методы.* На основе разработанной оригинальной методики анализа геномных данных коронавируса *in silico* протестированы модели антикоронавирусной мультиэпитопной вакцины. В серии вычислительных экспериментов получены доказательства их возможной эффективности и безопасности. *Результаты и выводы.* На основе научных экспериментов и анализа научной литературы сформулированы рекомендации для разработки и применения эпитопных противовирусных вакцин на примере антикоронавирусной вакцины.

Ключевые слова: системы медицинского назначения, отображение информации, программное обеспечение, алгоритмы, базы данных, геномика, транскриптомика, машинное обучение, искусственный интеллект, языки программирования, прикладная математика, биофизика, наука о данных, интеллектуальный анализ данных, коронавирус, эпидемия, пандемия, биоинформатика, иммуноинформатика, противовирусная терапия, вакцины, эпитопы

Финансирование: работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов: M21COVID-001 «Разработка и скрининг мукозной вакцины против COVID-19 на основе векторной платформы кишечного аденовируса», номер госрегистрации 20210889 от 26.04.2021; Ф21МН-001 «Математическое моделирование передачи и распространения COVID-19 инфекции на основе систем дифференциальных уравнений и алгоритмов обработки данных с применением технологии машинного обучения», номер госрегистрации 20213518 от 27.09.2021; M21КОВИД-026 «Ретроспективный анализ клинического и иммунологического статуса групп COVID-19 пациентов с сопутствующим туберкулезом и ВИЧ-инфекцией по данным РНПЦ пульмонологии и фтизиатрии г. Минска», номер госрегистрации 20210456 от 31.03.2021.

Для цитирования: Спринджук М. В., Владыко А. С., Чжочжуан Лу, Титов Л. П., Берник В. И. Методика анализа биоинформационных данных геномной природы для разработки моделей мультиэпитопных антикоронавирусных вакцин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 48–58. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-6

TECHNIQUE FOR THE ANALYSIS OF BIOINFORMATION DATA OF GENOMIC NATURE FOR THE DEVELOPMENT OF MULTIEPITOPE ANTICORONAVIRUS VACCINE MODELS

M.V. Sprindzuk¹, A.S. Vladyko², Zhuozhuang Lu³, L.P. Titov⁴, V.I. Bernik⁵

¹United Institute of Informatics Problems, Belarus National Academy of Sciences, Minsk, Belarus

^{2,4}Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology
Ministry of Health of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

³Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing, China

⁵Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

¹stepanenkmatvei@yandex.ru, ²vladyko@belriem.by, ³luzzbj@aliyun.com,

⁴leotit310@gmail.com, ⁵bernik@im.bas-net.by

Abstract. *Background.* The coronavirus epidemic continues, but there is evidence that the society has already mastered effective measures for the prevention and treatment of this disease. The unresolved problems are prevention, early diagnosis and timely treatment of new viral epidemics, prevention and treatment of postcovid complications, the mortality from which manifests itself latently under the guise of other diseases and does not fall into the statistics of the coronavirus pandemic. *Materials and methods.* Based on the developed original data processing technique, designed for analyzing coronavirus genomic data, models of the anti-coronavirus multi-epitope vaccine were computed and tested in silico. In a series of computational experiments, evidence of their possible efficiency and safety was obtained. *Results and conclusions.* Based on research experiments and analysis of scientific literature, recommendations are formulated for the development and application of epitope antiviral vaccines using the example of the anti-coronavirus vaccine.

Keywords: medical systems, information representation, software, algorithms, databases, genomics, transcriptomics, machine learning, artificial intelligence, programming languages, applied mathematics, biophysics, data science, data mining, coronavirus, epidemic, pandemic, bioinformatics, immunoinformatics, antiviral therapy, vaccines, epitopes

Financing: the work was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research within the framework of the projects: M21COVID-001 "Development and screening of a mucosal vaccine against COVID-19 based on a vector platform of intestinal adenovirus", state registration number 20210889 dated 04.26.2021; F21MN-001 "Mathematical modeling of transmission and spread of COVID-19 infection based on systems of differential equations and algorithms for data processing using machine learning technology", state registration number 20213518 dated 09.27.2021; M21COVID-026 "Retrospective analysis of the clinical and immunological status of COVID-19 groups of patients with concomitant tuberculosis and HIV infection according to the RSPC of Pulmonology and Phthisiology of Minsk", state registration number 20210456 dated 03.31.2021.

For citation: Sprindzuk M.V., Vladyko A.S., Zhuozhuang Lu, Titov L.P., Bernik V.I. Technique for the analysis of bioinformation data of genomic nature for the development of multiepitope anticoronavirus vaccine models. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):48–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-6

Введение

Коронавирусная эпидемия продолжается, однако есть свидетельства того, что обществом уже освоены эффективные меры профилактики и лечения этого заболевания. Нерешенными проблемами являются предупреждение, ранняя диагностика и своевременное лечение новых вирусных эпидемий, профилактика и лечение постковидных осложнений, смертность от которых проявляется латентно под маской других заболеваний и не попадает в статистику коронавирусной пандемии.

В мире по причине коронавирусной инфекции на дату 23.06.2023 умерло 6 893 982 пациентов, из них в России – 399 436 человек и Беларуси – 7118 [<https://www.worldometers.info/coronavirus/>].

На сегодняшний день опубликовано несколько результатов разработки и тестирования антивирусных синтетических пептидов [1–7]. Имеются единичные публикации о применении аденовирусного вектора [8] и о преclinical исследованиях коронавирусных синтетических пептидов [9].

Тема иммуноинформатики, патогенеза и распространения коронавируса в течение трех лет изучалась нами в рамках трех научных проектов, которые указаны в конце данной статьи. Данная работа сфокусирована на сообщении только основных, ключевых результатов серии вычислительных экспериментов.

Материалы и методы

Для вычисления большинства эпитопов был использован основной Дельта изолят из Го-меля [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/MW674675.1]. Были отобраны геномные тексты гена-шипа (спайка) и нуклеокапсидного гена. Схема разработанной методики обработки дан-ных представлена на рис. 1.

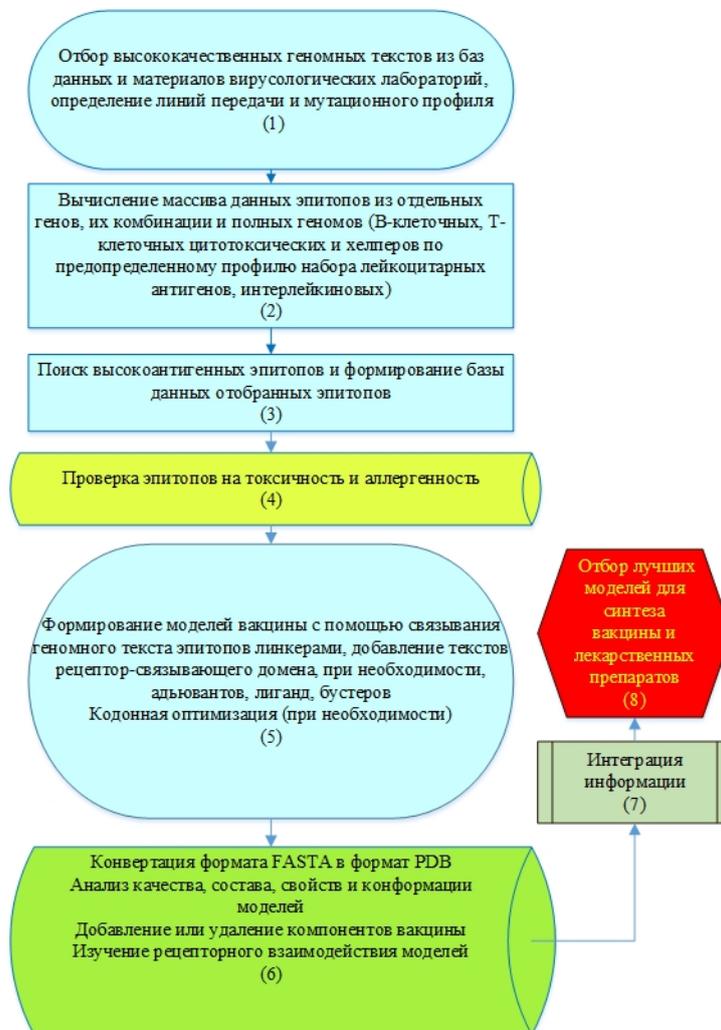


Рис. 1. Методика обработки и анализа данных

В-клеточные эпитопы были преимущественно вычислены веб-сервисом ABCPred [http://crdd.osdd.net/raghava/abcpred/], дополнительно применялись компьютерные программы Bepipred [https://services.healthtech.dtu.dk/service.php?BepiPred], BCPred, [https://webs.iiitd.edu.in/raghava/bcepred/], ElliPro [http://tools.iedb.org/ellipro/].

Для вычисления Т-клеточных эпитопов мы отобрали доступный веб-сервис NetMHCpan [https://services.healthtech.dtu.dk/service.php?NetCTLpan-1.1] и панель лейкоцитарных антигенов, наиболее распространенных в популяции русского населения [10]: HLA-A01:01, HLA-A02:01, HLA-C07:02, HLA-C07:01, HLA-B07:02. У азиатов аналогичная панель включает: HLA-A*24, 02, 26; HLA-B*40, 51, 52; DRB1*04, 15, 09.

Также применялись веб-сервисы для вычисления цитотоксических интерлейкиновых эпитопов:

- 1) IFNEpitope [http://crdd.osdd.net/raghava/ifnepitope/];
- 2) IGPred [https://webs.iiitd.edu.in/raghava/igpred/pep-fix-pred.html];
- 3) IL4Pred [https://webs.iiitd.edu.in/raghava/il4pred/];
- 4) IL6Pred [https://webs.iiitd.edu.in/raghava/il6pred/];
- 5) IL10Pred [https://webs.iiitd.edu.in/raghava/il10pred/scan.php];

- 6) IL13Pred [<https://webs.iiitd.edu.in/raghava/il13pred/disp.php?ran = 23017>];
- 7) IL17Scan [<http://metagenomics.iiserb.ac.in/IL17eScan/>].

Многопараметрическое тестирование вакцины проводилось мета-серверами для протеомики и иммуноинформатики: PROCHECK UCLA [<https://saves.mbi.ucla.edu/>], SwissExpasy [<https://swissmodel.expasy.org/interactive>], PEP-FOLD [<https://mobyli.rpbs.univ-paris.diderot.fr/cgibin/portal.py#forms::PEPFOLD3>], SCRATCH [<https://scratch.proteomics.ics.uci.edu/>] (рис. 2, 3).



Рис. 2. Отчет веб-сервиса PROCHECK, свидетельствующий о высоком качестве второй модели вакцины

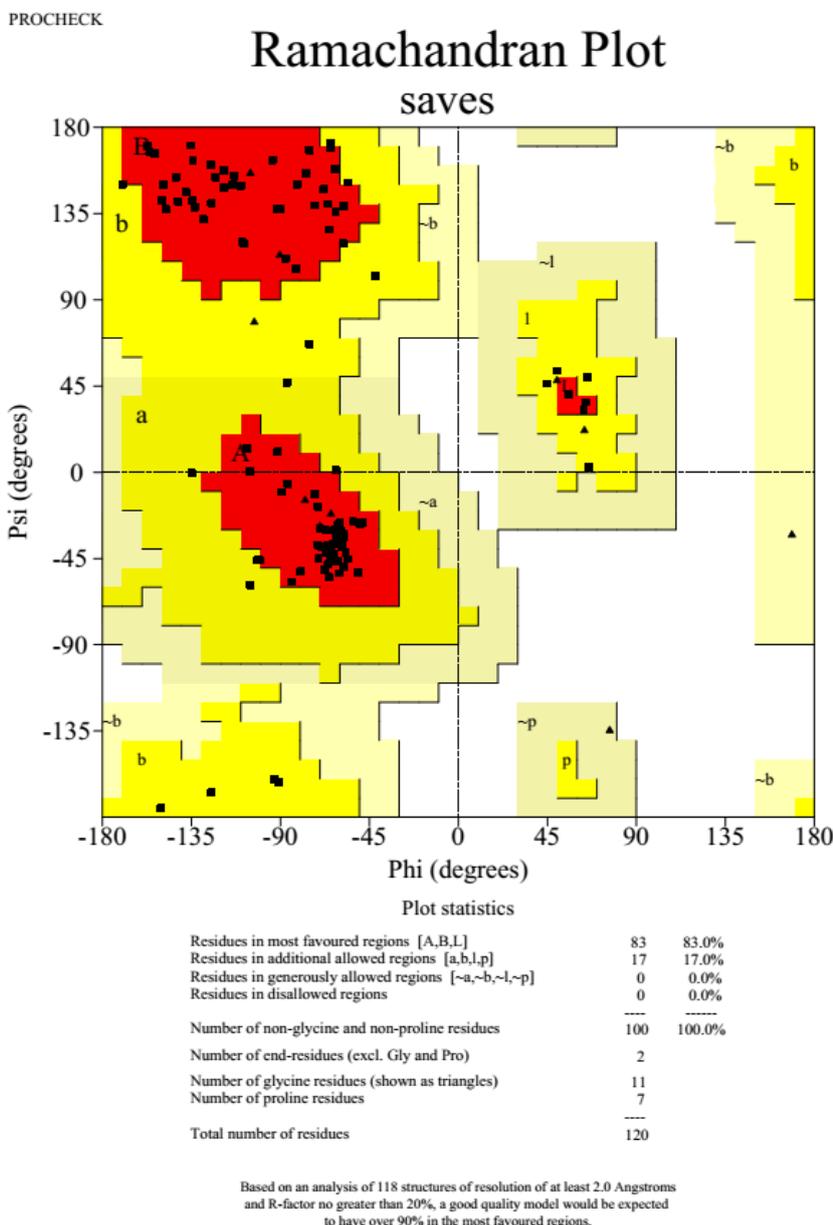
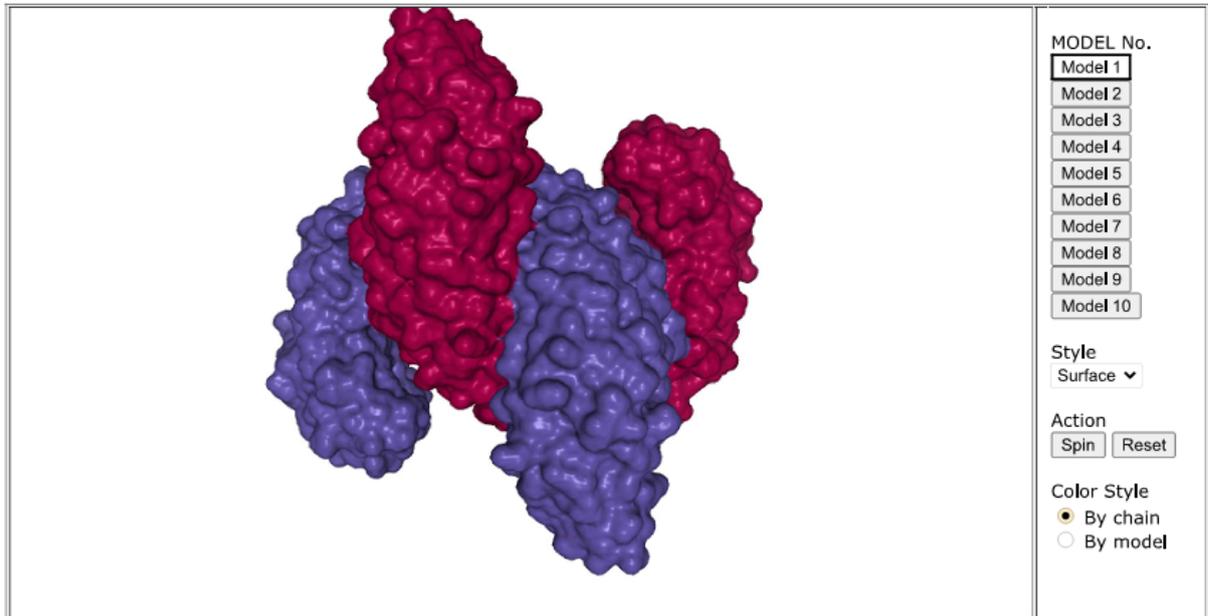


Рис. 3. График Рамачандрана второй модели вакцины

Для докинга [11] и оценки рецепторного взаимодействия были отобраны толл-рецепторы 2–5 и использован веб-сервис <http://huanglab.phys.hust.edu.cn/hsymdock/> [12] (рис. 4). Наибольшие баллы докинга были отмечены у четвертого толл-рецептора. Прогноз иммунного ответа на введение вакцинного антигена выполнялся программным обеспечением C-Immuno-Sim [<https://150.146.2.1/C-IMMSIM/index.php>] (рис. 5).



Summary of the top 10 models

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Docking Score*	-538.79	-489.09	-481.46	-465.71	-454.23	-439.57	-426.71	-416.06	-411.93	-403.46

(a) Row 1: The ranks of the models.

(b) Row 2: The docking energy scores.

Рис. 4. Докинг второй модели вакцины и TLR-4 рецептора

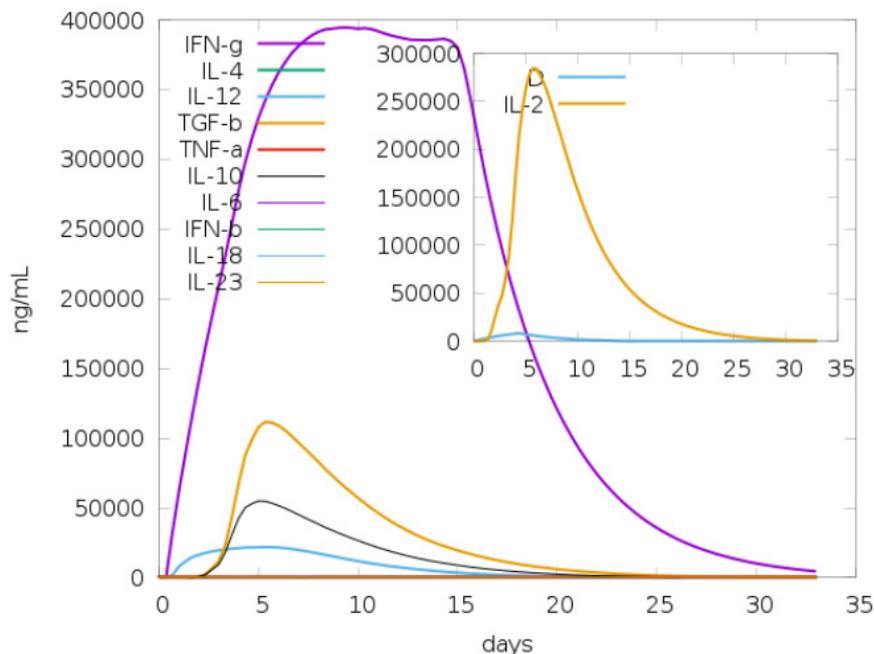


Рис. 5. Отчет программы моделирования иммунного ответа: динамика цитокинов в ответ на инъекцию второй модели вакцины. Наблюдается особенно мощный ответ роста интерферона (по сравнению со всеми другими моделями вакцин)

Физико-химические свойства моделей вакцин были вычислены веб-сервисом Protparam [http://www.protparam.net/index.html] (рис. 6).

PROTEIN ANALYSIS

Sequence
The submitted protein sequence has 1003 amino acids:
EAAKMKWVTF ISLLFLFSSA YSMAEIGTGF PFDPHYVEVL GERMHYVDVG 50
PRDGTPLVFL HGNPTSSYVW RNIIPHVAPT HRCIAPDLIG MGKSDKPDLG 100
YFFDDHVRFM DAFIEALGLE EVVLVIHDWG SALGFHWAKR NPERVKGIAF 150
MEFIRPIPTW DEWPEFARET FQAFRTDVG RKLIIIDQNVF IEGTLPMPVV 200
RPLTEVEMDH YREPLFLPVD REPLWRFPNE LPIAGEPANI VALVEEYMDW 250
LHQSPVPKLL FWGTPGVLIIP PAEAARLAKS LPNCKAVDIG PGLNLLQEDN 300
PDLIGSEIAR WLSTEISGGG GSGGGGIEEN LYFQSNVAVYH KHTFIVLYVD 350
FKPQSGGGKC FNCYPAGVNI TLANFNETKG PLCVDTSHFT TKYVAVYANV 400
GRWSASINTG NCPFSFGKVN NFVKFGSVCF SLKDIPGGCA MPIVANWAYS 450
KYITIGSLYV SWSDDGDTG VPQPVEGSEN LYFQSGHHHH HHHHSAWSHP 500
QFEKGGGSGG GSGGGSWSH PQFEKKGIGA EHVNSYECED IPIGAGIKKK 550
HTPINLVRDL PQGFSALEPK KGVNCTEVPV AIHADQLTPT WKKGWTAGAA 600
AYYVGYLQPK KKKPQRQKKQ QTVTLPAAD LDDKKVSGTN GTRKKASTE 650
KSNKKDLEGG QGKKYKENG TITDKKYRIG NYKLNPGPGP LPLVSSQCVN 700
LGGPGLLQY GSFCTQLAAY KLNDLCFTNV YAAVMTKTSV DCTMYAAYLI 750
GAEHVNSYA AYLLQYGSFC TQLAAYRAAE IRASANLAAY YQPYRVVLS 800
FAAYYQPYRV VVLSFAAYY VGYLQPRFTA AYMSLGAENS VAYAAVMFV 850
LVLLPLVSSQ CVNLRTRTQL PPAAYSRSSS RSRNRRNST PGSSKRTSPA 900
RMAGNGGDA LALLLDRLN QLESKMSGKG QQQGAAYIA QFAPSASAFF 950
GMSRIGMEVT PSGTWLYTG AIKLDDKDPN FKDQVILLNK HIDAYKTFHH 1000
HHH 1003

Molecular Weight
The average molecular weight is: 110700.9772
The monoisotopic molecular weight is: 110630.6171
The total number of atoms is: 15452

Amino acid composition

Amino Acid	Count	% Total
Alanine (A)	87	8.67
Arginine (R)	37	3.69
Asparagine (N)	47	4.69
Aspartic acid (D)	41	4.09
Cysteine (C)	16	1.60
Glutamine (Q)	35	3.49
Glutamic acid (E)	44	4.39
Glycine (G)	92	9.17
Histidine (H)	33	3.29
Isoleucine (I)	44	4.39
Leucine (L)	81	8.08
Lysine (K)	61	6.08
Methionine (M)	18	1.79
Phenylalanine (F)	48	4.79
Proline (P)	64	6.38
Serine (S)	69	6.88
Threonine (T)	50	4.99
Tryptophan (W)	18	1.79
Tyrosine (Y)	52	5.18
Valine (V)	66	6.58

Charge and hydrophobicity
Negatively charged residues (D, E) = 85 (8.47%)
Positively charged residues (K, R, H) = 131 (13.06%)
Polar residues (C, S, Q, N, T, Y) = 269 (26.82%)
Hydrophobic residues (A, G, I, L, M, P, F, W, V) = 518 (51.65%)

The aliphatic index is: 76.36
The Grand Average of Hydropathicity (GRAVY) is: -0.259

Isoelectric Point
8.76 using amino acid pKa values from Bjellqvist et al
8.54 using amino acid pKa values from Wikipedia

Extinction Coefficient
The extinction coefficient is: 176480
A 1mg/ml (9.033 uM) solution of your protein has an A280nm of: 1.59
If all cysteines are disulphide bonded, the extinction coefficient is: 177480
A 1mg/ml (9.033 uM) solution of your protein has an A280nm of: 1.60

Input your A280 and click "Enter" to calculate concentration or click "New Sequence" to enter a new sequence.

Input A280

Рис. 6. Физико-химические характеристики второй модели вакцины

**Отбор и анализ (оценка иммуногенности, аллергенности, сродства к клеточным рецепторам организма-хозяина) эпитопов для моделирования вакцины *in silico*.
Результаты идентификации и отбора потенциальных эпитопов**

Эпитопы отбирались по доминирующим признакам высокой антигенности (Vaxijen [www.ddg-pharmfac.net/vaxijen/VaxiJen/VaxiJen.html], AntigenPro) и отсутствию токсичности и аллергенности (AllerCatPro [https://allercatpro.bii.a-star.edu.sg/], ToxinPred [http://crdd.osdd.net/

raghava/toxinpred/], BLASTP (базовый инструмент поиска с помощью локального выравнивания), рис. 2–7). Консервативность компонентов вакцины была проверена сервисом BLASTP и инструментами IEDB (база данных иммунных эпитопов) [https://www.iedb.org/]. В статье приведены только отобранные иллюстрации, скриншоты и таблицы как квинтэссенция результатов данного исследования. Полный объем сгенерированных отчетов превышает количество сотни страниц. Пояснения к графикам доступны на веб-страницах используемого программного обеспечения.

Таким образом, нами были сконструированы пять моделей вакцины (листинги 1–5). Вторая модель отличается от первой добавлением рецептор-связывающего домена, отобранного из базы данных по признаку максимальной антигенности и нетоксичности, а также добавлением большего числа различных эпитопов, в том числе отобранных для популяции России. В третью модель были добавлены эпитопы для азиатско-китайской популяции. Четвертая модель спланирована как универсальный антиген без специфических Т-клеточных эпитопов. Она состоит из В-эпитопов и потенциальных индукторов интерлейкинов. Для связывания компонентов в единый геномный текст применялись стандартные линкеры, описанные в источнике [13]. Линкер GPGPG использовался для соединения хелперных и В-эпитопов, KK для В-эпитопов, AAY для цитотоксических эпитопов. Все разработанные модели вакцины показали баллы антигенности, превосходящие аналоги по источникам [14, 15].

EAAKIGAHEVNSYECDIPIGAGIKK KHTPINLVRDLPQGFSALEPKK GVNCTEVPVAIHADQLTPTW
KKYRIGNYKLN GPGPG LPLVSSQCVNL GPGPG LLQYGSFCTQL AAY
KLNDLCFTNVYAAAYMTKTSVDCTMY AAY LIGAEHVNSY AAY LLQYGSFCTQL AAY RAAEIRASANL
AAY YQPYRVVLSFAAY YQPYRVVLSF AAY YVGYLQPRTF AAY MSLGAENSVAY

Листинг 1. Геномный текст первой модели вакцины: фиолетовый – линкеры; зеленый – РСД (синтетический коронавирусный рецептор-связывающий домен, идентификатор GenBank: QKY12181.1); желтый – В-эпитопы; голубой – эпитопы HLA В* (вспомогательные); серый – цитотоксические (эпитопы HLA А* и С* и II, интерлейкиновые).
 Антигенность: 0,8. Коэффициент качества 75 %

EAAKMKWVTFISLLFFSSAYSMAEIGTFPFDPHYVEVLGERMHYVDVGPDRDGTVPVFLHGNPTSSYVWR
NIIPHVAPTHRCIAPDLIGMGKSDKPDLYFFDDHVRFDFAIEALGLEEVLVHWDWGSALGFHWAKRNP
RVKGIAMFIRPIPTWDEWPEFARETFQAFRTTVDGRKLIIDQNVFIEGTLPMGVVRLTEVEMDHYREPF
LNPVDREPLWRFPNELPIAGEPANIVALVEEYMDWLHQSPVPKLLFWGTPGVLIPPAEAARLAKSLPNCKA
VDIGPGLNLLQEDNPDIGSEIARWLSTEISGGGGGGGGGIEENLYFQSNVYHKHTFIVLYVDFKPSGGG
KCFNCYPAGVNITLANFNETKGPLCVDTSHFTTKYVAVYANVGRWSASINTGNCPSFGKVNNFVFKGVSVC
SLKIDIPGGCAMPIVANWAYSKYVTIGSLYVSWSDGDGITGVQPVEGSENLYFQSGHHHHHHHSAWSHPQ
FEKGGGSGGGGSAWSHPQFEKKGKIGAHEVNSYECDIPIGAGIKK KHTPINLVRDLPQGFSALEPKK
GVNCTEVPVAIHADQLTPTW KK GWTAGAAAYVGYLQPKK PQRQKQQTVLLPAADLDD KK
VSGTNGTKR KK ASTEKSNN KK DLEGKQK KYNENGTITDKK
YRIGNYKLN GPGPGLPLVSSQCVNL GPGPG
LLQYGSFCTQLAAY KLNDLCFTNVYAAAYMTKTSVDCTMYAAYLIGAEHVNSYAAAYLLQYGSFCTQLAAY
RAAEIRASANLAAYYQPYRVVLSFAAYYQPYRVVLSFAAYYVGYLQPRTF AAYMSLGAENSVAY AAYM
FVFLVLLPLVSSQCVNLTRTQLPPAAYSRSSSRNNSRNSTPGSSKRTSPARMAGNGGDAALALLLLDRN
QLESKMSGKQQQQAAYIAQFAPSASAFFGMSRIGMEVTPSGTWLTYTGAIKLDDKDPNFKDQVILLNK
IDAYKTF HHHHH

Листинг 2. Геномный текст второй модели вакцины.
 Антигенность: 0,6471. Коэффициент качества 98 %

EAAKIGAHEVNSYECDIPIGAGIKK KHTPINLVRDLPQGFSALEPKK GVNCTEVPVAIHADQLTPTW
KKGWTAGAAAYVGYLQPKK PQRQKQQTVLLPAADLDDKKVSGTNGTKRKK ASTEKSNN KK DLEGKQ
GKKKYNENGTITDKK YRIGNYKLN GPGPGLPLVSSQCVNL GPGPG MFHLVDFQVTAIEILLIMRTFKVSIWNLDYHNLIKNLSKSLT
ENKYSQLDEEQPMEIDAAY MGYINVFAPFTIYSLLLCRMNSRNYIAQVDVNFNLTAAYSEPVKGVKLVHY
TAAYFGRDIADTTDAVRDPQTLEILDITPCSFSGVSVITP AAYSNLLQYGSFCTQLNRALTGIAVEQAAYAS
ALGKLQDVVNQNAQALNLTLVKQLAAYRYVDNFCGPDGYPLECIKDLLARAGKASCTLSEQLDFIDTKRG
VYCCREHEHEIAWYTE AAYVPRASANIGCNHTGVVGESEGLNDNLEILQKEKVNINIVGDFKLNIEIAIHL
ASFSAS AAYPLQSYGFQPTNGVGYQPYRVVLSFELLHAPATVCGPKSTNLVKNKCVNFENGLTGTGVL
TESNKKFLAAYMFVFLVLLPLVSSQCVNLTRTQLPPAAYTNSFTRGVYYPDKVFRSSVLHSTQDLFLPFFSNV
TWFHAIHVAAYLGDIAARDLCAQKFNGLTVLPLLTDEMIQAQYTSALLAGTITSGWTFGAGAALQIPFAMQ
MAYRFNGIGAAYGAKLKALNLG AAYAKLKALNLGE AAYIWFLLSVCLGAAYDPFLGVYHH AAYLHRSYL
TPG AAYSYLTPGDSS AAYTLLALHRSY AAYSRSSSRNNSRNSTPGSSKRTSPARMAGNGGDAALALLLLDR
LNQLESKMSGKQQQQAAYIAQFAPSASAFFGMSRIGMEVTPSGTWLTYTGAIKLDDKDPNFKDQVILLN
KHIDAYKTF HHHHH

Листинг 3. Геномный текст третьей модели вакцины (доминируют интерлейкиновые эпитопы).
 Антигенность: 0,68. Коэффициент качества 70 %

EAAKMQPTESIVRFPNITNLCPFGEVFNATRFASVYAWNRKRISNCVADYSVLYNSASFSTFKCYGVSPTKLN
 DLCFTNVYADSFVIRGDEVQRQIAPGQTGKIADYNYKLPDDFTGCVIAWNSNNLDSKVGNYNYLYRFRKS
 NLKPFERDISTEIQAGSTPCNGVEGFNCYFPLQSYGFQPTNGVGYQPYRVVLSFELLHAPATVCGPKKST
 NLVKNKPGEQKLISEEDLSAGGKKIGAEHVNSYECDIPIGAGIKKHKHTPINLVRDLPGQFSALEPKKGVNC
 TEVPVAIHADQLTPTWKK GWTAGAAAYVGYLQPKK
 PQRQKKQQTVTLTPAADLDDKKVSGTNGTKRKKASTEKSNNKDLLEGKQGGKKYENGTITDKKYRIGNY
 KLNPGPGPLPLVSSQCVNLGPGPGLLQYGSFCTQLGPGPGYEQYIKWPWYIGPGGLEILDITPCSFAAYKL
 NDLNLCFTNVYAAAYMTKTSVDCTMYAAAYLIGAEHVNSYAAAYLLQYGSFCTQLAAAYRAAEIRASANLAAYYQP
 YRVVLSFAAYYQPYRVVLSFAAYVYVGYLQPRTFAAAYMSLGAENSVAYAAAYVLYQGVNCTEVAAAYLLQ
 YGSFCTQLAAAYRFPNITNLCPFAYIYSKHTPINLVAAAYKTPPIKDFGGFAAYPYRVVLSFELAAAYMTKTSV
 DCTMYAAAYVIGIVNNTVYAAAYSLIDLQELGKYAAAYSRSSSRNRSSRNSTPGSSKRTSPARMAGNGGDAAL
 ALLLLDRLNQLKESKMSGKGGQQQGAAYIAQFAPSASAFFGMSRIGMEVTPSGTWLTYTGAIKLDDKDPNFK
 DQVILLNKHIDAYKTFHHHHH

Листинг 4. Геномный текст четвертой (с Азиатскими Т-эпитопами) модели вакцины).
 Антигенность: 0,69. Коэффициент качества 83 %

EAAKMKWYTFISLLFLFSSAYSMAEIGTGFPDPHYVEVLGERMHYVDVGRDTPVFLHGNPTSSYVWR
 NIIPHVAPTHRCIAPDLIGMGKSDKPDLYFFDDHVRFMADAFIEALGLEEVVLIHDWGSALGFHWAKRNP
 RVKGIAFMFIRPIPTWDEWPEFARETFQAFRTTDVGRKLIHQNVFIEGTLPMGVVRPLTEVEMDHYREP
 LNPVDREPLWRFPNELPIAGEPANIVALVEEYMDWLHQSPVKLLFWGTPGVLIIPPAEAARLAKSLPNCKA
 VDIGPGLNLLQEDNPDIGSEIARWLSTEISGGGGGGGGIEENLYFQSNVYHKTFFIVLVDFKPGSGGG
 KCFNCYPAGVNTLANFNETKGPLCVDTSHFTTKYVAVYAVNGRWSASINTGNCPFSGKVNNVFKGVSVC
 SLKDIPGGCAMPVANWAYSKEYTIGSLYVSWSDGDTGVPQVPEGSENLYFQSGHHHHHHHSAWHPQ
 FEKGGGGGGGGGSAWHPQFEKEAAKMQPTESIVRFPNITNLCPFGEVFNATRFASVYAWNRKRISNCV
 ADYSVLYNSASFSTFKCYGVSPTKLNLCFTNVYADSFVIRGDEVQRQIAPGQTGKIADYNYKLPDDFTGCVIA
 WNSNNLDSKVGNYNYLYRFRKSNLKPFERDISTEIQAGSTPCNGVEGFNCYFPLQSYGFQPTNGVGYQ
 YRVVLSFELLHAPATVCGPKKSTNLVKNKPGEQKLISEEDLSAGGKKIGAEHVNSYECDIPIGAGIKKHK
 TPINLVRDLPGQFSALEPKKGVNCTEVPVAIHADQLTPTWKKGWTAGAAAYVGYLQPKKQQRQKQQT
 VTLTPAADLDDKKVSGTNGTKRKKASTEKSNNKDLLEGKQGGKKYENGTITDKKYRIGNYKLNPGPGPL
 LVSSQCVNLGPGPGLLQYGSFCTQLGPGPGYEQYIKWPWYIGPGGLEILDITPCSFAAYKLNLCFTNVYA
 AYMTKTSVDCTMYAAAYLIGAEHVNSYAAAYLLQYGSFCTQLAAAYRAAEIRASANLAAYYQPYRVVLSFA
 AYQPYRVVLSFAAYVYVGYLQPRTFAAAYMSLGAENSVAYAAAYVLYQGVNCTEVAAAYLLQYGSFCTQLAA
 YRFPNITNLCPFAYIYSKHTPINLVAAAYKTPPIKDFGGFAAYPYRVVLSFELAAAYMTKTSVDCTMYAAAY
 VIGIVNNTVYAAAYSLIDLQELGKYAAAYSRSSSRNRSSRNSTPGSSKRTSPARMAGNGGDAALALLLLDRLN
 QLESKMSGKGGQQQGAAYIAQFAPSASAFFGMSRIGMEVTPSGTWLTYTGAIKLDDKDPNFKDQVILLNKH
 IDAYKTFHHHHH

Листинг 5. Модель с двумя рецептор-связывающими доменами и полным набором различных эпитопов.
 Антигенность: 0,63. Коэффициент качества 76 %

Вторая модель вакцины показала свое наиболее высокое качество компонентного состава и конформации (см. рис. 2, 3). Все разработанные модели можно применять для синтеза антивирусных пептидов и выполнения лабораторных экспериментов. Очевидно, что себестоимость второй и пятой моделей вакцины будет более высокой по причине их объема и сложности. Модели вакцины можно расширять лигандами, универсальными высококонсервативными эпитопами, адьювантами, эпитопами из других генов, для чего можно использовать и проверенные данные литературы.

Формирование обоснованных рекомендаций для биотехнологии вакцины

Рекомендации к разработке коронавирусной эпитопной вакцины:

1. В-клеточные эпитопы наряду с интерлейкиновыми Т-клеточными эпитопами могут быть основным компонентом модели вакцины и практически условно универсальны для реципиентов вакцины. Поэтому рекомендовано их использовать для «вакцины для всех».

2. Т-клеточные эпитопы, к которым можно отнести и цитотоксичные, и интерферонные эпитопы могут быть вычислены по геномным текстам В-клеточных эпитопов либо по другим источникам геномной информации, и могут отбираться с учетом их аллельной принадлежности, которую можно учитывать, как для конкретного индивидуума после ее профилирования, так и для географических или национальных кластеров субъектов вакцинирования. Таким образом реализуется концепция так называемой персонализированной и точной медицины.

3. Тексты линкеров применяются для связывания кластеров и ансамблей эпитопов, вероятно, можно использовать их по опыту других антивирусных вакцин.

3. Необходима не только *in silico*, *in vitro* и *in vivo* проверка эпитопов но и более высокоуровневых компонентов разрабатываемой вакцины на аллергенность, иммуногенность, стабильность и токсичность.

4. Роль биоинженерной реализации обусловлена различными методиками генерации синтетических пептидов и их производных.
5. Роль адъювантов в настоящее время изучается стандартным адъювантом, является гидроксид алюминия. Можно также применять иммуномодуляторы, такие как полиоксидоний.
6. Не следует переоценивать результаты изучения активности вакцины в условиях симуляции иммунитета и *in silico* признаков, что лишь фрагментарно отображает реальность многообразной системы живого организма.
7. Необходимо принимать во внимание риски побочных эффектов по причине использования аденовирусного вектора. Возможно, целесообразнее применять другой вектор, более безопасный.
8. Эпитопные вакцины могут быть рекомендованы в первую очередь для ветеринарии.
9. Необходимы предклинические лабораторные опыты на приматах и других высших млекопитающих.
10. Необходимы сравнительные лабораторные опыты для изучения вакцин различной природы, среди которых должны быть и синтетические мультиэпитопные пептиды.
11. Необходимы сравнительные лабораторные эксперименты по изучению иммуногенности эпитопов различного происхождения, длины, физико-химических свойств в комплексах с различными адъювантами и бустерами.

Заключение

На основе оригинальной методики анализа геномных данных коронавируса разработаны и протестированы модели антикоронавирусной мультиэпитопной вакцины.

Получены *in silico* доказательства их возможной эффективности и безопасности. На основе вычислительных экспериментов и анализа научной литературы сформулированы рекомендации для разработки и применения эпитопных противовирусных вакцин.

Список литературы

1. Mohammadzadeh Hosseini Moghri S. A. H., Ranjbar M., Hassannia H., Khakdan F. In silico analysis of the conserved surface-exposed epitopes to design novel multiepitope peptide vaccine for all variants of the SARS-CoV-2 // Journal of Biomolecular Structure & Dynamics. 2022. P. 1–13. doi: 10.1080/07391102.2022.2123395
2. Ghafouri F., Ahangari Cohan R., Samimi H. et al. Development of a Multiepitope Vaccine Against SARS-CoV-2: Immunoinformatics Study // JMIR Bioinformatics and Biotechnology. 2022. Vol. 3, № 1. P. e36100. doi: 10.2196/36100v3i1e36100
3. Fatoba A. J., Adeleke V. T., Maharaj L. et al. Design of a Multiepitope Vaccine against Chicken Anemia Virus Disease // Viruses. 2022. Vol. 14, № 7. P. 1456. doi: 10.3390/v14071456v14071456
4. Silva L. A. D., Lima M., de Camargo B. R. et al. A Chikungunya Virus Multiepitope Recombinant Protein Expressed from the Binary System Insect Cell/Recombinant Baculovirus Is Useful for Laboratorial Diagnosis of Chikungunya // Microorganisms. 2022. Vol. 10, № 7. P. 1451. doi: 10.3390/microorganisms10071451
5. Wu Y., Wen H., Bernstein, Z. J. et al. Multiepitope supramolecular peptide nanofibers eliciting coordinated humoral and cellular antitumor immune responses // Science Advances. 2022. Vol. 8, № 29. P. 7833. doi: 10.1126/sciadv.abm7833
6. Alizadeh M., Amini-Khoei H., Tahmasebian S. et al. Designing a novel multiepitope vaccine against Ebola virus using reverse vaccinology approach // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, № 1. P. 7757. doi: 10.1038/s41598-022-11851-z10.1038/s41598-022-11851-z
7. Shabani S. H., Kardani K., Milani A., Bolhassani A. In Silico and in Vivo Analysis of HIV-1 Rev Regulatory Protein for Evaluation of a Multiepitope-based Vaccine Candidate // Immunological Investigations. 2022. Vol. 51, № 1. P. 1–28. doi: 10.1080/08820139.2020.1867163
8. Porto P. S., Anjos D., Dabilla N. et al. Immunoinformatic construction of an adenovirus-based modular vaccine platform and its application in the design of a SARS-CoV-2 vaccine // Infection, Genetics and Evolution. 2020. Vol. 85. P. 104489. doi: 10.1016/j.meegid.2020.104489
9. Aparicio B., Casares N., Egea J. et al. Preclinical evaluation of a synthetic peptide vaccine against SARS-CoV-2 inducing multiepitopic and cross-reactive humoral neutralizing and cellular CD4 and CD8 responses // Emerging Microbes & Infections. 2021. Vol. 10, № 1. P. 1931–1946. doi: 10.1080/22221751.2021.1978823
10. Suslova T. A., Vavilov M. N., Belyaeva S. V. et al. Distribution of HLA-A, -B, -C, -DRB1, -DQB1, -DPB1 allele frequencies in patients with COVID-19 bilateral pneumonia in Russians, living in the Chelyabinsk region (Russia) // Human Immunology. 2022. Vol. 83, № 7. P. 547–550. doi: 10.1016/j.humimm.2022.04.009
11. Anwar T., Kumar P., Khan A. U., Coumar M. Molecular docking for computer-aided drug design. Academic Press Cambridge, 2021.

12. Yan Y., Tao H., Huang S. Y. HSYMDOCK: a docking web server for predicting the structure of protein homo-oligomers with Cn or Dn symmetry // *Nucleic Acids Research*. 2018. Vol. 46, № W1. P. 423–431. doi: 10.1093/nar/gky3985006030
13. Kabiri M., Tafaghodi M., Saberi M. et al. Separation of the Epitopes in a Multi-Epitope Chimera: Helical or Flexible Linkers // *Protein & Peptide Letters*. 2019. Vol. 26. doi: 10.2174/0929866526666191112124602
14. Криницкий А. А. Исследование иммуногенности и потенциальной протективности вакцины «ЭпиВак-Корона»: препринт. 2021. URL: <https://covid19-preprints.microbe.ru/files/299> (дата доступа: 21.11.2022).
15. Khan M. T., Islam M. J., Parihar A. et al. Immunoinformatics and molecular modeling approach to design universal multi-epitope vaccine for SARS-CoV-2 // *Informatics in Medicine Unlocked*. 2021. Vol. 24. P. 100578.

References

1. Mohammadzadeh Hosseini Moghri S.A.H., Ranjbar M., Hassannia H., Khakdan F. In silico analysis of the conserved surface-exposed epitopes to design novel multiepitope peptide vaccine for all variants of the SARS-CoV-2. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*. 2022;1–13. doi: 10.1080/07391102.2022.2123395
2. Ghafouri F., Ahangari Cohan R., Samimi H. et al. Development of a Multiepitope Vaccine Against SARS-CoV-2: Immunoinformatics Study. *JMIR Bioinformatics and Biotechnology*. 2022;3(1):e36100. doi: 10.2196/36100v3i1e36100
3. Fatoba A.J., Adeleke V.T., Maharaj L. et al. Design of a Multiepitope Vaccine against Chicken Anemia Virus Disease. *Viruses*. 2022;14(7):1456. doi: 10.3390/v14071456v14071456
4. Silva L.A.D., Lima M., de Camargo B.R. et al. A Chikungunya Virus Multiepitope Recombinant Protein Expressed from the Binary System Insect Cell/Recombinant Baculovirus Is Useful for Laboratorial Diagnosis of Chikungunya. *Microorganisms*. 2022;10(7):1451. doi: 10.3390/microorganisms10071451microorganisms10071451
5. Wu Y., Wen H., Bernstein, Z.J. et al. Multiepitope supramolecular peptide nanofibers eliciting coordinated humoral and cellular antitumor immune responses. *Science Advances*. 2022;8(29):7833. doi: 10.1126/sciadv.abm7833
6. Alizadeh M., Amini-Khoei H., Tahmasebian S. et al. Designing a novel multiepitope vaccine against Ebola virus using reverse vaccinology approach. *Scientific Reports*. 2022;12(1):7757. doi: 10.1038/s41598-022-11851-z10.1038/s41598-022-11851-z
7. Shabani S.H., Kardani K., Milani A., Bolhassani A. In Silico and in Vivo Analysis of HIV-1 Rev Regulatory Protein for Evaluation of a Multiepitope-based Vaccine Candidate. *Immunological Investigations*. 2022;51(1):1–28. doi: 10.1080/08820139.2020.1867163
8. Porto P.S., Anjos D., Dabilla N. et al. Immunoinformatic construction of an adenovirus-based modular vaccine platform and its application in the design of a SARS-CoV-2 vaccine. *Infection, Genetics and Evolution*. 2020;85:104489. doi: 10.1016/j.meegid.2020.104489
9. Aparicio B., Casares N., Egea J. et al. Preclinical evaluation of a synthetic peptide vaccine against SARS-CoV-2 inducing multiepitopic and cross-reactive humoral neutralizing and cellular CD4 and CD8 responses. *Emerging Microbes & Infections*. 2021;10(1):193–1946. doi: 10.1080/22221751.2021.1978823
10. Suslova T.A., Vavilov M.N., Belyaeva S.V. et al. Distribution of HLA-A, -B, -C, -DRB1, -DQB1, -DPB1 allele frequencies in patients with COVID-19 bilateral pneumonia in Russians, living in the Chelyabinsk region (Russia). *Human Immunology*. 2022;83(7):547–550. doi: 10.1016/j.humimm.2022.04.009
11. Anwar T., Kumar P., Khan A.U., Coumar M. *Molecular docking for computer-aided drug design*. Academic Press Cambridge, 2021.
12. Yan Y., Tao H., Huang S.Y. HSYMDOCK: a docking web server for predicting the structure of protein homo-oligomers with Cn or Dn symmetry. *Nucleic Acids Research*. 2018;46(W1):423–431. doi: 10.1093/nar/gky3985006030
13. Kabiri M., Tafaghodi M., Saberi M. et al. Separation of the Epitopes in a Multi-Epitope Chimera: Helical or Flexible Linkers. *Protein & Peptide Letters*. 2019;26. doi: 10.2174/0929866526666191112124602
14. Krinitskiy A.A. *Issledovanie immunogenosti i potentsial'noy protektivnosti vaksiny «Epi-VakKorona»: preprint = Investigation of immunogenicity and potential protectivity of the Epi-VacCorona vaccine : preprint*. 2021. (In Russ.). Available at: <https://covid19-preprints.microbe.ru/files/299> (accessed 21.11.2022).
15. Khan M.T., Islam M.J., Parihar A. et al. Immunoinformatics and molecular modeling approach to design universal multi-epitope vaccine for SARS-CoV-2. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2021;24:100578.

Информация об авторах / Information about the authors

Матвей Владимирович Спринджук

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси
(Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 6)
E-mail: stepanenkomatvei@yandex.ru

Matvey V. Sprindzhuk

Candidate of technical sciences,
senior computer scientist,
United Institute of Informatics Problems
of the Belarus National Academy of Sciences
(6 Surganova street, Minsk, Republic of Belarus)

Александр Станиславович Владыко

доктор медицинских наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Республиканский научно-практический
центр эпидемиологии и микробиологии
Министерства здравоохранения
Республики Беларусь
(Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Филимонова, 23)
E-mail: vladuko@belriem.by

Чжочжуан Лу

доктор медицинских наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Китайский центр по контролю
и профилактике заболеваний
(Китайская Народная Республика,
г. Пекин, Дорога Чанбай, 155)
E-mail: luzzbj@aliyun.com

Леонид Петрович Титов

доктор медицинских наук, профессор,
академик НАН Беларуси,
заведующий лабораторией
экспериментальной иммунологии,
Республиканский научно-практический
центр эпидемиологии и микробиологии
Министерства здравоохранения
Республики Беларусь
(Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Филимонова, 23)
E-mail: leotit310@gmail.com

Василий Иванович Берник

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник отдела теории чисел,
Институт математики Национальной
академии наук Беларуси
(Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 11)
Email: bernik@im.bas-net.by

Aleksandr S. Vladyko

Doctor of medical sciences, professor,
principal researcher,
Republican Scientific and Practical Center
for Epidemiology and Microbiology
Ministry of Health of the Republic of Belarus
(23 Filimonova street, Minsk, Republic of Belarus)

Zhuozhuang Lu

Doctor of medical sciences, professor,
principal (head) researcher,
Chinese Center for Disease Control and Prevention
(155 Changbai Road, Beijing, China)

Leonid P. Titov

Doctor of medical sciences, professor,
academic of NASB,
head of laboratory of experimental immunology,
Republican Scientific and Practical Center
for Epidemiology and Microbiology
Ministry of Health of the Republic of Belarus
(23 Filimonova street, Minsk, Republic of Belarus)

Vasiliy I. Bernik

Doctor of physical and mathematical sciences,
professor, chief researcher
of the department of number theory,
Institute of Mathematics of the National Academy
of Sciences of Belarus
(11 Surganova street, Minsk, Republic of Belarus)

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

Поступила в редакцию/Received 01.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 03.07.2023

Принята к публикации/Accepted 31.07.2023

УДК 616.12-07:004.94
doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

РАЗРАБОТКА БАЗЫ МОДЕЛЕЙ ИОННЫХ ТОКОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

О. Н. Бодин¹, Н. А. Сержантова², М. В. Едемский³, Н. Э. Кручинина⁴

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

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbspgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение качества ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний можно обеспечить в том числе внедрением медицинских информационных систем (МИС), позволяющих осуществлять сбор и анализ информации и обеспечивать снижение количества ошибок и повышение качества диагностики, особенно на ранних этапах в условиях дефицита времени и доступных технических средств проведения обследования. По мнению авторов, подобные МИС должны содержать расширенную базу моделей ионных токов. *Материалы и методы.* Рассмотрена модель Нобла, которая может применяться в составе МИС для количественного описания процессов работы сердца в норме и при различных патологиях и сравнения расчетных величин с данными натуральных экспериментов. *Результаты.* Создана база ионных токов, содержащая результаты моделирования токов калия, натрия, кальция, токов через натриево-калиевый и натриево-кальциевый насосы, токов утечки, плато и фоновых токов. *Выводы.* Наличие моделей всех составляющих уравнения Нобла позволит повысить точность работы МИС. При необходимости в базе моделей можно отключать некоторые источники для оценки вклада соответствующих составляющих в итоговую сумму токов, а также методическую погрешность, возникающую в случае, если той или иной составляющей решено пренебречь.

Ключевые слова: сердечно-сосудистые заболевания, медицинская информационная система, база моделей, ионные токи, модель Нобла, трансмембранный потенциал

Для цитирования: Бодин О. Н., Сержантова Н. А., Едемский М. В., Кручинина Н. Э. Разработка базы моделей ионных токов для медицинской информационной системы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

DEVELOPMENT OF IONIC CURRENT MODEL BASE FOR MEDICAL INFORMATION SYSTEM OF CARDIOVASCULAR DISEASES DIAGNOSTICS

O.N. Bodin¹, N.A. Serzhantova², M.V. Edemsky³, N.E. Kruchinina⁴

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

³ Penza State University, Penza, Russia

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbspgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Abstract. *Background.* Improving the quality of early cardiovascular disease diagnostics can be provided, among other things, by the introduction of medical information systems (MIS), which allow to collect and analyze information and to reduce the number of errors and improve the quality of diagnostics especially at early stages in the conditions of time deficit and available technical means of examination. According to the authors, such MIS should contain an extended base of ionic current models. *Materials and methods.* The article considers the Noble model, which can be used as a part of MIS for quantitative description of heart work processes in norm and at different pathologies and comparison of calculated values with the data of natural experiments. *Results.* The database of ionic currents containing the results of modeling of potassium, sodium, calcium currents, currents through sodium-potassium and sodium-calcium pumps, leakage currents, plateau and background currents was created. *Conclusions.* The availability the models of all components in the Noble equation will improve the accuracy of the MIS. If necessary, in the base of models it is possible to disable some sources to estimate the contribution of the corresponding components to the final sum of currents, as well as the methodological error arising if one or another component is neglected.

Keywords: cardiovascular diseases, medical information system, model database, ionic currents, Noble model, transmembrane potential

For citation: Bodin O.N., Serzhantova N.A., Edemsky M.V., Kruchinina N.E. Development of ionic current model base for medical information system of cardiovascular diseases diagnostics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

Введение

С 2020 г. наблюдается сокращение регистрируемых показателей выявления первичных болезней системы кровообращения (БСК) и сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), что отражает напряженную ситуацию, сложившуюся в системе здравоохранения после пандемии новой коронавирусной инфекции [1]. При этом ощущается дефицит врачей некоторых специальностей, а также врачей, работающих в амбулаторно-поликлинических организациях [2].

Совершенствование системы оказания первичной медико-санитарной помощи пациентам связано с внедрением алгоритмов, направленных на раннее выявление лиц из группы высокого риска по развитию инсульта и инфаркта миокарда, пациентов с хронической сердечной недостаточностью [3], пациентов с тромбозом глубоких вен и высоким риском тромбоэмболии легочной артерии. В связи с этим актуальной задачей является разработка и внедрение систем, обеспечивающих информационную поддержку специалистов первичного звена здравоохранения, обработку и анализ сигналов и данных пациента, а также скрининговую диагностику ССЗ. Информационную поддержку медицинских работников можно обеспечить в том числе внедрением медицинских информационных систем (МИС), позволяющих осуществлять сбор и анализ информации и обеспечивать снижение количества ошибок и повышение качества диагностики социально значимых заболеваний особенно на ранних этапах в условиях дефицита времени и доступных технических средств проведения обследования [4–7].

Повышение качества диагностики с применением МИС может достигаться разными способами:

1) за счет накапливания большого количества клинических случаев, на основе которых затем производится прецедентный вывод;

2) за счет совершенствования методов, алгоритмов и средств предварительной обработки входных данных МИС и/или решающих правил, что позволяет извлекать данные с большей диагностической ценностью.

Одной из разновидностей МИС является система поддержки принятия решений (СППР). Анализ литературных источников [8–13] показал, что в настоящее время в СППР чаще реализуется первый подход. Однако, по мнению авторов, для большей эффективности МИС в целом и СППР в частности необходимо использовать сочетание обоих подходов, опираясь не только на базу кардиограмм, но и на базу моделей, отражающих изменение электрической активности сердца (ЭАС). Целью статьи является подготовка базы моделей ионных токов для медицинской информационной системы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Материалы и методы

В настоящее время существует большое количество МИС, основным назначением которых является поддержка принятия врачебных решений врача-кардиолога. Примеры некоторых МИС для этих целей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры медицинских информационных систем, используемых для информационной поддержки врача-кардиолога при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний

МИС	Источники данных	Назначение	Область применения	Показатели эффективности диагностики
1	2	3	4	5
2Talk4Cardiology, Сколково, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева РФ [8]	Электронные библиотеки, базы диссертаций, истории болезней, внутренняя АИС, справочники и классификаторы медицинской информации	Формирование кардиологической онтологии, поиск прецедентов, информационная поддержка при диагностике	Отделения кардиологии, сердечно-сосудистой хирургии, реанимации и интенсивной терапии	Нет данных

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
СППР для классификации аритмий [9]	Данные с устройства для амбулаторного мониторинга ЭКГ с одним отведением	Классификация 12 классов ритмов ЭКГ (10 аритмий, шум, синусовый ритм)	Амбулаторная диагностика	[AUC] = 0,97, Se = 0,83
Decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT [10]	Данные перфузионной сцинтиграфии миокарда	Диагностика ишемии и инфаркта миокарда	Отделения кардиологии	Se = 0,83, Sp = 0,83
A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome [11]	Данные ЭКГ	Диагностика синдрома Бругада	Отделения кардиологии	[AUC] = 0,96, Se = 0,88, Sp = 0,89
Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram [12]	Данные ЭКГ в 12 отведениях	Диагностика нарушений сердечного ритма и проводимости на электрокардиограммах	Отделения кардиологии	[AUC] = 0,81
Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria [13]	Данные ЭКГ, данные анализа крови	Диагностика ишемической болезни сердца	Отделения кардиологии	Se = 0,95, Sp = 0,95

Большинство рассмотренных систем предназначены для использования в клинической практике и не подходит для скрининга в условиях первичного звена здравоохранения, так как либо являются узкопрофильными (ориентированы на выявление лишь одного заболевания с высокой точностью), либо требуют уточняющих методов исследования для формирования входного набора исследуемых данных. Следовательно, для повышения качества скрининговой диагностики широкого спектра сердечно-сосудистых заболеваний необходимо разработать МИС, способную извлекать больше диагностической информации из данных, полученных скрининговыми методами исследований. По мнению авторов, этого можно достичь за счет применения расширенной базы моделей в составе МИС.

Типовая структура МИС для информационной поддержки врача представлена на рис. 1 и включает базу данных, базу моделей и программную подсистему, которая состоит из системы управления базой данных (СУБД), системы управления базой моделей (СУБМ) и системы управления интерфейсом между пользователем и компьютером [14].

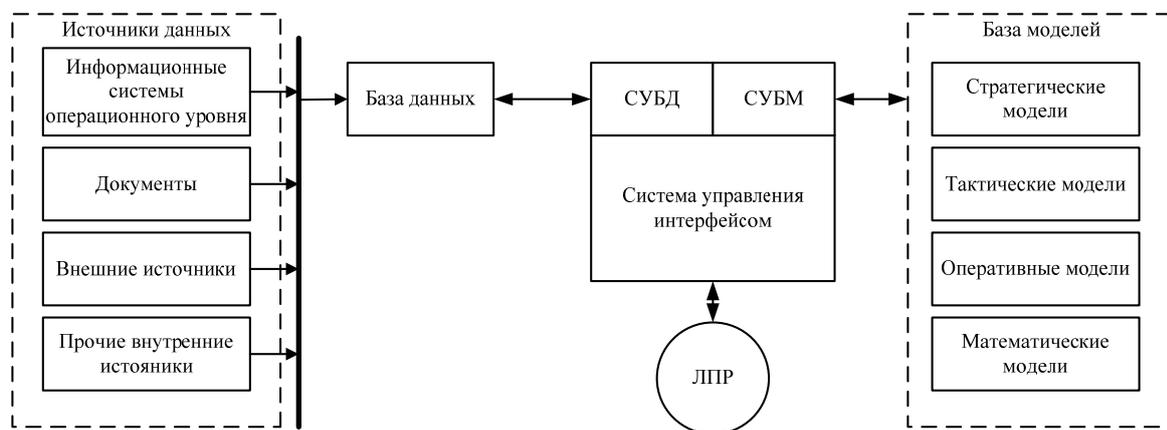


Рис. 1. Типовая структура МИС для информационной поддержки врача

Такая структура позволяет реализовать модель задачи принятия решений (ЗПР), которая в общем виде записывается следующим образом:

$$\text{ЗПР} = \langle T, A, K, X, F, G, D \rangle,$$

где T – постановка задачи; A – множество допустимых альтернатив; K – множество критериев оценки эффективности вариантов решения; X – множество методов принятия решения; F – характеристики внешних условий принятия решений; G – система предпочтений экспертов; D – решающее правило, отражающее систему предпочтения экспертов [15].

В рамках исследования задача принятия решения T формулируется как «диагностика сердечно-сосудистых заболеваний». Задача решается в условиях неопределенности (F) и по системе предпочтений экспертов (G) является индивидуальной.

При реализации методов принятия решений (X) и решающего правила (D) авторами предлагается использовать следующие модели:

- цифровой двойник сердца (ЦДС);
- компьютерная модель сердца (КМС);
- модель электрической активности сердца.

Задачей моделирования электрической активности сердца является установление взаимосвязей между основными закономерностями изменения кардиопотенциалов, известными в электрофизиологии и в электрокардиографии. Развитие компьютерной техники позволило использовать модели сердца, учитывающие анизотропию волокон, особенности потенциала действия кардиомиоцитов в миокарде [16].

Для количественного описания процессов работы сердца в норме и при различных патологиях предъявляются высокие требования к качеству моделирования и требуется сравнивать расчетные величины с данными натурных экспериментов. Для этих целей используют детальные модели. Необходимость учитывать изменение различного состава мембранных токов привело к большому разнообразию современных математических моделей кардиомиоцитов. Одной из детальных моделей является модель Нобла, согласно которой потенциал кардиомиоцита определяется суммой ионных токов dE/dt [16, 17]:

$$dE/dt = -(i_{Na} + i_{CaL} + i_{to} + i_{Kr} + i_{Ks} + i_{K1} + i_{NaCa} + i_{NaK} + i_{b,Ca} + i_{p,Na} + i_{b,Ca} + i_{b,Na} + i_{Stim})/Capacitance),$$

где i_{Na} – быстрый натриевый ток; i_{CaL} – ток ионов кальция через каналы L -типа; i_{to} – переходный ток утечки; i_{Kr} – ток калия быстрого выпрямления; i_{Ks} – ток калия медленного выпрямления; i_{K1} – ток калия внутреннего выпрямления; i_{NaCa} – ток натриево-кальциевого насоса; i_{NaK} – ток натриево-калиевого насоса; $i_{b,Ca}$ – ток плато кальция; $i_{p,Na}$ – ток плато натрия; $i_{b,Ca}$ – фоновый ток кальция; $i_{b,Na}$ – фоновый ток натрия; i_{Stim} – стимулирующий ток; $Capacitance$ – емкость мембраны.

База моделей МИС для информационной поддержки врача-кардиолога предполагает наличие эталонных моделей сравнения всех ионных токов, входящих в состав детальной модели Нобла. Таким образом, при разработке МИС необходимо формирование имитационных моделей ионных токов. В качестве среды моделирования выбран Simulink пакета MATLAB.

Результаты

Согласно модели Нобла трансмембранный потенциал (ТМПД) находится как интеграл отношения суммы ионных токов к емкости мембраны кардиомиоцита. В среде Simulink пакета MATLAB разработана обобщенная модель формирования ТМПД (рис. 2), включающая подсистему, вычисляющую общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита, постоянное значение емкости мембраны, интегратор и осциллографы для вывода сигнала ТМПД.

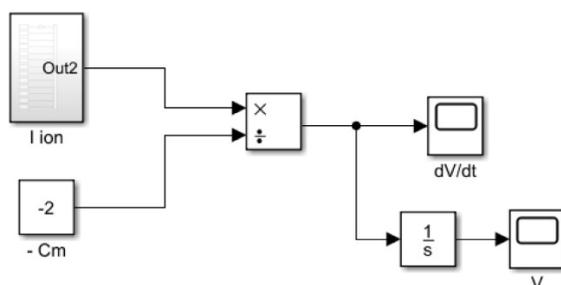


Рис. 2. Модель трансмембранного потенциала

Подсистема, вычисляющая общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита, представлена на рис. 3 и состоит из тринадцати источников ионного тока.

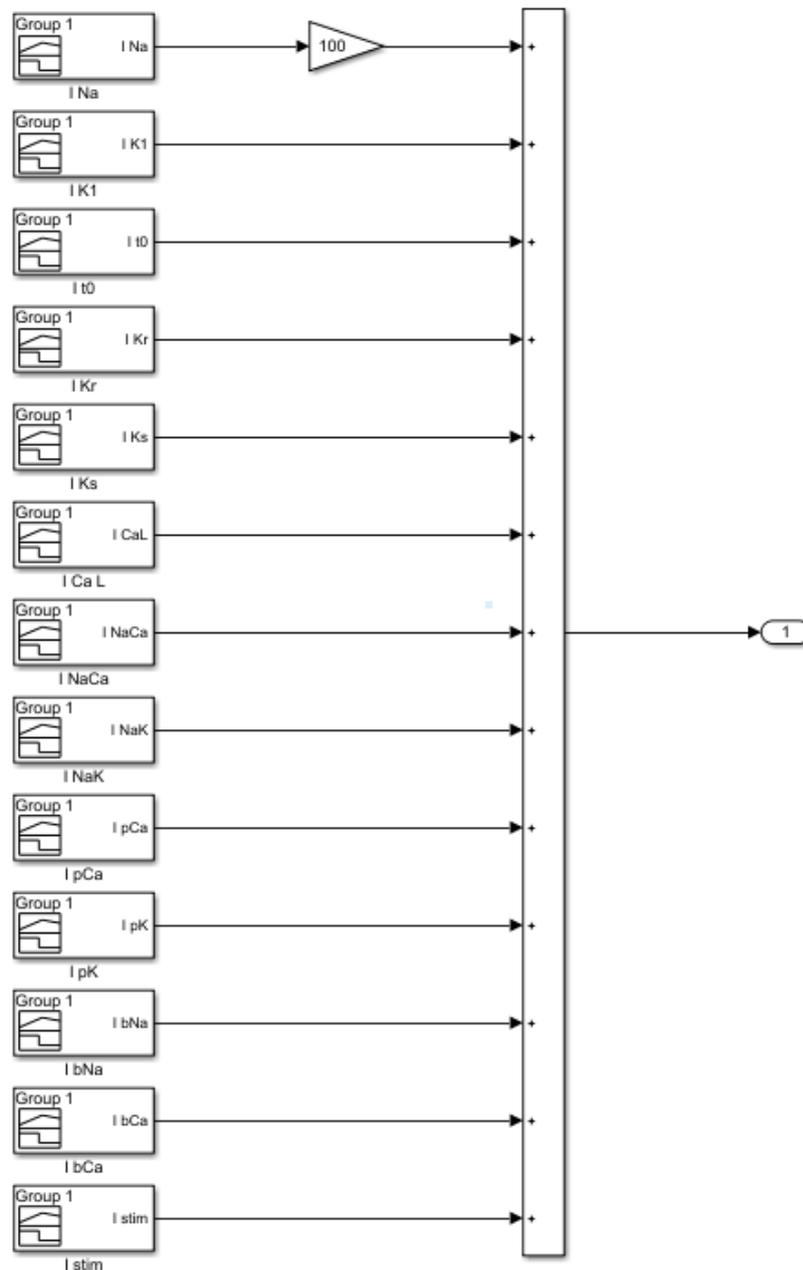


Рис. 3. Подсистема, вычисляющая общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита

Часто при построении систем, при расчете суммы ионных токов, некоторыми значениями пренебрегают как незначительными. Однако авторы считают необходимым при моделировании использовать весь набор источников, отражающих ионные токи уравнения Нобла.

Наибольший вклад в общую сумму ионных токов вносят токи калия. На рис. 4 приведены результаты моделирования для тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1} .

Центральную роль в проведении сердечного импульса в кардиомиоцитах предсердий и желудочков и в клетках системы Гиса играет натриевый канал. Натриевый канал обеспечивает быстрый поток ионов натрия внутрь клетки в фазу 0 трансмембранного потенциала действия, в результате чего происходит деполяризация мембраны кардиомиоцита [18]. Результат моделирования тока натрия представлен на рис. 5.

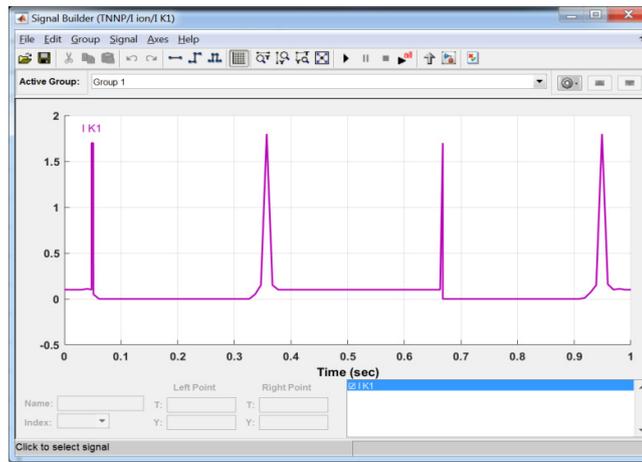
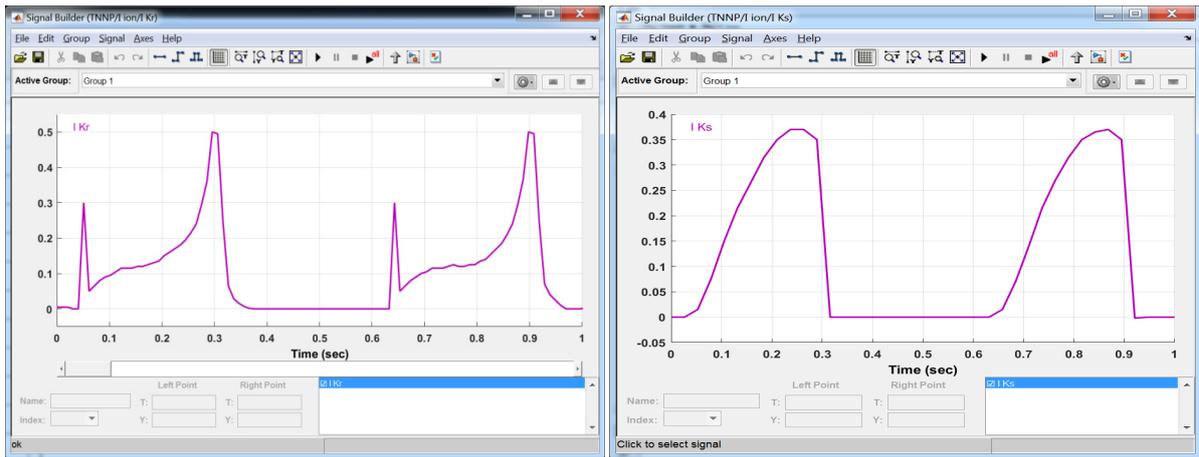


Рис. 4. Результаты моделирования тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1}

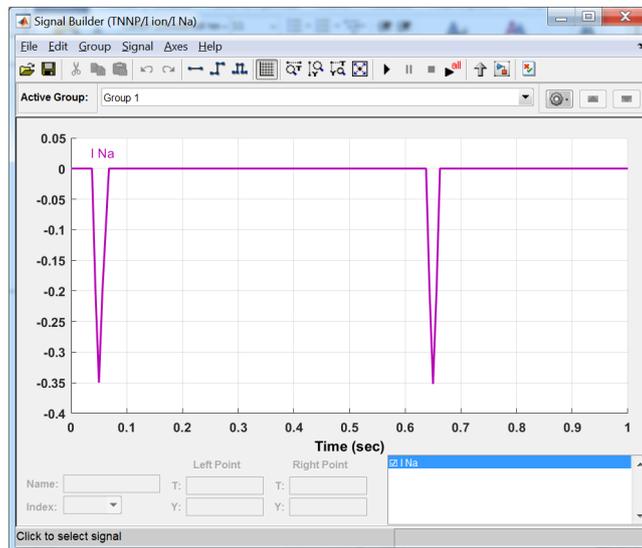


Рис. 5. Результаты моделирования тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1}

Моделирование тока кальция через каналы L -типа чаще всего выполняют при исследовании состояний, связанных с перегрузкой кардиомиоцита кальцием. При построении МИС для диагностики широкого спектра ССЗ, наличие подобных моделей, по мнению авторов, является обязательным. Результат моделирования тока ионов кальция через каналы L -типа представлен на рис. 6.

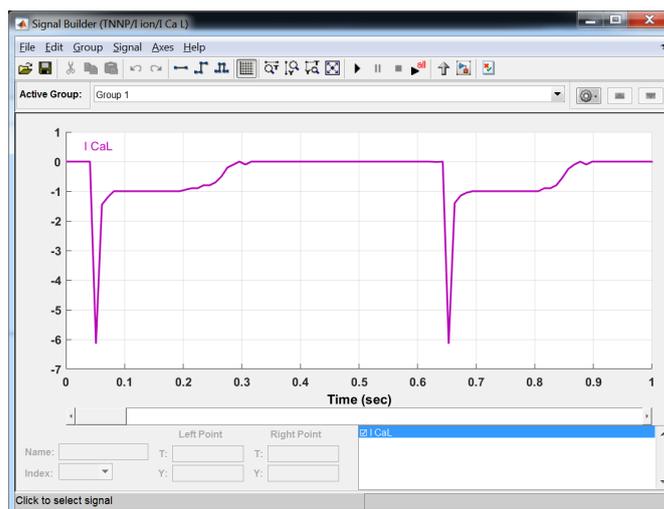


Рис. 6. Результаты моделирования тока ионов кальция через каналы L -типа

Кроме того, различные патологические состояния могут оказывать существенное влияние на активный транспорт через мембрану и работу натрий-калиевого и натрий-кальциевого насосов. Результат моделирования тока через натриево-кальциевый насос и через натриево-калиевый насос представлен на рис. 7.

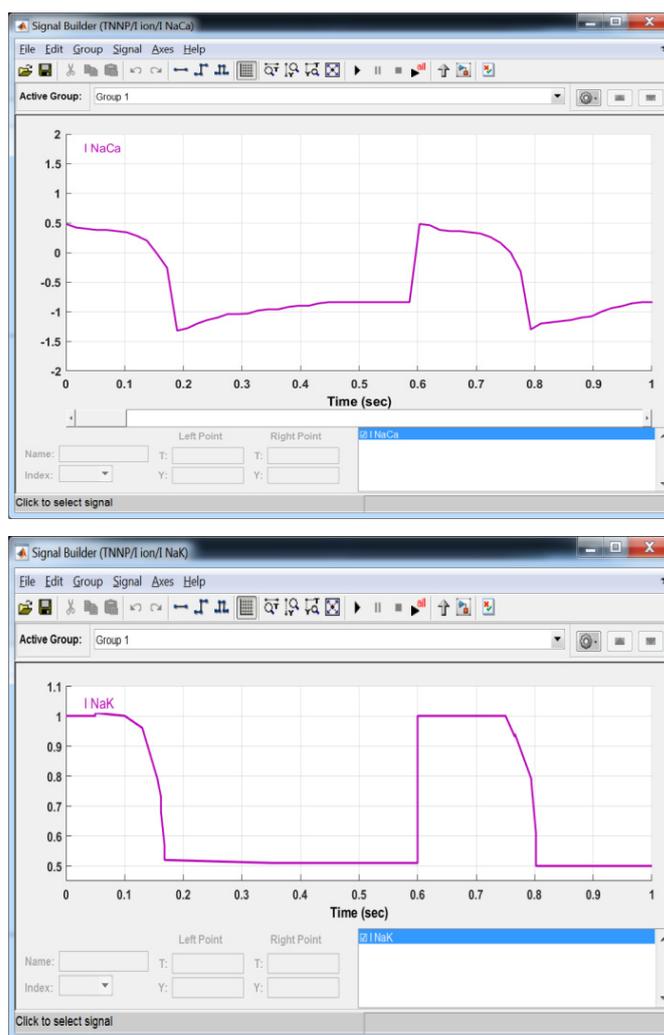


Рис. 7. Результаты моделирования тока через натриево-кальциевый насос и через натриево-калиевый насос

В дополнение к перечисленному на рис. 8 приведены результаты моделирования фоновых токов и токов плато (которыми при построении моделей ТМПД часто пренебрегают), но которые следует учитывать для повышения качества работы МИС и расширения ее функциональных возможностей.

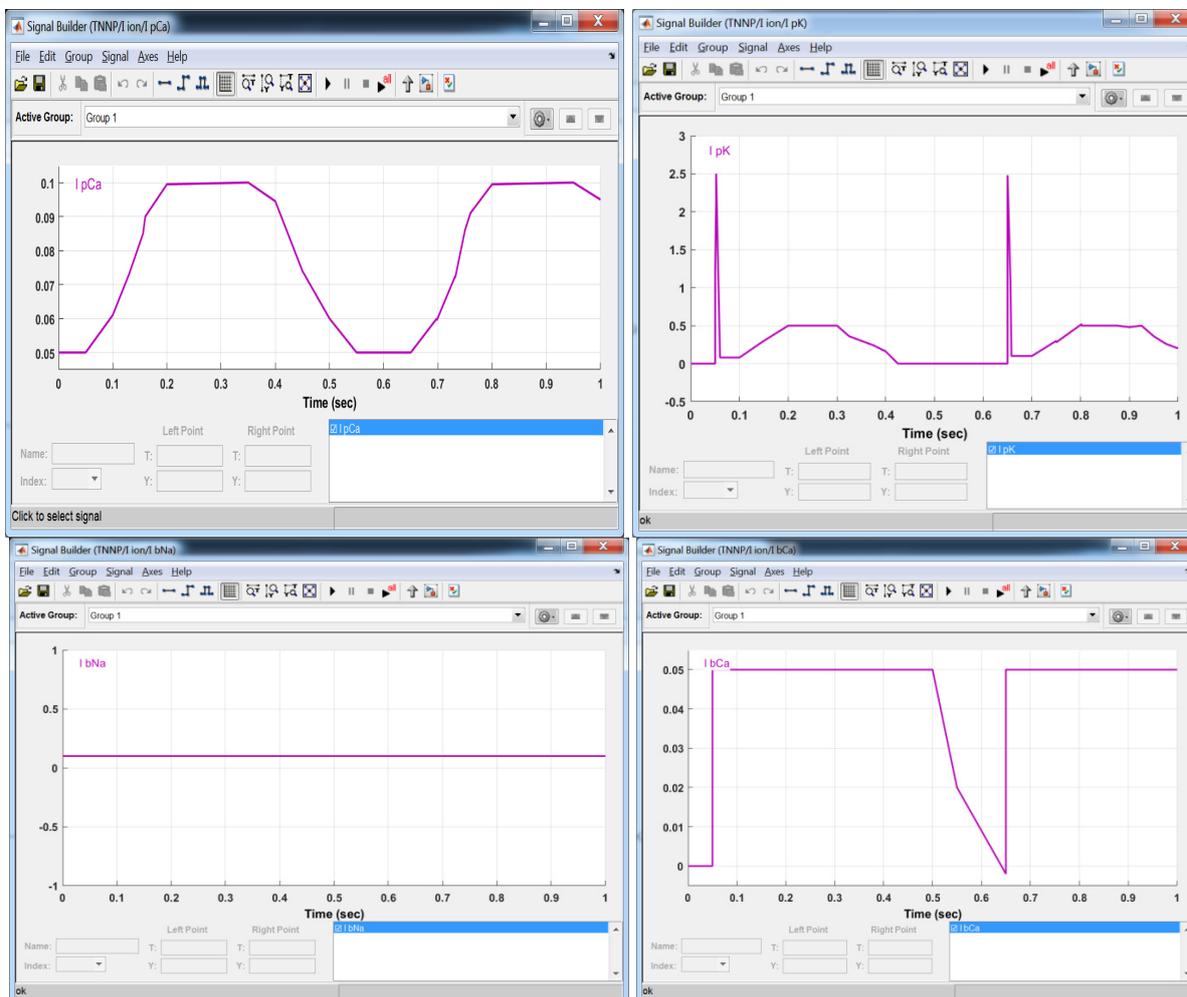


Рис. 8. Результаты моделирования фоновых токов и токов плато

Учитывая высокие требования к качеству моделирования и необходимость сравнения расчетных величин с данными натуральных экспериментов, наличие моделей всех составляющих уравнения Нобла позволит повысить точность работы МИС. При необходимости в базе моделей можно отключать некоторые источники для оценки вклада соответствующих составляющих в итоговую сумму токов, а также методическую погрешность, возникающую в случае, если той или иной составляющей решено пренебречь.

Заключение

Таким образом, для большей эффективности МИС необходимо использовать базу моделей, отражающих корректное изменение электрической активности сердца. Разработанные модели в составе базы моделей МИС позволят расширить функциональные возможности системы и выполнять качественную диагностику большого количества ССЗ.

Список литературы

1. Сон И. М., Стародубов В. И., Маношкина Е. М., Ступак В. С. Тенденции показателей заболеваемости и больничной летальности от болезней системы кровообращения на фоне новой коронавирусной инфекции COVID-19 // Профилактическая медицина. 2021. № 24. С. 7–14.

2. Барбаш О. Л., Кузнецова Т. Ю. Подготовка высокопрофессионального врача специалиста кардиолога в современных условиях: миф или реальность? К вопросу о новом федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования по специальности «Кардиология» // Российский кардиологический журнал. 2022. № 27. С. 63–68.
3. Региональная программа «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями в Пензенской области» : постановление Правительства Пензенской области. Пенза, 2019.
4. Гусев А. В., Зарубина Т. В. Поддержка принятия врачебных решений в медицинских информационных системах медицинской организации // Врач и информационные технологии. 2017. № 2. С. 60–72.
5. Gusynina Y. S., Shornikova T. A. Using the neural network in clinical systems // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1. P. 42131.
6. Istomina T. V., Petrunina E. V., Istomin V. V., Trub N. V. IOT intelligent system for medical control of the state of operators during their professional activity in extreme situations // AIP Conference Proceedings. 2021. № 1. P. 2389.
7. Спиркин А. Н., Авдеева Н. В. Выявление патологических состояний по анализу биоэлектрической активности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1. С. 75–84.
8. Система поддержки принятия медицинских решений в кардиологии, сердечно-сосудистой хирургии и анестезиологии-реаниматологии с использованием технологий интеллектуального анализа текста и извлечения знаний // 2Talk4Cardiology, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева. URL: <https://files.runet-id.com/2016/iri-forum-med16/24nov.iri-forum-med16-3-12-30-14-00--fartyshny.pdf>
9. Hannun A. Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network // Nature Medicine. 2019. Vol. 25. P. 65–69.
10. Lomsky M., Gjerthsson P., Johansson L. et al. Evaluation of a decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2008. Vol. 35. P. 1523–1529. doi: 10.1007/s00259-008-0746-9
11. Liu C. M., Liu C. L., Hu K. W. et al. A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome // Canadian Journal of Cardiology. 2022. Vol. 38. P. 152–159. doi: 10.1016/j.cjca.2021.08.014
12. Zhang D., Yang S., Yuan X., Zhang P. Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram // iScience. 2021. Vol. 24. P. 102373. doi: 10.1016/j.isci.2021.102373
13. Muhammad L. J., Algehyne E. A. Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria // Health Technol (Berl). 2021. Vol. 11. P. 319–329. doi: 10.1007/s12553-021-00531-z
14. Adewole K. S., Mojeed H. A., Ogunmodede J. A. et al. Expert System and Decision Support System for Electrocardiogram Interpretation and Diagnosis: Review, Challenges and Research Directions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 12342. doi: 10.3390/app122312342
15. Халин В. Г. Системы поддержки принятия решений : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2023. С. 494.
16. Салтыкова М. М. Современные модели электрической активности сердца и их значение в электрокардиографической диагностике // Вестник новых медицинских технологий. 2008. № 2. С. 70–73.
17. Бодин О. Н., Ломтев Е. А., Полосин Е. Г., Рахматуллоев Ф. К. Вычислительные методы электрокардиологии. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017.
18. Полосин В. Г., Бодин О. Н., Иванчуков А. Г. Анализ ионных токов эпикарда в период рефрактерности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 3. С. 54–63.
19. Андерсон А. Г. Первичные (генетически детерминированные) заболевания проводящей системы сердца и их взаимосвязь с нарушениями функции натриевого канала // Анналы аритмологии. 2005. № 2. С. 50–55.

References

1. Son I. M., Starodubov V.I., Manoshkina E.M., Stupak V.S. Trends in morbidity and hospital mortality from diseases of the circulatory system against the background of a new coronavirus infection COVID-19. *Profilakticheskaya meditsina = Preventive medicine*. 2021;(24):7–14. (In Russ.)
2. Barbash O.L., Kuznetsova T.Yu. Training of a highly professional cardiologist specialist in modern conditions: myth or reality? On the issue of the new federal state educational standard of higher education in the specialty "Cardiology". *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2022;(27): 63–68. (In Russ.)
3. *Regional'naya programma «Bor'ba s serdechno-sosudistymi zabolovaniyami v Penzenskoy oblasti»: postanovlenie Pravitel'stva Penzenskoy oblasti = Regional program "Fight against cardiovascular diseases in the Penza region": resolution of the Government of the Penza region*. Penza, 2019. (In Russ.)

4. Gusev A.V., Zarubina T.V. Support for medical decision-making in medical information systems of a medical organization. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and information technologies*. 2017;(2):60–72. (In Russ.)
5. Gusynina Y.S., Shornikova T.A. Using the neural network in clinical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1):42131.
6. Istomina T.V., Petrunina E.V., Istomin V.V., Trub N.V. IOT intelligent system for medical control of the state of operators during their professional activity in extreme situations. *AIP Conference Proceedings*. 2021;(1):2389.
7. Spirkin A.N., Avdeeva N.V. Identification of pathological conditions by analysis of bioelectric activity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(1): 75–84. (In Russ.)
8. *Sistema podderzhki prinyatiya meditsinskikh resheniy v kardiologii, serdechno-sosudistoy khirurgii i anesteziologii-reanimatologii s ispol'zovaniem tekhnologiy intellektual'nogo analiza teksta i izvlecheniya znaniy = The system of support for medical decision-making in cardiology, cardiovascular surgery and anesthesiology-resuscitation using technologies of intelligent text analysis and knowledge extraction*. 2Talk4Cardiology, Scientific Center of Cardiovascular Surgery named after A.N. Bakulev. (In Russ.). Available at: <https://files.runet-id.com/2016/iri-forum-med16/24nov.iri-forum-med16-3-12-30-14-00--fartyshny.pdf>
9. Hannun A.Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature Medicine*. 2019;25:65–69.
10. Lomsky M., Gjerdtsson P., Johansson L. et al. Evaluation of a decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2008;35:1523–1529. doi: 10.1007/s00259-008-0746-9
11. Liu C.M., Liu C.L., Hu K.W. et al. A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome. *Canadian Journal of Cardiology*. 2022;38:152–159. doi: 10.1016/j.cjca.2021.08.014
12. Zhang D., Yang S., Yuan X., Zhang P. Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram. *iScience*. 2021;24:102373. doi: 10.1016/j.isci.2021.102373
13. Muhammad L.J., Algehyne E.A. Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria. *Health Technol (Berl)*. 2021;11:319–329. doi: 10.1007/s12553-021-00531-z
14. Adewole K.S., Mojeed H.A., Ogunmodede J.A. et al. Expert System and Decision Support System for Electrocardiogram Interpretation and Diagnosis: Review, Challenges and Research Directions. *Applied Sciences*. 2022;12:12342. doi: 10.3390/app122312342
15. Khalin V.G. *Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: uchebnik i praktikum dlya vuzov = Decision support systems : textbook and workshop for universities*. Moscow: Yurayt, 2023:494. (In Russ.)
16. Saltykova M.M. Modern models of electrical activity of the heart and their significance in electrocardiographic diagnostics. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of new medical technologies*. 2008;(2):70–73. (In Russ.)
17. Bodin O.N., Lomtev E.A., Polosin E.G., Rakhmatullof F.K. *Vychislitel'nye metody elektrokardiologii = Computational methods of electrocardiology*. Penza: Izd-vo PGU, 2017. (In Russ.)
18. Polosin V.G., Bodin O.N., Ivanchukov A.G. Analysis of ion currents of the epicardium during the refractory period. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2015;(3):54–63. (In Russ.)
19. Anderson A.G. Primary (genetically determined) diseases of the conduction system of the heart and their relationship with impaired function of the sodium channel. *Annaly aritmologii = Annals of arrhythmology*. 2005;(2):50–55. (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, проезд 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)

Наталья Александровна Сержантова

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

Natalya A. Serzhantova

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

Михаил Вячеславович Едемский

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: misha.f.2015@mail.ru

Mikhail V. Edemskiy

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

Наталья Эдуардовна Кручинина

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kruchininane@gmail.com

Natalya E. Kruchinina

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

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

Поступила в редакцию/Received 14.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.06.2023

Принята к публикации/Accepted 15.08.2023

УДК 612.172.4
doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИОННЫХ ТОКОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НЕИНВАЗИВНОЙ КАРДИОДИАГНОСТИКИ

О. Н. Бодин¹, Н. А. Сержантова², М. В. Едемский³, Н. Э. Кручинина⁴

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

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbpsgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время существует чрезвычайно высокая потребность не только в разработке новых методов лечения и диагностики, но и в их более широком применении на практике из-за распространенности сердечно-сосудистых заболеваний. Повышение эффективности неинвазивных методов диагностики является одной из ключевых задач, решение которой значительно поможет в лечении сердечно-сосудистых заболеваний. Достижения современной науки, в частности биологии, биофизики и кибернетики, открывают широкие возможности для решения этой проблемы путем разработки математических моделей электрической активности сердца. *Материалы и методы.* Исследование выполнено на основе анализа известных детальных моделей ионных токов. *Результаты.* Предложена система неинвазивной кардиодиагностики, использующая детальные модели ионных токов для определения электрофизиологических характеристик сердца. *Выводы.* Полученные результаты повышают эффективность существующих методов и средств определения электрофизиологических характеристик сердца.

Ключевые слова: трансмембранный потенциал действия, модель Ходжкина – Хаксли, модель Luo – Rudy, Модель Tusscher – Noble – Noble – Panfilov, Модель Iyer – Mazhari – Winslow, система неинвазивной кардиодиагностики

Для цитирования: Бодин О. Н., Сержантова Н. А., Едемский М. В., Кручинина Н. Э. Использование детальных моделей ионных токов в информационной системе неинвазивной кардиодиагностики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-8

USE OF DETAILED MODELS OF ION CURRENTS IN THE INFORMATION SYSTEM OF NON-INVASIVE CARDIAC DIAGNOSIS

O.N. Bodin¹, N.A. Serzhantova², M.V. Edemsky³, N.E. Kruchinina⁴

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

³ Penza State University, Penza, Russia

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbpsgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Abstract. *Background.* Currently, there is an extremely high need not only for the development of new methods of treatment and diagnosis, but also for their wider application in practice due to the prevalence of cardiovascular diseases. Improving the effectiveness of non-invasive diagnostic methods is one of the key tasks, the solution of which will significantly help in the treatment of cardiovascular diseases. The achievements of modern science, in particular biology, biophysics and cybernetics, open up wide opportunities for solving this problem by developing mathematical models of the electrical activity of the heart. *Materials and methods.* The study is based on the analysis of known detailed models of ion currents. *Results.* A system of noninvasive cardiodynamics using detailed models of ion currents to determine the electrophysiological characteristics of the heart is proposed. *Conclusions.* The results obtained increase the effectiveness of existing methods and means for determining the electrophysiological characteristics of the heart.

Keywords: transmembrane action potential, Hodgkin – Huxley model, Luo – Rudy model, Tusscher – Noble – Noble – Panfilov model, Iyer – Mazhari – Winslow model, noninvasive cardiodynamics system

For citation: Bodin O.N., Serzhantova N.A., Edemsky M.V., Kruchinina N.E. Use of detailed models of ion currents in the information system of non-invasive cardiac diagnosis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-8

Введение

В кардиологии очень давно проводятся измерения электрофизиологии сердца. Электрические сигналы, которые могут быть измерены, охватывают диапазон от неинвазивных измерений электрокардиографии (ЭКГ) и поверхностных потенциалов тела до подробных инвазивных измерений локальной электрофизиологии тканей. Эти электрофизиологические измерения формируют важнейший компонент диагностики и мониторинга пациентов, однако для современных клинических методов лечения аритмий этой информации недостаточно. Для диагностики того или иного заболевания зачастую используют информацию, включающую прямое распределение электрических полей по внешней или внутренней поверхности сердца.

Важным является современное понимание основ заболеваний сердца и внутриклеточных механизмов действия препаратов от аритмий, которое зависит от системы формирования трансмембранного потенциала действия (ТМПД), его фаз и задействованных ионных токов. Электрофизиологические свойства миокарда и проводящей системы сердца определяются основными характеристиками потенциала действия. Изменения этих свойств, вызванные патологическими процессами, дисбалансом электролитов или фармакологическими эффектами, могут привести к нарушению сердечного ритма или закупорке. В работах Л. И. Титомира [1, 2] приведены фундаментальные основы образования электрического поля миокарда во внешней проводящей среде. Ионные токи, генерируемые клетками миокарда, протекают в окружающей среде миокарда и вызывают изменение электрического поля в ней. Они могут быть выявлены и количественно оценены с помощью объемной плотности дипольных моментов.

Материалы и методы

Современные системы диагностики сердца [3–7] предлагают неинвазивное исследование электрофизиологических характеристик сердца, расширяя тем самым возможности стандартных методов электрокардиографии (ЭКГ). Именно такие способы организации функционирования кардиодиагностических систем (КДС) (рис. 1) позволяют объединять решения обратной и прямой задач электрокардиографии [8].



Рис. 1. Этапы функционирования КДС

Одним из недостатков существующих методов определения электрофизиологических характеристик сердца является отсутствие данных о составляющих ионных токах эпикарда.

Актуальные детальные модели расширяют и углубляют подход Ходжкина – Хаксли, пополняясь новыми данными специфики сердца. Рассмотрим подробнее модели ионных токов, которые используются для анализа входящих в состав ионных токов во время развития ТМПД.

1. Модель Luo – Rudy (LR) описывает ТМПД [9] и содержит основные структурные элементы для описания проводимости через мембрану. Модель содержит несколько нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающих динамическое изменение внутриклеточной концентрации ионов и кинетические изменения ионных каналов, которые используются для получения макроскопических ионных токов через каналы. Скорость изменения мембранного потенциала (v) определяется следующим образом:

$$\frac{dV}{dt} = - \left(\frac{1}{C_m} \right) (I_{ion} + I_{st}),$$

где V – мембранный потенциал; C_m – мембранная емкость; I_{ion} – сумма шести ионных токов; I_{st} – стимулирующий ток (внешнее воздействие). Эта модель завоевала популярность благодаря своему элегантному и практичному формализму и, что наиболее важно, реалистичному моделированию электрофизиологического и патологического поведения сердечной клетки.

2. Модель Priebe – Beuckelmann (PB), состоящая из 22 переменных, была разработана для изучения клеточных электрофизиологических последствий сердечной недостаточности и аномального автоматизма и была получена из модели *LR* с пятью ионными токами, основанной на экспериментах с человеческими миоцитами [10, 11]. Пять основных ионных токов, включая быструю (I_{Kr}) и медленную (I_{Ks}) составляющие тока K , ток Ca^{2+} *L*-типа (I_{Ca}), переходный внешний ток K (I_{to}) и внутренний выпрямительный ток K (I_{K1}) основаны на экспериментальных данных, полученных на миоцитах человека. Кроме того, обработка параметров внутриклеточной концентрации Ca^{2+} была изменена таким образом, чтобы смоделированные переходные процессы были сопоставимы с наблюдаемыми экспериментальными данными о миоцитах человека. Оставшиеся входные токи были скорректированы на основе модели *LR*, а их амплитуда масштабирована в соответствии с данными клеток человека. Прибе и Бекельманн разработали свою модель для сравнения электрофизиологических свойств отказывающихся и неработающих миоцитов желудочков. Она может быть использована для точного моделирования ионных токов и концентраций в одной ячейке во время электрической активности.

3. Модель Tusscher – Noble – Noble – Panfilov (TNNP) [12]. В этой модели используются формулы для всех основных ионных токов, основанные на гораздо более широкой базе экспериментальных данных, преимущественно из экспериментов с клетками желудочков человека. Модель TNNP была сконструирована таким образом, чтобы сформировать компромисс между значительным уровнем физиологической детализации и вычислительной эффективностью. Здесь:

$$\frac{dV}{dt} = - \left(\frac{I_{ion}}{C_m} \right),$$

где $C_m = 2$ мкФ/см² – емкость ячейки на единицу площади поверхности; $I_{ion} = I_{Na} + I_{K1} + I_{to} + I_{Kr} + I_{Ks} + I_{CaL} + I_{NaCa} + I_{NaK} + I_{pCa} + I_{pK} + I_{bCa} + I_{bNa}$, где I_{Na} – быстрый ток Na^+ ; I_{CaL} – ток Ca^{2+} *L*-типа; I_{to} – переходный внешний ток; I_{Kr} – ток выпрямления с быстрой задержкой; I_{Ks} – ток выпрямителя с медленной задержкой; I_{K1} – ток внутреннего выпрямления K^+ ; I_{NaCa} – ток обменника Na^+ / Ca^{2+} ; I_{NaK} – ток накачки Na^+ / K^+ ; I_{pCa} и I_{pK} – это токи Ca^{2+} и K^+ на плато, а I_{bCa} и I_{bNa} – фоновые токи Ca^{2+} и Na^+ .

4. Модель Iyer – Mazhari – Winslow (IMW) [9, 13] обеспечивает описание эпикардального желудочкового миоцита человека и примечательна тем, что включает представления цепи Маркова для шести трансмембранных токов, а также рианодин-чувствительного канала (RyR). Из-за широкого использования марковских описаний используется большое количество переменных, всего 67: напряжение; 13 состояний для быстрого Na^+ канала; по 10 состояний для быстрого и медленного переходных внешних K^+ каналов; 5 состояний для быстрой составляющей K^+ канала выпрямления с задержкой; 4 состояния для медленного компонента K^+ канала замедленного выпрямления; 11 состояний для канала Ca^{2+} *L*-типа; 4 состояния для канала RyR; 1 стробирующая переменная; концентрации Ca^{2+} в цитоплазме, 2 во утриклеточных накопителях и ограниченном подпространстве; внутриклеточные концентрации Na^+ и K^+ и фракция Ca^{2+} -связанных высокоаффинных и низкоаффинных тропониновых участков.

Детальные модели *LR*, *PB*, *TNNP* и *IMW* позволяют решить прямую задачу – определение развития ТМПД по известным значениям ионных токов. При решении обратной задачи – определение значений ионных токов по известной фме ТМПД – может существовать большое количество решений, зависящих от случайных величин. Детальные модели *LR*, *PB*, *TNNP* и *IMW* также требуют объема проводимых вычислений, что ограничивает их применение при рассмотрении распространения потенциала и возникновения риентри в миокарде.

5. Упрощенная модель образования ТМПД при риентри [14] моделирует аритмические процессы на основе учета особенностей рефрактерного периода возбуждения миокарда и функционирования ионных каналов миокарда. В этой модели трансмембранный потенциал \tilde{V} удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} = (\nabla \cdot D \nabla) - \frac{I_{ion} - I_{stim}}{C_m},$$

где ∇ – оператор Набла; D – тензор анизотропной диффузии; I_{ion} – представляет собой сумму ионных токов, протекающих через клеточную мембрану; I_{stim} – представляет собой ток внешнего воздействия; C_m – мембранная емкость.

6. Применение вероятностных (стохастических) моделей для описания компонентов ионных токов, протекающих через эпикард [13]. Так как с помощью одних и тех же ионов генерируются токи, формирующие ТМПД и проходящие через эпикард, то возможно использование токов детальных моделей для формирования стохастической модели тока. В данной модели определения составляющих ионных токов вводится понятие формы плотности распределения информационно-измерительного кванта (ИИК) γ стохастических моделей ионных токов, которая аналогична форме плотности распределения ионных токов реполяризации эпикарда. Благодаря этому для построения стохастических моделей возможно использование детальных моделей ионных токов. ИИК определяется для выборок значений потенциала эпикарда в опорных точках компьютерной модели сердца для одного кардиоцикла: $\gamma = \Delta\phi\Delta t$, где Δt – время, необходимое для получения одного отсчета; $\Delta\phi = \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{\sqrt{N}}$ – мера ИИК, ϕ_{max} , ϕ_{min} – максимальное и минимальное значение, N – число отсчетов в выборке значений потенциала эпикарда в опорных точках компьютерной модели сердца. С помощью аппроксимирующей функции соответствующей формы возможно построение вероятностной модели распределения составляющих ионного тока реполяризации эпикарда.

Результаты и обсуждение

Возможность получения потенциала эпикардиальной поверхности с помощью ЭКГ-исследования, посредством решения обратной задачи, позволяет оценить компоненты ионных токов в миокарде.

Предлагаемый алгоритм работы системы неинвазивной диагностики сердца (рис. 2) дает возможность улучшить качество диагностики, предоставляя медицинским работникам новую диагностическую информацию.

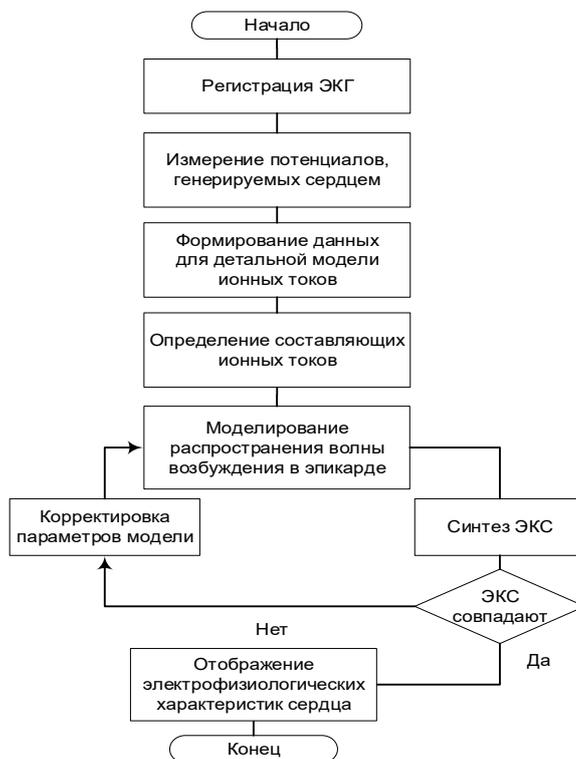


Рис. 2. Алгоритм работы предлагаемой кардиодиагностической системы

Реализация этой возможности осуществляется с помощью построения детальных моделей ионных токов и последующего определения электрофизиологических характеристик сердца с новыми исходными данными.

Анализ потенциала на эпикардиальной поверхности во время возбужденного состояния сердца, по мнению авторов, дает возможность получить данные об ионном обмене в клетках миокарда. Эта информация имеет важное значение для постановки медицинского диагноза и лечения. Результаты моделирования тока реполяризации эпикарда представлены на рис. 3.

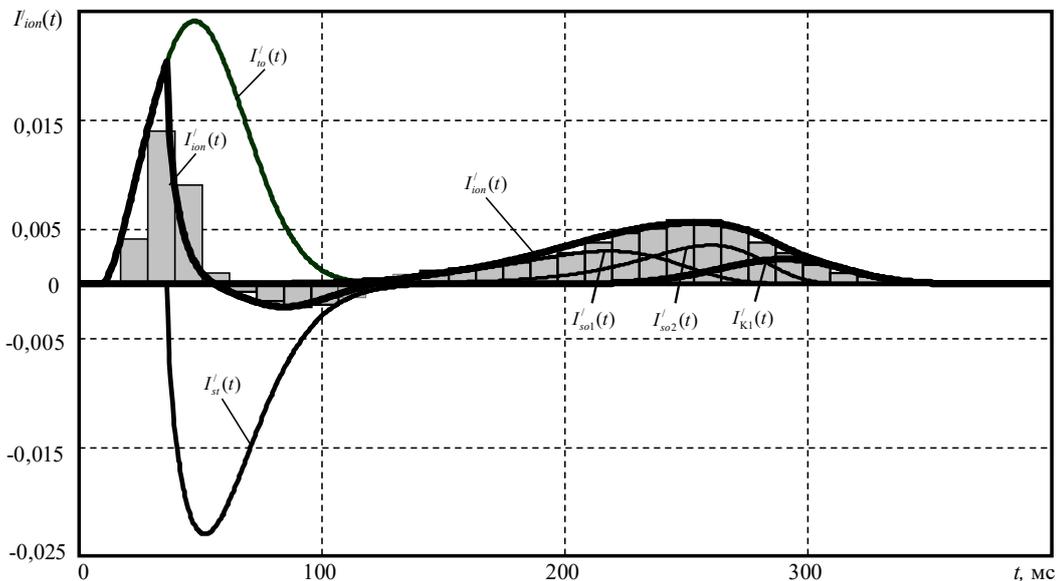


Рис. 3. Результаты моделирования тока реполяризации эпикарда:

$I'_{k1}(t)$ – ток аномального выпрямления; $I'_{st}(t)$ – замедленный деполяризующий ток кальция;
 $I'_{so1}(t)$ – ток быстрого задержанного выпрямления; $I'_{so2}(t)$ – ток медленного задержанного выпрямления;
 $I'_{ion}(t)$ – ток реполяризации эпикарда; $I'_{io}(t)$ – переходной транзитный ток эпикарда

Предлагаемую кардиодиагностическую систему можно разделить на три блока: блок измерения, в котором регистрируется электрокардиосигнал (ЭКС) и измеряются потенциалы, генерируемые сердцем; блок расчетов, в котором формируются данные для детальной модели ионных токов и определяются составляющие ионных токов, синтезируется модельный ЭКС, моделируется распространение волны возбуждения в эпикарде; блок проверки, в котором сравнивается смоделированный ЭКС с зарегистрированным ЭКС, проводится корректировка параметров модели и с помощью средств компьютерной обработки изображений электрофизиологические характеристики сердца визуализируются на трехмерной модели сердца.

Заключение

Для успешной реализации нового методологического подхода к диагностике, безусловно, необходимо наличие глубоких теоретических и практических исследований, в том числе широкого спектра математических методов анализа, обработки электрокардиографических данных, моделирования и визуализации сердечных заболеваний, а также клинической валидации. Моделирование ТМПД стало ценным инструментом для изучения и понимания сложных явлений электрофизиологии сердца. Модели сыграли важную роль в этой области и поддерживают испытания новых лекарств, разработку новых медицинских устройств и неинвазивных методов диагностики.

Список литературы

1. Титомир Л. И., Кнеппо П., Трунов В. Г., Айду Э. А. И. Биофизические основы электрокардиофизических методов. М. : Физматлит, 2009. 224 с.
2. Титомир Л. И. Электрический генератор сердца. М. : Наука, 1980. 371 с.

3. Кардиоанализаторы девятиканальные компьютеризированные ЭК9Ц-01-"КАРД". URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/26135-03-ek9ts-01-kard-24315> (дата обращения: 20.06.2023).
4. Кардиоанализаторы Анкар-131. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17127-98-ankar-131-10911> (дата обращения: 21.06.2023).
5. Электрокардиографы компьютерные восьмиканальные «Поли-Спектр-8». URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/27961-04-poli-spektr-8-poli-spektr-8-evns-ritm-vns-mikro-26788> (дата обращения: 21.07.2023).
6. Электрокардиоанализаторы компьютерные ЭК12К-01 «Альтон». URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/24246-09-ek12k-01-alton-21642> (дата обращения: 21.06.2023).
7. Кардиоанализаторы Анкар-131. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17127-98-ankar-131-10911> (дата обращения: 19.07.2023).
8. Бодин О. Н. Методы и средства обработки кардиографической информации. Пенза, 2008.
9. Modelsofcardiaccell. URL: http://www.scholarpedia.org/article/Models_of_cardiac_cell#Iyer-Mazhari-Winslow_model_282004.29_5B_67_variables.5D (дата обращения: 25.06.2023).
10. Ten Tusscher K. H. W. J., Bernus O., Hren R., Panfilov A. V. Comparison of electrophysiological models for human ventricular cells and tissues // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2006.
11. Shuaiby M., Hassan M. A., Sharkawy A.-B., Gadelmoula A. A Finite Element Model for the Electrical Activity in Human Cardiac Tissues // *Journal of Ecology of Health & Environment*. 2013. Vol. 1, № 1.
12. Bernus, Wilders, Zemlin, Vershelde, Panfilov. 2002. URL: <https://models.cellml.org/e/5/view>, свободный (дата обращения: 26.06.2023).
13. Патент 2615286 Российская Федерация, А61В 5/0402 (2006.01), А61В 6/00 (2006.01). Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н. [и др.]. № 2016120449 ; заявл. 25.05.2016 ; опубл. 04.04.2017.
14. Pecaranda A., Cantalapiedra I. R., Bragard J., Echebarria B. Cardiac dynamics: a simplified model for action potential propagation // *Theoretical Biology and Medical Modelling*. 2012.

References

1. Titimir L.I., Кнеппо Р., Трунов В.Г., Аюду Е.А.И. *Биофизические основы электрокардиофизических методов = Biophysical foundations of electrocardiophysical methods*. Moscow: Fizmatlit, 2009:224. (In Russ.)
2. Titimir L.I. *Elektricheskiy generator serdtsa = Electric generator of the heart*. Moscow: Nauka, 1980:371. (In Russ.)
3. *Kardioanalizatory devyatikanal'nye komp'yuterizirovannye EK9Ts-01-"KARD" = Cardioanalyzers nine-channel computerized EK9TS-01-"CARD"*. (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/26135-03-ek9ts-01-kard-24315> (accessed 20.06.2023).
4. *Kardioanalizatory Ankar-131 = Cardiac analyzers Ankara-131*. (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/17127-98-ankar-131-10911> (accessed 21.06.2023).
5. *Elektrokardiografy komp'yuternye vos'mikanal'nye «Poli-Spektr-8» = Electrocardiographs computer eight-channel "Poly-Spectrum-8"*. (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/27961-04-poli-spektr-8-poli-spektr-8-evns-ritm-vns-mikro-26788> (accessed 21.07.2023).
6. *Elektrokardioanalizatory komp'yuternye EK12K-01 «Al'ton» = Electrocardioanalysts computer EK12K-01 "Alton"*. (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/24246-09-ek12k-01-alton-21642> (accessed: 21.06.2023).
7. *Kardioanalizatory Ankar-131 = Cardiac analyzers Ankara-131*. (In Russ.). Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/17127-98-ankar-131-10911> (accessed 19.07.2023).
8. Bodin O.N. *Metody i sredstva obrabotki kardiograficheskoy informatsii = Methods and means of processing cardiographic information*. Penza, 2008. (In Russ.)
9. *Modelsofcardiaccell*. Available at: http://www.scholarpedia.org/article/Models_of_cardiac_cell#Iyer-Mazhari-Winslow_model_282004.29_5B_67_variables.5D (accessed 25.06.2023).
10. Ten Tusscher K.H.W.J., Bernus O., Hren R., Panfilov A.V. Comparison of electrophysiological models for human ventricular cells and tissues. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2006.
11. Shuaiby M., Hassan M.A., Sharkawy A.-B., Gadelmoula A. A Finite Element Model for the Electrical Activity in Human Cardiac Tissues. *Journal of Ecology of Health & Environment*. 2013;1(1).
12. *Bernus, Wilders, Zemlin, Vershelde, Panfilov*. 2002. Available at: <https://models.cellml.org/e/5/view>, свободный (accessed 26.06.2023).
13. Patent 2615286 Russian Federation, А61В 5/0402 (2006.01), А61В 6/00 (2006.01). Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart. Bodin O.N. et al. No. 2016120449; appl. 25.05.2016; publ. 04.04.2017. (In Russ.)
14. Pecaranda A., Cantalapiedra I.R., Bragard J., Echebarria B. Cardiac dynamics: a simplified model for action potential propagation. *Theoretical Biology and Medical Modelling*. 2012.

*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, проезд 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)

Наталья Александровна Сержантова

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

Natalya A. Serzhantova

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

Михаил Вячеславович Едемский

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: misha.f.2015@mail.ru

Mikhail V. Edemskiy

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

Наталья Эдуардовна Кручинина

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kruchininane@gmail.com

Natalya E. Kruchinina

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

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

Поступила в редакцию / Received 22.06.2023

Поступила после рецензирования / Revised 24.07.2023

Принята к публикации / Accepted 21.08.2023