

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Крамм М. Н., Шерстнев В. В.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

5

**Чебурахин И. Н., Трофимов А. А., Ярославцева Д. А.,
Здобнов С. А., Тюрин М. В.**
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ДАТЧИКА
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

17

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Кириллов А. Г., Сакевич В. Н.
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПЛЕНОЧНЫХ ШКАЛ И ПОВЕРКИ ПРИБОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

27

Дорохов А. Н., Ковалевский С. Г., Лукичев А. В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ПОДМЕННОГО ФОНДА
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕДОМСТВЕННЫХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

35

Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П., Плаксунов Р. Ф.
УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ УПК-30ПТ

44

Нефедьев А. И., Гусев В. Г., Нефедьев Д. И., Шаронова В. Г.
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА
В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

51

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Уткин К. Э., Колосов П. А., Цыпин Б. В., Макаров И. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
РЕЗИСТОРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

58

Шачнева Е. А.

СПОСОБЫ ЮСТИРОВКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО
ДАТЧИКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

65

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Крамм М. Н., Чувькин Б. В.

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

73

Спиркин А. Н.

БИОНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННЫМ МЕХАНИЗМОМ

84

Антипенко В. В., Кульков В. Н., Печерская Е. А., Антипенко С. А.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТИЖЕНИЯ
ЭФФЕКТА ТРАНСМУРАЛЬНОСТИ

92

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Bezborodova O. E., Bodin O. N., Kramm M. N., Sherstnev V. V.

ENSURING THE EFFICIENCY OF INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEMS

5

Cheburakhin I. N., Trofimov A. A., Yaroslavtseva D. A.,

Zdobnov S. A., Tyurin M. V.

SIMULATION OF A HIGH-TEMPERATURE THIN-FILM SENSOR
OF THE GAUGE PRESSURE MEASURING SYSTEM

17

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Kirillov A. G., Sakevich V. N.

AUTOMATED SYSTEM FOR MAKING THE FILM DIALS
AND VALIDATION OF THE INSTRUMENT PANELS

27

Dorokhov A. N., Kovalevsky S. G., Lukichev L. V.

DETERMINATION OF THE VOLUME OF THE REPLACEMENT
FUND OF MEASUREMENTS INSTRUMENTS
DURING VERIFICATION IN THE DEPARTMENTAL
METROLOGICAL UNITS

35

Ilin A. S., Kostrikina I. A., Voronov A. P., Plaksunov R. F.

INSTALLATION FOR VERIFICATION
OF KILOVOLTMETERS UPK-30PT

44

Nefed'ev A. I., Gusev V. G., Nefed'ev D. I., Sharonova V. G.

SPARK DISCHARGE PARAMETERS CONTROL IN THE INTERNAL
COMBUSTION ENGINE

51

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Utkin K. E., Kolosov P. A., Tsypin B. V., Makarov I. V.

THEORETICAL ASPECTS OF PULSE-CURRENT STABILIZATION
OF RESISTANCE OF THIN-FILM RESISTORS
OF PRIMARY CONVERTERS

58

Shachneva E. A.

MAIN TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FIBER-OPTIC FLUID
FLOW VELOCITY SENSOR AND SENSOR'S ADJUSTMENTS

65

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Bezborodova O. E., Bodin O. N., Kramm M. N., Chuvykin B. V.

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES
IN MEDICAL INFORMATION SYSTEMS

73

Spirkin A. N.

BIONIC METHODS OF CONTROL OF A ROBOTIC MECHANISM

84

Antipenko V. V., Kulkov V. N., Pecherskaya E. A., Antipenko S. A.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE FUNCTIONING
OF THE SYSTEM TO DETERMINE ACHIEVING THE EFFECT
OF TRANSMURALITY

92

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 167.2 + 658

DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-1

О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, В. В. Шерстнев

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

О. Е. Bezborodova, O. N. Bodin, M. N. Kramm, V. V. Sherstnev

ENSURING THE EFFICIENCY OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС) – это совокупность технических средств, выполненных в блочно-модульном исполнении, объединенных общим алгоритмом функционирования, обладающих набором нормированных метрологических характеристик и предназначенных для автоматического (автоматизированного) получения информации непосредственно от объекта, преобразования ее, передачи, измерения, обработки, хранения и представления в форме, доступной для восприятия лицом, принимающим решение, и формирования управляющего воздействия на объект. Отличительной особенностью рассматриваемой в статье ИИУС является наличие в ее составе интеллектуальных агентов, которые в процессе работы системы непрерывно адаптируются к изменяющимся условиям функционирования. Целью является обеспечение оптимального функционирования ИИУС на основе иерархической структуры управления с использованием клонирования и коалиции интеллектуальных агентов. **Материалы и методы.** Использованы методы системного анализа для выбора показателей ИИУС, характеризующих ее эффективность. Показано, что система ключевых показателей эффективности *KPI* является индикатором соответствия уровня текущих показателей ИИУС стратегическим целям. **Результаты.** Предложенный в статье усовершенствованный алгоритм функционирования интеллектуальных агентов на основе клонирования и образования коалиций обеспечивает анализ результатов измерений и воздействие на объект управления. Обоснована синергетическая эффективность в режиме нормального функционирования ИИУС и при выходе из строя отдельных агентов на примере использования беспилотных воздушных судов, обеспечивающих оперативность и своевременность сбора и представления информации при мониторинге территориальной техносферы. **Выводы.** Предлагаемая концепция построения ИИУС является инструментом анализа эффективности и позволяет оптимизировать структуру и функционирование ИИУС по Парето, когда значение каждого частного показателя, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

A b s t r a c t. Background. Information-measuring and control systems (IMS) are a set of technical means made in a block-modular design, united by a common algorithm of functioning, having a set of normalized metrological characteristics and intended for automatic (auto-

mated) obtaining information directly from an object, transforming it, transmitting it, measurement, processing, storage and presentation in a form accessible for perception by the decision-maker, and the formation of a control action on the object. A distinctive feature of the IMS considered in the article is the presence of intelligent agents in its composition, which, in the process of the system's operation, continuously adapt to changing operating conditions. The aim is to ensure the optimal functioning of the IMS on the basis of a hierarchical management structure using cloning and a coalition of intelligent agents. **Materials and methods.** The methods of system analysis were used to select the indicators of the IMS that characterize its effectiveness. It is shown that the system of key performance indicators – KPI, is an indicator of the compliance of the level of current indicators of the IMS with strategic goals. **Results.** The proposed in the article an improved algorithm for the functioning of intelligent agents based on cloning and coalition formation provides an analysis of measurement results and impact on the control object. Synergetic efficiency is substantiated in the normal operation of the IMS and in the event of failure of individual agents on the example of the use of unmanned aerial vehicles, which ensure the efficiency and timeliness of collecting and presenting information when monitoring the territorial technosphere. **Conclusions.** The proposed concept of building an IMS is a tool for analyzing efficiency and allows you to optimize the structure and functioning of the IMS by Pareto, when the value of each particular indicator characterizing the system cannot be improved without deteriorating others.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная и управляющая система, интеллектуальный агент, показатели эффективности, синергетическая эффективность.

Key words: information-measuring and control system, intelligent agent, performance indicators, synergistic efficiency.

Актуальность

Обеспечение эффективности сбора и обработки данных необходимо для гарантированной безотказной работы информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС). В данном случае речь идет об интеллектуализации процессов сбора и обработки данных и о возможности быстрой адаптации ИИУС к изменяющимся требованиям внешней среды.

Техногенные объекты (ТО) – это сложные системы, состоящие из большого количества подсистем (агентов), которые работают при изменяющихся внутренних и внешних условиях, адекватно реагируя на эти изменения. Поэтому безаварийное функционирование ТО не может быть обеспечено без участия ИИУС.

Мультиагентная система (МАС), входящая в состав ИИУС, направлена на обеспечение эффективности и надежности работы контролируемого ТО. Это достигается гибкой согласованной корректировкой функционирования контролируемого объекта в ответ на изменения во внешней среде в зависимости от возникающих событий. В результате с помощью МАС параллельно осуществляются процессы сбора данных, анализа, планирования, оптимизации, мониторинга и контроля состояния ТО в режиме реального времени, что обеспечивает повышение эффективности функционирования объекта.

МАС состоят из иерархии интеллектуальных агентов (ИА), когда ИА верхнего уровня получает только те данные, которые нужны ему для работы, и координирует работу подчиненных ИА, но не диктует им, какие действия выполнять.

В работе [1] предложена МАС с возможностью клонирования и организации коалиций ИА – *MASL (MultiAgent System Logic)*. Недостатками *MASL* являются: отсутствие иерархии ИА и механизма разрешения конфликтов ИА с внешней средой при невозможности ИА выполнить поставленную задачу.

В работе [2] предложена МАС, работа которой строится на согласовании значений ключевых показателей эффективности (*Key Performance Indicator – KPI*) с учетом их иерархичности и взаимосвязанности.

Целью данной работы является обеспечение оптимального функционирования ИИУС на основе иерархической структуры МАС с использованием клонирования и коалиции ИА.

Постановка проблемы

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

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

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

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

При этом у любой ИИУС ресурсы для достижения стратегических, тактических или оперативных целей ограничены. Поэтому задача оптимизации ресурсов в ИИУС может быть сформулирована двояко. Во-первых, при ограниченных ресурсах добиться глобального максимума векторной целевой функции ИИУС, т.е. надо хранить больше данных в выделенном пространстве, быстрее производить вычисления, не потребляя и не выделяя слишком много энергии, передавать больше информации по имеющимся каналам связи, обеспечивать максимальную степень готовности эксплуатируемых подсистем. Во-вторых, при запланированных значениях показателей ИИУС добиться совокупного минимума используемых ресурсов.

Это иллюстрирует важность разработки методов и средств обеспечения эффективного функционирования ИИУС при решении задач управления процессами и объектами.

Материалы и методы

Сбалансированная система показателей – инструмент оценки результативности системы, позволяющий контролировать функционирование подсистем, а также последствия их выхода из строя [3]. Оценка результативности системы связана с определением ее эффективности, т.е. степени достижения целей и решения задач, направленных на их достижение. Эффективность используется для оценки, контроля и регулирования соответствующей деятельности. Она является наглядным показателем превосходства одного варианта системы по отношению к другому.

Для обеспечения требуемой эффективности функционирования ИИУС, прежде всего, необходимо составить перечень параметров, влияющих на ее уровень. Для этого необходимо проанализировать возможности самой ИИУС, потребности лица, принимающего решения (ЛПР) в ее эффективной работе, и желаемые результаты (устремления) на основе алгоритма стратегического управления [4]:

запрос к ИИУС → формирование цели → ее анализ → выбор стратегии достижения цели → реализация стратегии → полученный результат.

В данном случае *полученный результат* – это оптимальное сочетание возможностей ИИУС, потребностей и устремлений ЛПР (рис. 1). Для получения этого оптимума необходимо проанализировать внутреннее состояние ИИУС (объект) и внешнюю среду и устремления ЛПР (субъект) (по совокупностям выбранных параметров) (рис. 2).

Предпочтительно использовать для этого систему ключевых показателей эффективности *KPI*, которая позволяет выделить наиболее существенные показатели ИИУС, наилучшим образом характеризующие ее эффективность [5].

Показатели *KPI* являются индикаторами соответствия уровня текущих показателей ИИУС стратегическим целям.

Критериями эффективной структуры любой иерархической ИИУС управления являются: соответствие уровней управления их функциям, возможно меньшее число уровней в системе, сосредоточение на каждом уровне всех необходимых функций, четкое выделение участия каждого уровня в общем процессе, исключение дублирования функций.

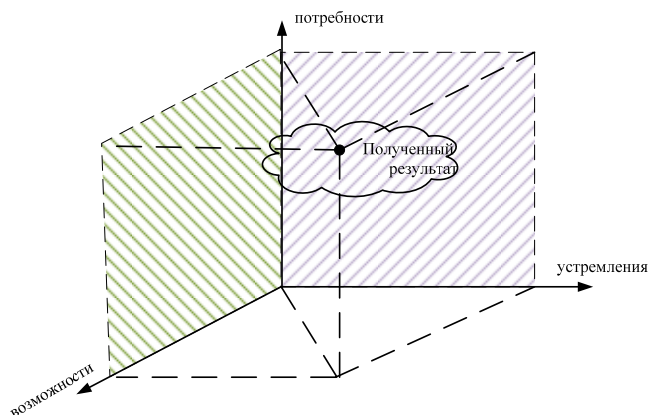


Рис. 1. Система координат при разработке результата функционирования ИИУС



Рис. 2. Иллюстрация алгоритма формирования результата функционирования ИИУС

Выбор показателей для перечня *KPI* зависит от области применения многоуровневой иерархической ИИУС и условий ее эксплуатации, но в большинстве случаев это ресурсы (финансовые, материальные, людские, временные и пр.), необходимые для ее функционирования.

Результаты

Параметрами эффективности ИИУС являются их надежность (безаварийность функционирования) и возможность быстрой адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды, а в случае чрезвычайной ситуации (ЧС) – время и ресурсы, необходимые на восстановление работоспособности контролируемого ТО.

В соответствии с работой [6] многоуровневой иерархической ИИУС присущи следующие существенные характеристики: вертикальное расположение подсистем (вертикальная декомпозиция), приоритет действий или право вмешательства подсистем верхнего уровня, зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих действий.

Многоуровневые иерархические ИИУС включают линейные и функциональные элементарные организационные структуры. Их неоспоримыми достоинствами являются единство руководства, простота и четкость подчинения, полная ответственность подсистем верхнего уровня за результаты деятельности подсистем нижнего уровня, оперативность в принятии решений, согласованность действий всех уровней, получение подсистемами нижнего уровня согласованных между собой задач, высокая компетентность подсистем нижнего уровня, отвечающих за решение конкретных задач, специализация подсистем нижнего уровня на решении определенного вида задач, ликвидация дублирования при их решении.

Исходя из этого МАС, разработанная для иерархической ИИУС, имеет структуру, приведенную на рис. 3.

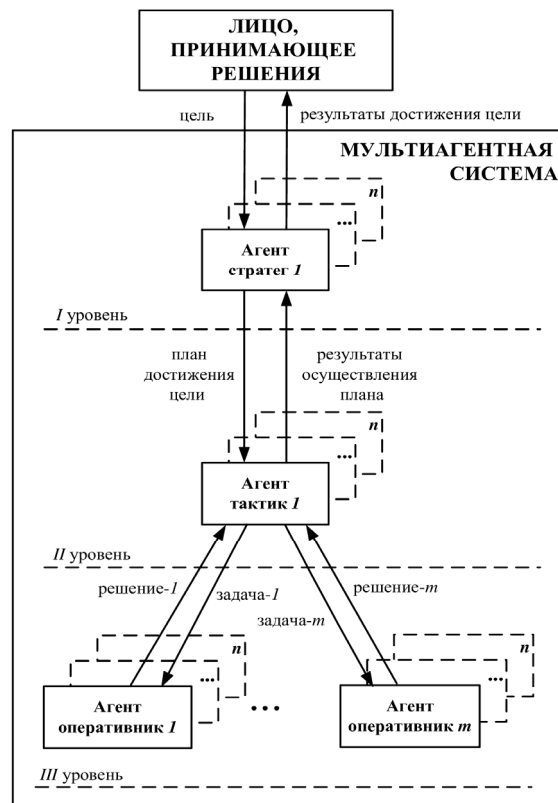


Рис. 3. Графическое представление уровней иерархии в МАС

Как показано на рис. 4, объект управления (ТО) получает из внешней среды вещество, энергию и информацию ($B, \mathcal{E}, I$) и отдает преобразованные вещество, энергию и информацию ($B', \mathcal{E}', I'$) обратно во внешнюю среду. Кроме того, из внешней среды на ИИУС воздействуют случайные, изменяющиеся во времени и не несущие полезной информации, сигналы $\eta(t)$ – помехи. Помехи могут искажать результаты измерений, оценки и команды, отдаваемые подсистемой управления.

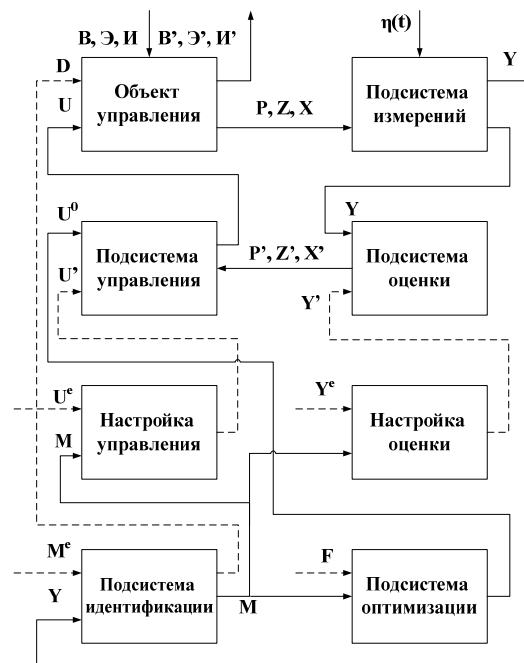


Рис. 4. Общая структурная схема ИИУС

На рис. 4 сплошными линиями показаны связи, без которых функционирование ИИУС невозможно. Подсистемы, соединенные этими связями, образуют главную обратную связь. Информационное наполнение главной обратной связи определяется функциями подсистем. Это информация о входах (множество P), состоянии (множество Z) и выходах (множество X) объекта управления, измерения, загрязненные помехами (множество Y), оценки входного процесса (множество P') и выходного процесса (множество Z'), состояния (множество X'), управляющие воздействия – команды (множество U).

ТО должен быть снабжен устройствами, распознающими и выполняющими команды подсистемы управления. Потоки вещества, энергии и информации через объект управления должны быть доступны для измерения в любой момент времени.

Подсистема измерений получает информацию через первичные преобразователи лишь о наиболее существенных характеристиках входов и выходов ТО. О состоянии самого объекта получить информацию можно лишь косвенно – через его входы и выходы.

Подсистема оценки состояния, анализируя измерения Y^e использованием алгоритмов фильтрации и обработки информации, получает оценки входного процесса X' .

Эти данные либо напрямую устанавливаются из внешней среды при настройке ИИУС, либо вырабатываются подсистемой настройки оценки состояния на основе данных для настройки. Как правило, при настройке системы автоматики используются и тот и другой метод одновременно.

Оценки состояния подают на вход подсистемы управления. По этим оценкам подсистема управления вырабатывает управляющие воздействия – команды U . Сигналы вырабатываются подсистемой настройки управления на основе входной информации.

Коррекцию настроек можно производить автоматически, если в подсистемах настройки заложить модель процесса M , изменяющуюся в реальном времени. Такое изменение модели обеспечивают подсистемы идентификации. На входе этой подсистемы формируют обобщенную модель процесса M^e в виде систем алгебраических или дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

На основе модели M и целевой функции F подсистема оптимизации находит такой вектор управляющих воздействий U^0 .

По степени участия подсистем каждого уровня в процессе принятия и реализации решений их подразделяют на: стратегов, тактиков и оперативников, расположенных иерархически.

Синергизм ИИУС проявляется в усилении свойств системы (эффективности E) при объединении отдельных агентов, что выражается общей формулой [7]:

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

где N – количество агентов, объединенных в систему.

Синергетическую эффективность [7, 8] процесса объединения логично определить как системную эффективность. Тогда эта эффективность характеризует общую эффективность нелинейного взаимодействия агентов, входящих в состав системы. Следовательно, синергетическая эффективность – это способ учета общей эффективности системы, складывающийся из нескольких видов эффективности, когда ее невозможно определить простым суммированием эффективностей отдельных агентов системы.

Авторами разработан алгоритм *MASL+*, имеющий иерархическую структуру и возможности клонирования и организации коалиций ИА (рис. 5), что объединяет отмеченные достоинства и повышает *KPI* функционирования МАС.

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

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

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

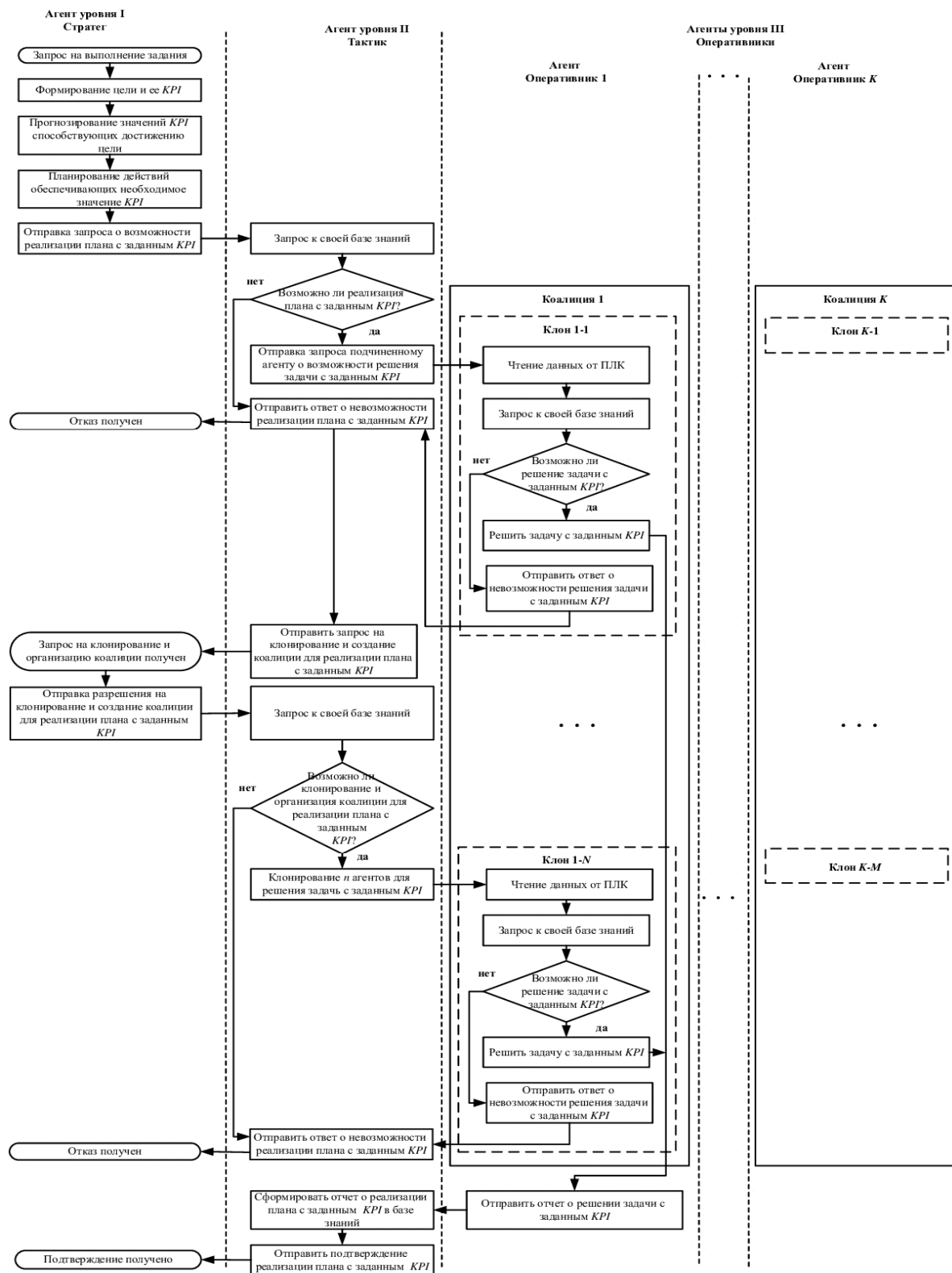


Рис. 5. Алгоритм MASL +

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

сложные ИИУС не способны к спонтанной адаптации и развитию и при чрезмерных воздействиях извне теряют свою структуру и необратимо разрушаются.

Выбор варианта самоорганизации системы зависит от критичности параметров функционирования ИИУС и ТО. Если нужно действовать быстро (критичный параметр время), то может быть задействовано большее количество ресурсов (агентов). Но если критическими параметрами являются и время, и ресурсы, то за счет синергизма ИИУС и наличия нелинейной эффективности (см. выражение (2)), возможно достичь цели без привлечения дополнительных ресурсов и в срок за счет перераспределения обязанностей между однофункциональными агентами [9].

Рассмотрим проявление синергетической эффективности ИИУС на примере работы гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (БВС) в зоне ЧС. В соответствии с работой [10] в зону ЧС при проведении поисково-спасательных работ (ПСР) отправляют гетерогенную группу БВС, входящую в состав подсистемы чрезвычайного (экстренного) реагирования.

Алгоритм работы гетерогенной группы БВС включает этапы сбора и обработки данных, а также реализации на их основе действий, изменяющих внешнюю среду. Эти действия осуществляются синергетической ИИУС на основе интеллектуального взаимодействия агентов (в данном случае БВС) МАС, обеспечивающего при отказе одного БВС сохранение работоспособности всей гетерогенной группы [9]. Действительно, структурный расчет надежности показывает, что при отказе одного из N БВС не произойдет потеря работоспособности всей гетерогенной группы. Система переходит в более напряженный режим работы, в котором, обладая меньшими ресурсами, она выполняет заданные функции. При этом, безусловно, снижается производительность и эффективность решения задачи.

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

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

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

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

Допустим, что гетерогенная группа БВС состоит из шести агентов ($A := \{a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2\}$). Для четырех БВС определяющим является i -й параметр, для остальных – $i + 1$ -й. Тогда реализация формулы (3) в случае всех работоспособных БВС происходит, как показано на рис. 6. В табл. 1 представлена работа агентов (БВС) по тактам в нормальном режиме. Анализатор ресурсов в этом случае осуществляет контроль работы гетерогенной группы БВС путем проверки на наличие режима «Стоп».

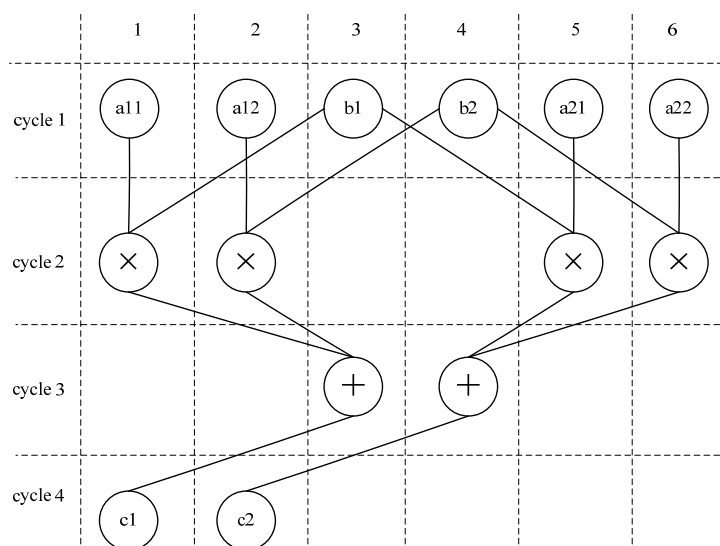


Рис. 6. Граф проведения ПСР при работоспособных БВС

Таблица 1

Работа агентов по тактам в нормальном режиме

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

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

При выходе из строя одного из БВС анализатор ресурсов осуществляет восстановительные процедуры в соответствии с вышеописанным алгоритмом. Например, пятый БВС в гетерогенной группе вышел из строя, тогда реализация формулы (3) будет выглядеть по-другому, так, как представлена на рис. 7. В табл. 2 представлена работа агентов (БВС) по тактам с неработоспособным агентом.

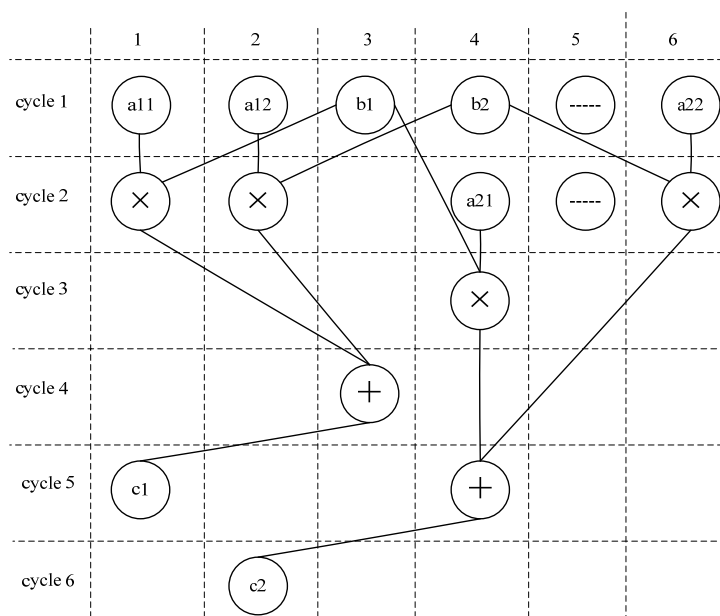


Рис. 7. Граф проведения ПСР при неработоспособном БВС

Таблица 2

Работа агентов по тактам с неработоспособным агентом

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

Примечание: чт – чтение данных; зп – запись данных.

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

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

Заключение

Для обеспечения эффективности сбора и обработки данных в ИИУС авторами предложен усовершенствованный алгоритм функционирования МАС (MASL+) на основе клонирования и образования коалиций ИА. Данная концепция построения ИИУС является инструментом анализа эффективности и позволяет оптимизировать структуру и функционирование ИИУС по Парето, когда значение каждого частного показателя, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

Таким образом, структурно-функциональная модель предложенной синергетической ИИУС характеризуется набором структурных элементов и их функциональным назначением, присущим большинству современных ИИУС, что делает ее инвариантной относительно области применения. Пример использования предлагаемой синергетической ИИУС для управления БВС в условиях ЧС показывает оптимизацию ресурсов за счет синергетического эффекта и достижение поставленной цели даже при выходе агента из строя, так как структура ИИУС является восстанавливаемой и сохраняющей работоспособность при выходе из строя агента (БВС).

Библиографический список

1. Бугайченко, Д. Ю. Формально-логическая спецификация мультиагентных систем реального времени / Д. Ю. Бугайченко, И. П. Соловьев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 1, Вып. 2, Математика. – 2007. – С. 49–57.
2. Ковалевский, В. Э. Мультиагентные алгоритмы согласования ключевых показателей эффективности предприятия / В. Э. Ковалевский, В. А. Онуфриев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 67–80. – DOI 10.18721/JCSTCS.12306.
3. Внедрение сбалансированной системы показателей / Horvath & Partners ; пер. с нем. М. Гавриш, С. Данилевич, В. Толкач. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2005. – 478 с. – (Модели менеджмента ведущих корпораций).
4. Закирова, А. Р. Управление процессами / А. Р. Закирова. – Казань : Казан. ун-т, 2015. – 86 с.
5. Безбородова, О. Е. Оценка эффективности совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем / О. Е. Безбородова, А. Г. Убиенных, В. В. Шерстнев, О. Н. Бодин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 33–41.
6. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем : пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако и И. Такахака ; под ред. И. Ф. Шахнова ; предисл. чл.-кор. АН СССР Г. С. Поспелова. – Москва : Мир, 1973. – 344 с.
7. Sukharev, O. S. The theory of effectiveness of economy : monograph / O. S. Sukharev. – 2nd ed., cor. – Moscow : Kurs: INFRA-M, 2014. – 367 p. – URL: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost

8. Multi-agent Technologies for Comprehensive Monitoring of the State of Territorial Technosphere / O. Bezborodova, N. Gromkov, O. Bodin, A. Bodin, V. Baranov, V. Trilissky // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – Budva, Montenegro, 2019. – P. 1–4. – DOI 10.1109/MECO.2019.8760064.
9. Пат. 2292075 Российская Федерация. Синергическая вычислительная система / Бодин О. Н., Логинов Д. С., Тернопольский К. А. – № 2005119236/09 ; заявл. 21.06.2005 ; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 2. – 20 с.
10. Пат. 2694528 Российская Федерация. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Рахматуллов Ф. К. [и др.]. – № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20. 31 с.

References

1. Bugaychenko D. Yu., Solov'ev I. P. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 1, Vyp. 2, Matematika* [Bulletin of Saint Petersburg University. Ser. 1, Issue 2, Mathematics]. 2007, pp. 49–57. [In Russian]
2. Kovalevskiy V. E., Onufriev V. A. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical statements of SPbGPU. Computer science. Telecommunications. Management]. 2019, vol. 12, no. 3, pp. 67–80. DOI 10.18721/JCSTCS.12306. [In Russian]
3. *Vnedrenie sbalansirovannoy sistemy pokazateley* [Implementation of a balanced scorecard]. Horvath & Partners; transl. from German by M. Gavrish, S. Danilevich, V. Tolkach. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2005, 478 p. [In Russian]
4. Zakirova A. R. *Upravlenie protsessami* [Process management]. Kazan: Kazan. un-t, 2015, 86 p. [In Russian]
5. Bezborodova O. E., Ubiennykh A. G., Sherstnev V. V., Bodin O. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2020, no. 3 (33), pp. 33–41. [In Russian]
6. Mesarovich M., Mako D. and Takahara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem: per. s angl.* [Theory of hierarchical multilevel systems: transl. from English]. Moscow: Mir, 1973, 344 p. [In Russian]
7. Sukharev O. S. *The theory of effectiveness of economy: monograph*. 2nd ed., cor. Moscow: Kurs: INFRA-M, 2014, 367 p. Available at: https://studref.com/428048/ekonomika/sinergeticheskaya_effektivnost
8. Bezborodova O., Gromkov N., Bodin O., Bodin A., Baranov V., Trilissky V. *2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro, 2019, pp. 1–4. DOI 10.1109/MECO.2019.8760064.
9. Pat. 2292075 Russian Federation. *Sinergicheskaya vychislitel'naya sistema* [Pat. 2292075 Russian Federation. Synergistic computing system]. Bodin O. N., Loginov D. S., Ternopol'skiy K. A. No. 2005119236/09; appl. 21.06.2005; publ. 20.01.2007, bull. № 2, 20 p. [In Russian]
10. Pat. 2694528 Russian Federation. *Sposob provedeniya poiskovo-spasatel'nykh rabot* [Pat. 2694528 Russian Federation. Method of conducting search and rescue operations]. Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E., Rakhmatullov F. K. et al. No. 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. № 20, 31 p. [In Russian]

Безбородова Оксана Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Bezborodova Oksana Evgen'evna

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

Бодин Олег Николаевич

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolayevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering fundamentals,
National Research University «MPEI»
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Шерстнев Владислав Вадимович

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

Sherstnev Vladislav Vadimovich

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

Образец цитирования:

Безбородова, О. Е. Обеспечение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, В. В. Шерстнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 5–16. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-1.

*И. Н. Чебурахин, А. А. Трофимов, Д. А. Ярославцева,
С. А. Здобнов, М. В. Тюрин*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

*I. N. Cheburakhin, A. A. Trofimov, D. A. Yaroslavtseva,
S. A. Zdobnov, M. V. Tyurin*

SIMULATION OF A HIGH-TEMPERATURE THIN-FILM SENSOR OF THE GAUGE PRESSURE MEASURING SYSTEM

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование рассматривается как начальный этап разработки датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) и систем на их основе, работающих в «жестких» условиях эксплуатации в агрегатах и системах ракетно-космической техники. Методы имитационного моделирования позволяют проанализировать поведение ДПА в «жестких» условиях эксплуатации. Целью имитационного моделирования является определение влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность высокотемпературного тонкопленочного датчика измерительной системы избыточного давления (ИСИД) для подтверждения выбранных технических решений. *Материалы и методы.* Среди современных численных методов расчета температурных полей, распределения радиальных и тангенциальных деформаций, виброускорений и другого наиболее подходящим является метод конечных элементов, используемый в специализированном программном обеспечении SolidWorks с модулем Simulation, позволяющий снизить затраты на проведение дорогостоящих и длительных циклов «проектирование – изготовление – испытания». Исследуемый высокотемпературный тонкопленочный датчик заменяется моделью, на которой проводятся расчеты с целью получения информации об объекте, работающем в «жестких» условиях эксплуатации. *Результаты.* По результатам имитационного моделирования был проведен расчет температурных полей, определено распределение радиальных и тангенциальных деформаций тонкопленочного датчика. Выявлены возникающие напряжения и деформации в области проточки под воздействием виброускорений, а также определены резонансные частоты. Показана 3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

A b s t r a c t. *Background.* Simulation modeling is considered as the initial stage in the development of sensor-converting equipment (SCE) and systems based on it, operating in "harsh" operating conditions in units and systems of rocket and space technology. Simulation modeling methods allow analyzing the behavior of the SCE in "harsh" operating conditions. The purpose of simulation is to determine the influence of external influencing factors on the performance of a high-temperature thin-film gauge pressure measuring system (GPMS) sensor to confirm the selected technical solutions. *Materials and methods.* Among modern numerical methods for calculating temperature fields, distribution of radial and tangential deformations, vibration accelerations, etc., the most suitable is the finite element method used in the special-

ized SolidWorks software with the Simulation module, which makes it possible to reduce the cost of performing expensive and long cycles "design – manufacture – testing". The investigated high-temperature thin-film sensor is replaced by a model used for calculations in order to obtain information about an object operating in "harsh" operating conditions. **Results.** Based on the results of simulation, the calculation of the temperature fields was carried out, the distribution of the radial and tangential deformations of the thin-film sensor was determined. The arising stresses and deformations in the groove area under the influence of vibration accelerations are revealed, and the resonance frequencies are determined. Shown is a 3D model of a multi-channel digital converter GPMS.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитационное моделирование, тонкопленочный датчик, давление, внешние воздействующие факторы, температурное поле, вибрация.

Key words: simulation modeling, thin film sensor, pressure, the external influencing factors, a temperature profile, vibration.

Современная ДПА для измерения физических величин представляет собой сложные многокомпонентные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы (тепловые, механические, упругие и термоупругие, электрические, оптические и др.).

Эти системы состоят из ряда подсистем, главными из которых являются информационная и энергетическая. Эти подсистемы взаимосвязаны и имеют свои особенности, существенно влияющие на работу ДПА.

Основной особенностью энергетической подсистемы является то, что значительная часть поступающей в ДПА энергии преобразуется в тепло. Кроме того, внешняя и измеряемая среды имеют существенно неоднородные и в общем случае нестационарные характеристики (в частности по температуре). И та часть сил и моментов, действующих на чувствительный элемент прибора, которая обусловлена неоднородным и нестационарным температурным полем, вибрационными и ударными нагрузками, вводит дополнительную погрешность. Тепловые процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики, как долговечность и время готовности.

Как показывают проведенные ранее исследования [1], влияние на эффективность работы, надежность, долговечность, точность и время готовности современной ДПА оказывают существенные изменения температуры на уровне единиц градусов, внутренние градиенты температуры порядка $(0,1 \div 1)^\circ\text{C}$ и стабильность температур различных элементов на уровне $(0,01 \div 0,1)^\circ\text{C}$. Поэтому одной из важных и актуальных задач при построении и исследовании математических и имитационных моделей высокотемпературных тонкопленочных датчиков ИСИД является задача определения с высокой точностью температурного поля датчика.

Сложность, возникающая при расчетах и анализе нестационарного, трехмерного температурного поля тонкопленочного датчика (с учетом различных видов теплообмена, наличия несимметричных источников тепловыделения, разнородной многокомпонентной структуры, особенностей крепления и условий теплообмена с внешней средой и т.п.), не позволяет применить традиционные и точные аналитические методы, принятые в задачах теплопроводности [2]. Не удастся решить эту задачу и приближенными численно-аналитическими методами.

В силу большой сложности задача расчета температурного поля рассматриваемых тонкопленочных датчиков избыточного давления может быть решена путем применения численных методов с использованием специального программного обеспечения SolidWorks с модулем Simulation.

Среди численных методов расчета температурных полей наиболее часто используемыми являются метод конечных элементов (МКЭ) и конечно-разностный метод (КРМ).

В «классических» КРМ дифференциальные уравнения и краевые условия аппроксимируются разностными соотношениями, на основе которых строятся алгоритмы обработки полученной информации.

МКЭ по существу является вариационным методом решения краевых задач, ибо он основан на альтернативной формулировке краевых задач не в виде системы дифференциальных

уравнений с краевыми условиями, а в виде некоторой вариационной задачи об экстремуме соответствующего функционала. Поэтому при решении стационарных задач указанного типа МКЭ находит достаточно широкое применение.

Однако, как показывают исследования [3–6], при решении нестационарных трехмерных задач предпочтительнее совместное использование МКЭ и КРМ.

Следует отметить, что при применении КРМ и МКЭ к многомерным задачам система разностных уравнений имеет большой порядок, и для ее решения в общем случае отсутствует эффективный алгоритм типа алгоритма прогонки, используемого для одномерных задач.

Это обстоятельство особенно осложняет решение нестационарных уравнений, поскольку при использовании неявных разностных схем приходится на каждом шаге по времени иметь дело с системой линейных уравнений (относительно искомых температур) большого порядка, а число шагов по времени в реальных задачах может достигать нескольких тысяч.

В настоящей работе для расчета неоднородных, трехмерных, нестационарных температурных полей тонкопленочного датчика ИСИД предлагается использовать метод конечных элементов с применением программного комплекса SolidWorks и модуля Simulation [7].

Выбор этого метода обусловлен сложностью поставленных и решаемых нестационарных многомерных температурных задач, многокомпонентностью конструкции тонкопленочного датчика, разнообразием и взаимосвязанностью физических явлений и процессов.

Целью проведения имитационного моделирования является определение влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность высокотемпературного тонкопленочного датчика и разработка 3D-модели многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Имитационное моделирование позволит решить следующие задачи:

- распределение радиальных и тангенциальных деформаций на рабочей поверхности мембраны воспринимающего элемента при воздействии давления, для крайних значений допусков размеров при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- распределение температур и радиальных, тангенциальных деформаций на рабочей поверхности мембраны при воздействии на приемную полость жидкого азота с температурой минус 196, + 25, +250 °С через 1, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 150, 180 с;

- распределение температур и радиальных деформаций на рабочей поверхности мембраны воспринимающего элемента при толщинах проточки $h = 0,9H; 1,0H; 1,1H; 1,2H$, где H – толщина мембраны при воздействии на приемную полость жидкого азота с температурой минус 196, + 25, +250 °С через 1, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 150, 180 с;

- определение полного напряжения и деформации, возникающих в области проточки при воздействии виброускорений 25000 м/с^2 , направленных перпендикулярно оси упругого элемента для крайних значений допусков геометрических размеров при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- определение амплитуды виброперемещений упругого элемента при воздействии на него виброускорений 25000 м/с^2 с частотой 10-30000 Гц в направлении, перпендикулярном продольной оси упругого элемента для крайних значений допусков геометрических размеров, при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- определение собственной (резонансной) частоты упругого элемента;

- построение 3D-модели многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Для проведения имитационного моделирования была построена трехмерная твердотельная модель высокотемпературного тонкопленочного датчика (рис. 1).

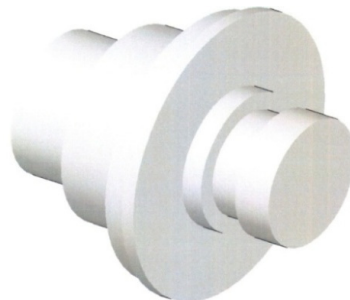


Рис. 1. Твердотельная модель высокотемпературного тонкопленочного датчика

Граничные условия для твердотельного моделирования изображены на рис. 2. В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемых материалов, необходимых для проведения анализа в модуле Simulation.

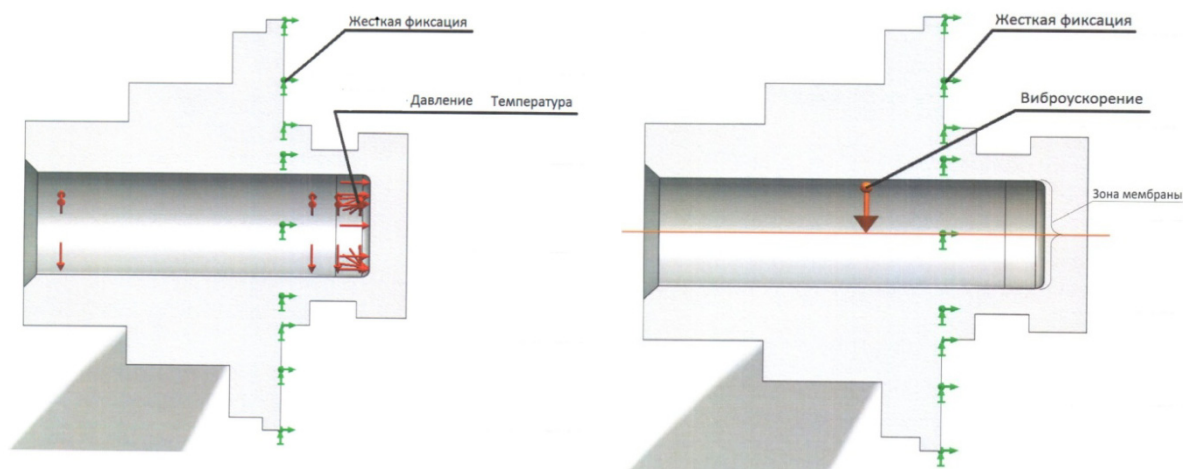


Рис. 2. Структура граничных условий

Таблица 1

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	Свойства материала	
	36НКВХБТЮ-ИД	36НХТЮ
Тип материала	Линейный-упругий-изотропный	Линейный-упругий-изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести, МПа	1100	850
Модуль упругости, ГПа	192	200
Коэффициент Пуассона	0,3	0,28
Массовая плотность, кг/м ³	7800	7900
Теплопроводность, Вт/м·К	При температурах: 200К– 13,5 250К – 14,0 273К– 14,1 300К– 14,5 400К–16,5 500К– 17,5	90
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,5	450

Результаты моделирования представлены в виде графиков распределения радиальной и тангенциальной деформации (рис. 3–5). Границы мембраны располагаются в точках 11–39.

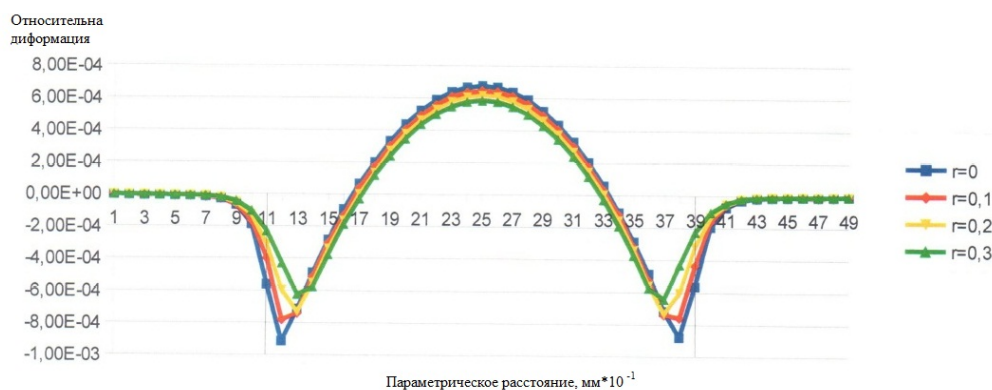


Рис. 3. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре +25 °С, где $r = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ радиус скругления мембраны

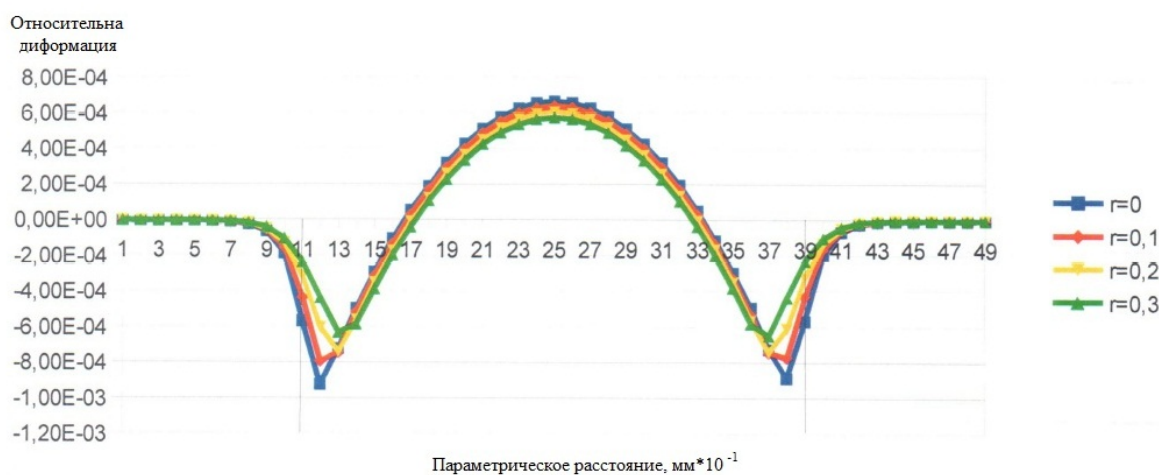


Рис. 4. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре +250 °C

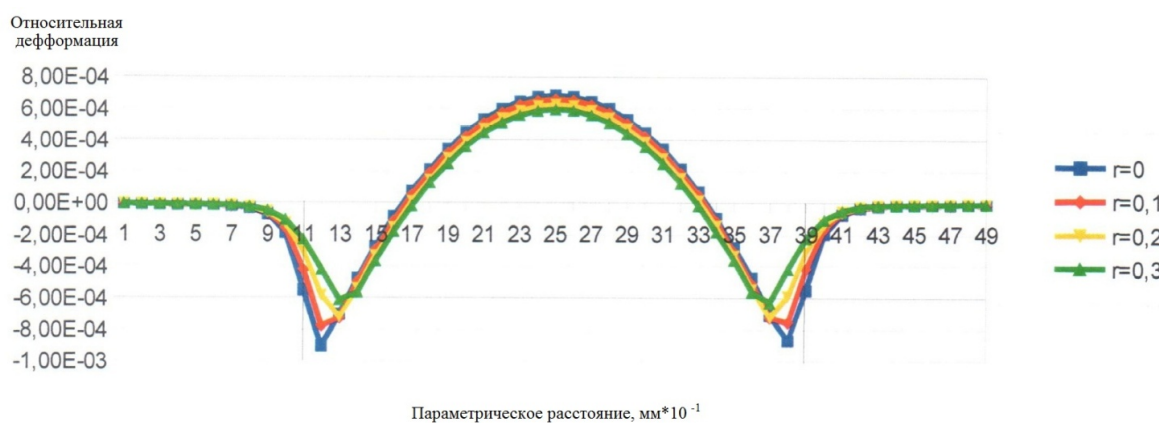


Рис. 5. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре минус 196 °C

Результатами имитационного моделирования являются эпюры распределения температур на поверхностях мембраны (рис. 6), а также диаграмма распределения радиальной деформации на рабочей поверхности мембраны (рис. 7).

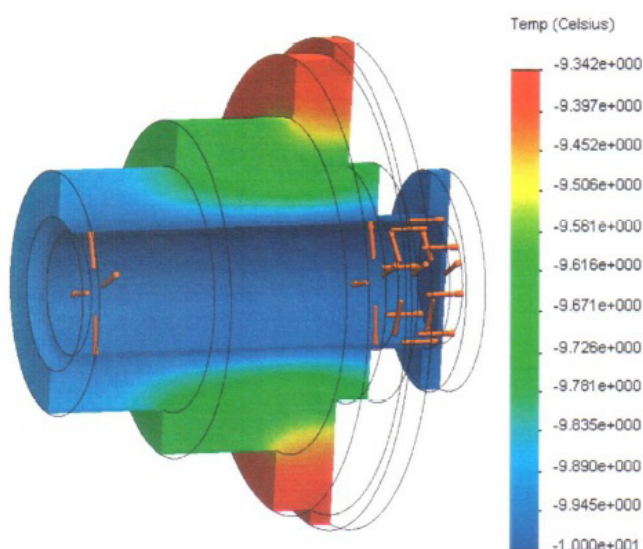


Рис. 6. Эпюра распределения температур

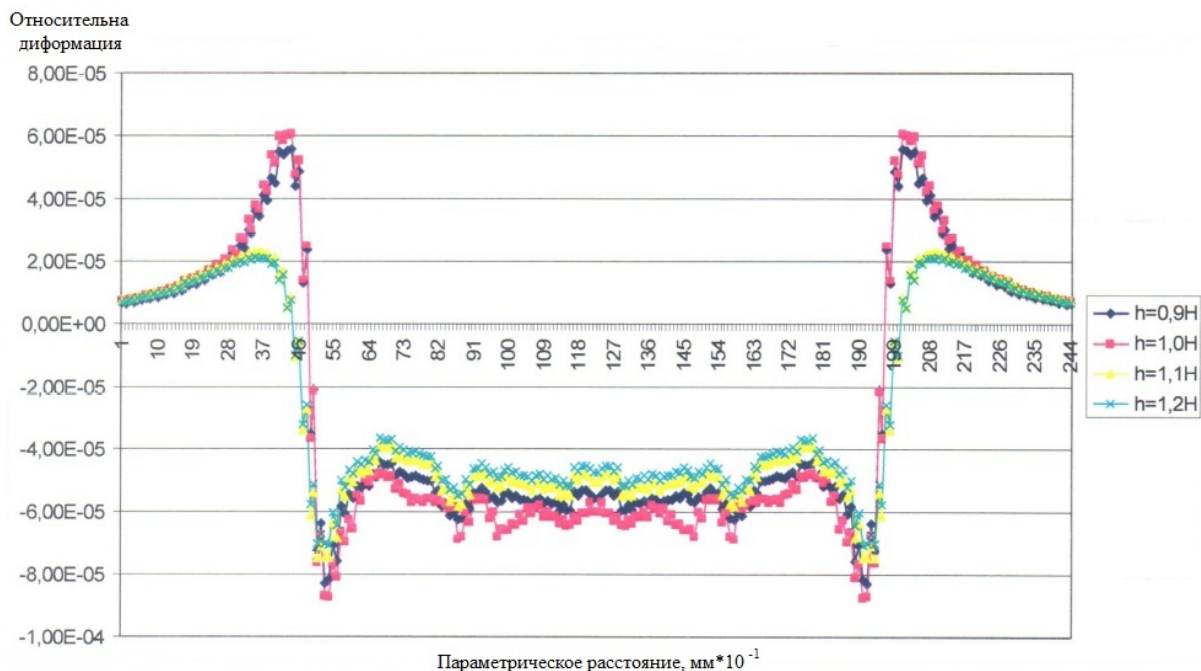


Рис. 7. График зависимости деформации рабочей поверхности мембраны от толщины проточки

При воздействии виброускорений $25\,000\text{ м/с}^2$ максимальные напряжения и деформации, возникающие в области проточки, а также эпюры распределения напряжения и деформации при температурах минус 196, +25, +250 °С, представлены на рис. 8, 9 и 10 соответственно.

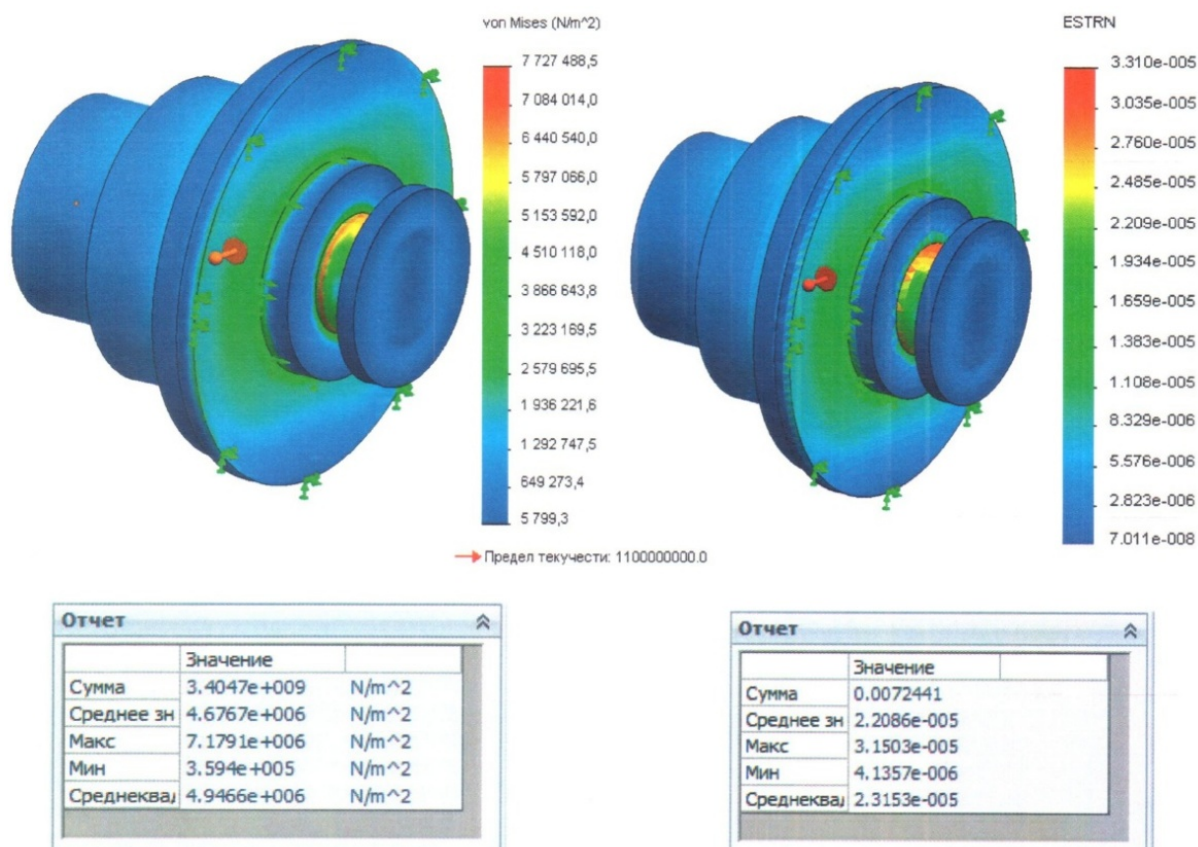


Рис. 8. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре +25 °С

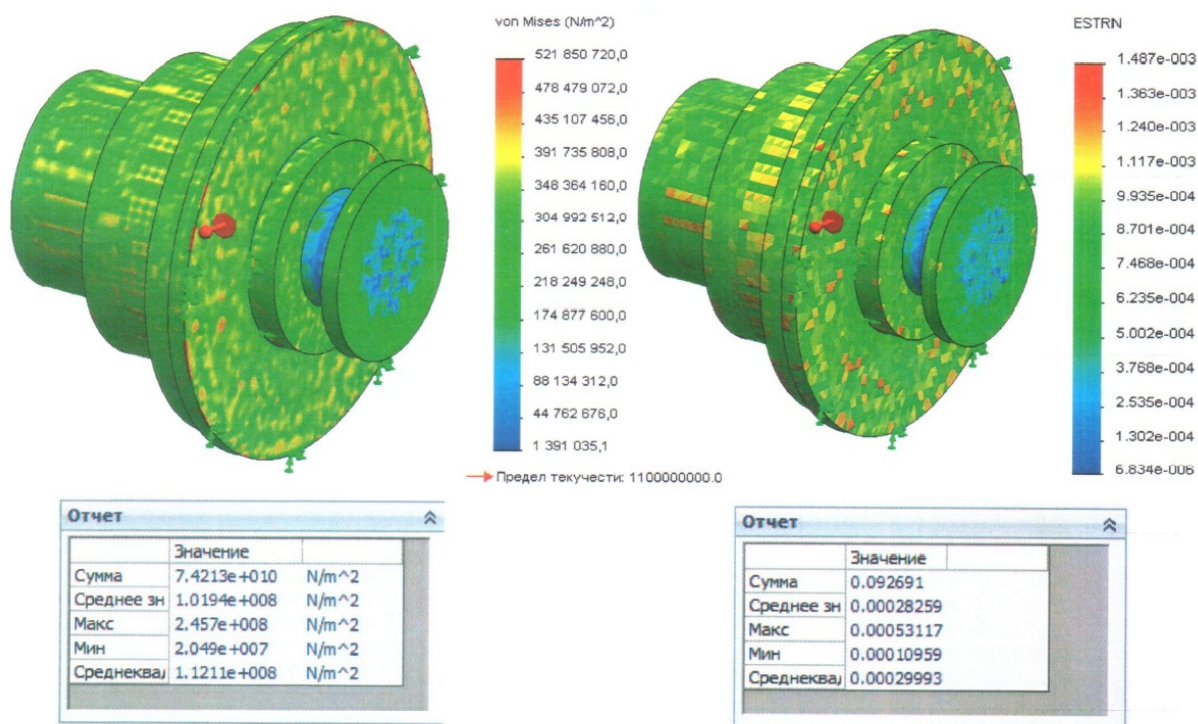


Рис. 9. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре минус 196 °С

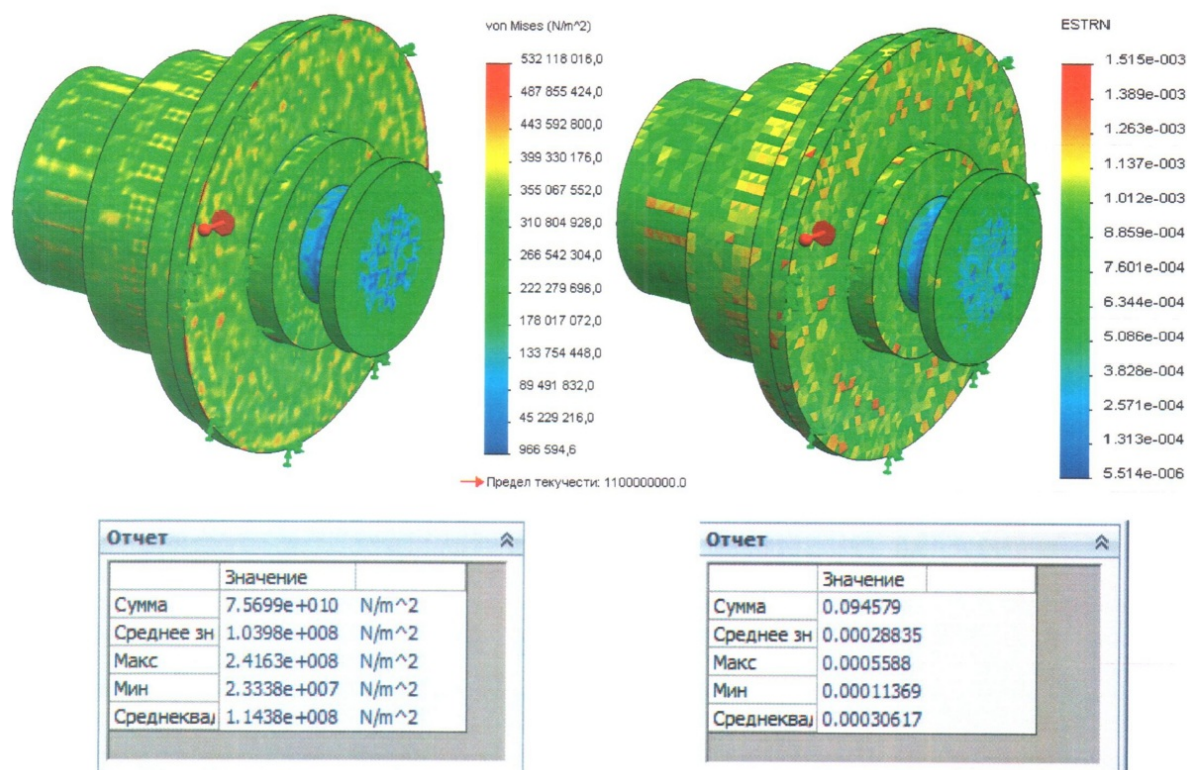


Рис. 10. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре +250 °С

В результате воздействия виброускорений 25 000 м/с² с частотой 10 – 30 000 Гц на упругий элемент была определена зависимость виброперемещений рабочей поверхности мембраны от частоты (рис. 11). В ходе исследования были определены формы продольных колебаний с собственной частотой (табл. 2).

Таблица 2

Собственная (резонансная) частота

Номер формы продольных колебаний	Резонансная частота, Гц	Номер формы продольных колебаний	Резонансная частота, Гц
1	61 291	11	100 630
2	61 312	12	110 390
3	73 546	13	135 370
4	73 549	14	135 390
5	78 424	15	144 240
6	87 187	16	144 250
7	87 989	17	146 870
8	88 020	18	156 950
9	99 576	19	157 090
10	99 636	20	183 250

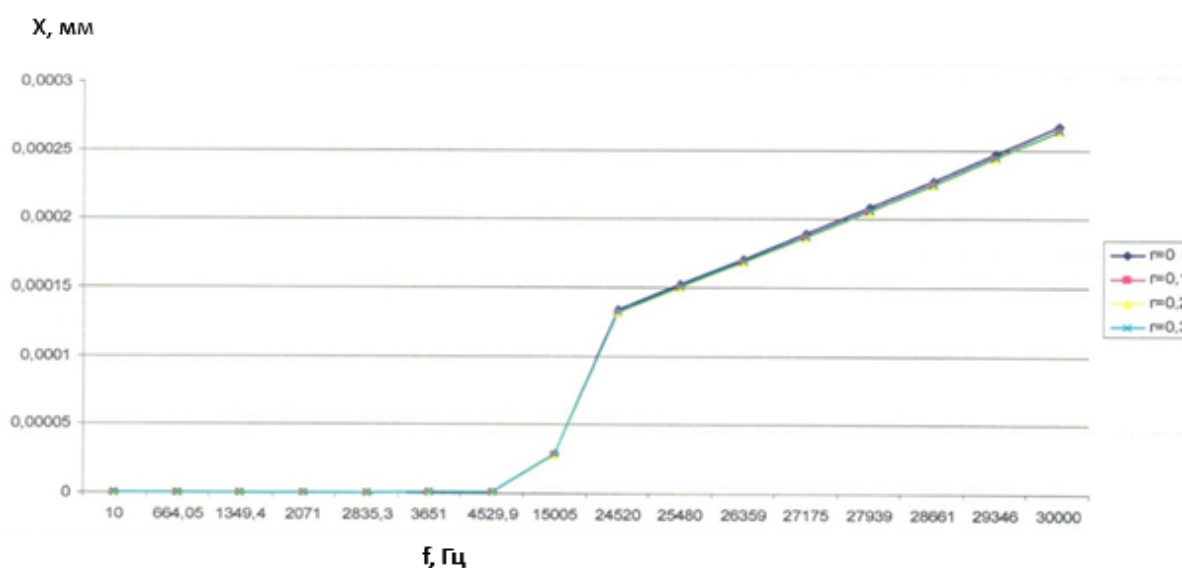


Рис. 11. График зависимости виброперемещений от частоты

3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД приведена на рис. 12.

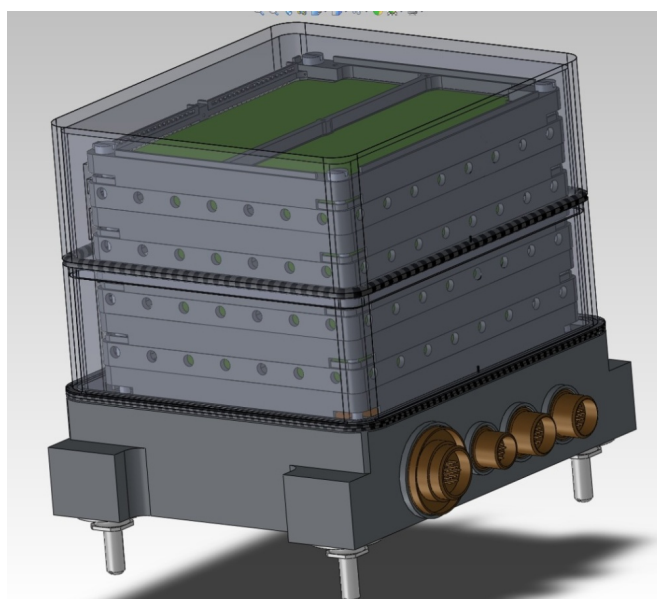


Рис. 12. 3D-модель многоканального цифрового преобразователя

Заклучение

По результатам имитационного моделирования были решены поставленные задачи:

- рассчитаны радиальные и тангенциальные деформации, максимальное значение которых достигается при радиусе скругления равным нулю;
- проанализировано распределение температуры по корпусу датчика, значение температур от минус 196 до + 250 °С;
- выявлены возникающие напряжения и деформации в области проточки под воздействием виброускорений;
- определены собственные (резонансные) частоты от 61,3 до 183,3 кГц;
- построена 3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Проведенное имитационное моделирование подтверждает правильность выбранных технических решений высокотемпературного тонкопленочного датчика ИСИД при воздействии на него температурных полей от минус 196 до + 250 °С и виброускорений амплитудой 25000 м/с² с частотой от 10 до 30000 Гц.

Библиографический список

1. Джашиитов, В. Э. Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В. Э. Джашиитов, В. М. Панкратов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1998. – 236 с.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высш. шк., 1967. – 600 с.
3. Мусаев, Р. Ш. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 51–55.
4. Фролов, М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа / М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2014. – № 7. – С. 22–25.
5. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Баstryгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
6. Мусаев, Р. Ш. Применение CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчиков-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры / Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 91–102.
7. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

References

1. Dzhashitov V. E. *Dinamika temperaturno-vozmushchennykh giroskopicheskikh priborov i sistem* [Dynamics of temperature-perturbed gyroscopic devices and systems]. V. M. Pankratov. Saratov: Izd-vo Sarat. unta, 1998, 236 p. [In Russian]
2. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vyssh. shk., 1967, 600 p. [In Russian]
3. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2012, no. 2, pp. 51–55. [In Russian]
4. Frolov M. A., Musaev R. Sh., Trofimov A. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2014, no. 7, pp. 22–25. [In Russian]
5. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S., Gromova A. A., Efimov P. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 1 (19), pp. 20–28. [In Russian]
6. Musaev R. Sh., Lyashenko A. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 91–102. [In Russian]
7. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press, 2010, 464 p. [In Russian]

Чебурахин Игорь Николаевич

главный технолог,

Научно-исследовательский институт

физических измерений

(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: info@niifi.ru

Cheburakhin Igor Nikolaevich

chief technologist,

Research and development institute

for physical measurements

(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

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

Trofimov Alexei Anatol'evich

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

Ярославцева Дарья Александровна

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Yaroslavtseva Daria Alexandrovna

design engineer,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Здобнов Сергей Александрович

технический директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Zdobnov Sergey Aleksandrovich

technical director,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Tyurin Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Имитационное моделирование высокотемпературного тонкопленочного датчика измерительной системы избыточного давления / И. Н. Чебурахин, А. А. Трофимов, Д. А. Ярославцева, С. А. Здобнов, М. В. Тюрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 17–26. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-2.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.31

DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-3

*А. Г. Кириллов, В. Н. Сакевич*АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ШКАЛ
И ПОВЕРКИ ПРИБОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ*A. G. Kirillov, V. N. Sakevich*AUTOMATED SYSTEM FOR MAKING THE FILM DIALS
AND VALIDATION OF THE INSTRUMENT PANELS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Повышение гибкости производственного процесса изготовления пленочных шкал с одновременным обеспечением высокой производительности возможно при использовании интегрированного подхода к разработке цифровых технологий печати и раскроя шкал, а также поверки готовых приборных панелей. Цель работы – применение технологии струйной печати с УФ-отверждением пленочных шкал для комбинированных приборных панелей и разработка на ее основе автоматизированного комплекса. *Материалы и методы.* Материалами исследования послужили разработки и исследования в области дизайна, изготовления и поверки приборных панелей. Для решения поставленных задач использовались методы компьютерного моделирования, системно-структурного подхода к разработке информационных систем, обработки изображений. *Результаты.* Разработана концепция автоматизированного комплекса печати и раскроя шкал и поверки приборных панелей, который включает в себя струйный принтер с УФ-отверждением, автоматическую раскройную машину, блок видеонаблюдения и принтер штрих-кода. Разработан программный комплекс системы управления автоматизированным комплексом. *Выводы.* Предложенный комплекс способен на основе цифровых технологий обеспечить изготовление пленочных шкал и поверку панелей приборов, повысить производительность и гибкость по сравнению с существующими аналоговыми способами печати шкал.

A b s t r a c t. *Background.* The enhancing of flexibility with simultaneous achievement of increased productivity for the of instrument panels film dials is possible by using the integrated approach to development of digital technologies for dials printing and cutting and finished instrument panels validation. The purpose of the work is to implicate the technology of inkjet printing with UV curing on film dials for combined instrument panels and design the automated system for manufacturing and validation. *Materials and methods.* Developments and researches on design, manufacturing and validation of instrument panels served as materials. Methods of computer modeling, a structured and systematic approach to design of information systems, image processing are used to meet those challenges. *Results.* The concept for automated system for dials printing and cutting and finished instrument panels validation was developed. The system includes inkjet printer with UV curing, automated cutter, video surveil-

lance unit and barcode printer. The software package for automated control system was developed. **Conclusions.** Proposed system based on digital technologies is capable of attending to film dials making and instrument panel validation as well as flexibility enhancing and productivity increasing comparing existing analog dials printing methods.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пленочная шкала, приборная панель, печать, раскрой, изготовление, поверка, автоматизированный комплекс.

К e y w o r d s: film dial, instrument panel, printing, cutting, manufacturing, validation, automated system.

Приборные панели широко применяются в различных транспортных средствах и предназначены для отображения визуальной информации о состоянии систем, измерения параметров движения и состояния двигателя, агрегатов и систем в рабочих режимах; контроля и диагностики неисправностей. Электронные приборные панели впервые пришли на смену аналоговым в середине 1980-х гг. вначале на автомобилях класса люкс, а по мере удешевления электронного блока управления и на бюджетных. Высокая информативность, настраиваемый дизайн и дружелюбный интерфейс, высокая функциональность, интеграция с другими электронными системами автомобиля, простота модернизации, высокая степень защиты информации – далеко не полный перечень преимуществ электронных приборных панелей. Функциональные возможности приборной панели автомобиля приобрели новое качество в связи с применением сенсорного экрана, который позволяет не только воспроизводить визуальную и звуковую информацию, но и взаимодействовать с системами автомобиля.

Однако использование электронной приборной панели на основе единого ЖК-дисплея имеет и ряд недостатков, к которым относятся неудовлетворительное качество изображения при солнечном или другом ярком свете, высокая стоимость и затраты при ремонте, низкая отказоустойчивость, низкая стойкость к механическим повреждениям. Приборная панель должна обеспечивать хорошее восприятие информации при различных условиях освещения, как в дневное, так и в ночное время. Так, традиционно приборные панели для лучшего восприятия в дневное время изготавливались в виде белых символов на черном фоне, в то время как для отображения в ночное время использовались флуоресцентные краски.

В связи с перечисленными недостатками большинство приборных панелей имеет комбинированную структуру: наряду с ЖК-дисплеем присутствуют стрелочные указатели, приводимые в движение от шаговых двигателей, и светодиодные индикаторы. Данная структура повышает отказоустойчивость системы управления в целом, которая при выходе из строя ЖК-дисплея остается работоспособной. Использование комбинированной приборной панели позволяет в несколько раз снизить стоимость по сравнению с электронной панелью, что обусловлено более сложным аппаратным и программным обеспечением последней.

Важную роль при восприятии водителем показаний приборов для измерения величин, таких как спидометр или тахометр, имеет вид их указателей. Так, указатели отличаются по форме (круговые, дуговые и линейные), расположению (горизонтальные и вертикальные), типу индикатора (стрелочные и линейные). Ряд исследований отмечают [1–4] преимущества восприятия водителем круговых стрелочных указателей по сравнению с другими их видами, особенно с цифровыми индикаторами, что принимается во внимание в том числе при создании виртуальных указателей на ЖК-дисплее.

Одним из важных элементов приборной панели, который во многом определяет ее внешний вид, эргономичность и информативность, является шкала. Термин «шкала» имеет два значения, согласно одному из которых это некоторая знаковая система, которая ставит в соответствие реальным объектам и событиям определенный графический элемент и его положение. В контексте же данной статьи под термином «шкала» понимается материальный носитель отмеченной знаковой системы, в качестве которого наиболее широко используется пленка из невпитывающего запечатываемого материала. Круговые шкалы также называют циферблатом. Материалом пленки служит пластик (поликарбонат, ПЭТ или др.), на который нанесены отметки, условные обозначения, маркировка и прочие графические элементы.

Для изготовления шкал приборных панелей могут использоваться различные технологии: ротогравировка, офсетная печать, флексография, литография, электрография, шелкография, химическое травление, тампография, лазерная гравировка, ультрафиолетовая печать, термоперенос и другое, каждая из которых обладает набором преимуществ и недостатков, критериями которых выступают производительность, качество, гибкость, условия применения.

Если в условиях традиционного промышленного производства важнейшим критерием являлась производительность, то в условиях цифровой экономики на первый план выходит гибкость производственного процесса на основе цифровых информационно-коммуникационных технологий и оптимизации рабочих процессов с использованием программно-аппаратных решений. Ассортимент и функциональные возможности выпускаемых приборных панелей постоянно обновляются, а тип производства новой продукции при этом зачастую является единственным и мелкосерийным. Цифровая печать шкал позволяет решить проблемы, связанные с эффективностью и гибкостью, а также затратами на подготовку производственного процесса.

Автоматизированный процесс изготовления шкал на пластиковой пленке согласно патенту [5] заключается в использовании печатной станции, станции нанесения защитной пленки, станции раскроя и станции проверки качества изготовления шкалы. Возможно применение также вакуумной формовки для придания шкале объемной формы. Изображение печатается на прозрачной пленке-основе с обратной стороны (рис. 1, а) посредством цифрового принтера, после чего с той же стороны на основу наклеивается прозрачная защитная пленка для придания шкале устойчивости к царапинам при установке шкалы на прибор.

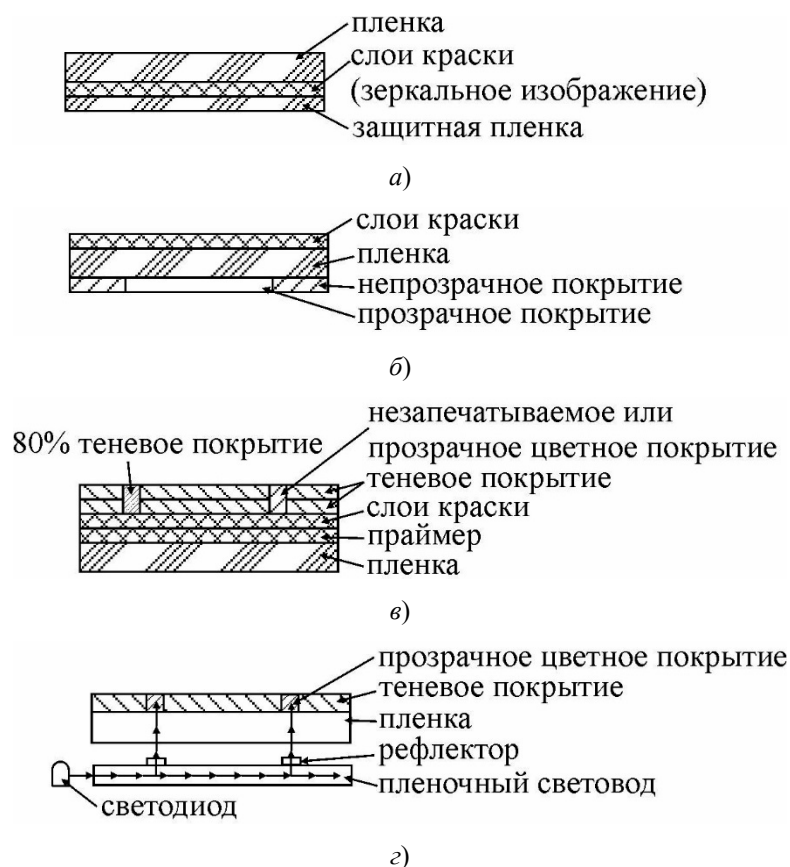


Рис. 1. Технологии печати пленочных шкал приборных панелей:

- а – технология печати с защитной пленкой;
- б – технология печати с двусторонним покрытием и УФ-отверждением;
- в – технология печати с использованием прозрачности для различного восприятия при наличии/отсутствии подсветки;
- г – технология печати с использованием пленочного световода

Изобретение [6] относится к методу изготовления приборных панелей посредством ультрафиолетовой струйной печати. Изображение формируется из непрозрачных и прозрачных

окрашенных элементов непосредственно на прозрачной пленке-основе (рис. 1,б) и после полимеризации под воздействием ультрафиолетового излучения приобретает устойчивость к царапанию. Возможно нанесение элементов изображения как с одной, так и с другой стороны пленки, а также формирование полупрозрачных элементов различной толщины для равномерного рассеяния света. При печати с УФ-отверждением во избежание растекания капель краски на пленке ультрафиолетовое облучение осуществляется одновременно с нанесением капель. Возможно использование матовой пленки для защиты от солнечных бликов, размещаемой поверх основной пленки. Формирование матового слоя может осуществляться на том же принтере, на котором формируется основное изображение посредством специальных красок либо методом шелкографии. В качестве УФ-отверждаемых красок могут использоваться акриловые радикальные или эпоксидные катионные, область применения которых имеет свои особенности и влияет как на сам процесс печати, так и на качество конечного результата. С обратной стороны зачастую используются области с непрозрачным черным покрытием и прозрачным белым.

Отображение различного набора индикаторов при наличии/отсутствии обратной подсветки приборной панели [7] достигается тем, что теневые слои черного цвета наносятся на заключительном этапе после цветных слоев, покрывая отдельные фрагменты (рис. 1,в). Для отображения индикаторов при включении обратной подсветки часть фрагментов наносится черным цветом, но только на площади, составляющей 80 % от общей площади фрагмента, а остальная часть площади наносится прозрачной краской. При этом индикаторы без подсветки не видны, так как черный цвет, смешанный с прозрачным, сливается с фоновым черным. Для остальных индикаторов фрагменты формируются прозрачной краской, в результате чего показатель полного светопропускания всех слоев составляет 40–60 %. Как отмечают авторы, подобные требования к наличию большого количества слоев, а также различной степени прозрачности слоев не позволяли длительное время перейти от шелкографии к струйной печати. Однако появление принтеров с УФ-отверждаемыми красками позволяет решить вопросы, связанные как с послойным нанесением различного числа слоев, так и формированием степени прозрачности слоев посредством разреженного нанесения капель.

Одним из направлений совершенствования приборных панелей является применение системы обратной подсветки на основе пленочного световода [8]. Для уменьшения габаритов системы подсветки и приборной панели в целом между печатной платой панели и пленочной шкалой размещается пленочный световод (рис. 1,г) с выгравированными на нем с помощью лазера рефлекторами света. Расположение источников света на пленочном световоде соответствует размещению прозрачных фрагментов на шкале, что позволяет значительно повысить качество отображаемой информации на приборной панели. В качестве источника света выступает один или несколько светодиодов.

Проведенный анализ исследований показывает, что перспективным и быстро развивающимся сегментом цифровой печати на металлических и неметаллических поверхностях является ультрафиолетовая струйная печать. Внедрение данной технологии печати, однако, сопряжено с рядом проблем, связанных в первую очередь с недостаточной изученностью влияния на процесс печати и качественные показатели готового изделия свойств материалов заготовки и расходных материалов, таких как краски и праймеры. Существует необходимость тщательного подбора соответствия красок и запечатываемого материала, что определяет применение в ряде случаев промежуточного слоя праймера. Наличие праймера улучшает общее качество печати ввиду увеличения толщины слоя, повышения впитываемости краски, уменьшения растекания капель (растискивания), повышения насыщенности цвета, усиления адгезии, увеличения твердости покрытия, экономии дорогостоящего красителя.

Приборная панель автомобиля с пленочной шкалой (рис. 2) содержит стрелочные указатели (спидометр и тахометр), информационные цветные светодиодные индикаторы, а также жидкокристаллический дисплей для отображения информации, отражающей состояние бортовой системы автомобиля. При нанесении краски на пластиковую пленку должны использоваться несколько различных цветов, полупрозрачность отдельных слоев, наличие клеевого слоя для приклеивания шкалы к прибору. Для подсветки указателей используется световод в виде пластины с матированными и прозрачными участками.



Рис. 2. Приборная панель автомобиля с пленочной шкалой

Каждый автомобиль имеет свой собственный дизайн приборной панели, которая может включать стрелочные указатели, такие как спидометр, тахометр, уровня топлива, температуры. Также используются различные индикаторы: сигналы поворота, фар, тормозов и т.д. Для отображения других параметров состояния бортовой системы используется цифровой дисплей. Зачастую при печати шкалы используется фиксированный набор из семи цветов: черный в качестве фона, белый, серый, красный, синий, желтый, зеленый.

При традиционно используемом при изготовлении шкалы щитка приборов методе шелкографии (трафаретной печати) каждый цвет наносится с использованием своей печатной формы. В связи с этим требуется дорогостоящая подготовка производства, окупаемость которого достигается только для большого тиража изготовления шкал. Палитра используемых при изготовлении цветов ограничивается от 6 до 20 в зависимости от используемого оборудования, а увеличение количества цветов приводит к необходимости изготовления дополнительных печатных форм и снижению производительности. Для нанесения каждого цвета зачастую требуется несколько проходов ввиду того, что краска наносится в несколько слоев и требуется высушивание предыдущего слоя перед нанесением последующего. При шелкографии применяются в основном два способа сушки и отверждения слоев краски: путем высыхания растворителя или окислительной полимеризации. Время нанесения одного цвета для типовой приборной панели может составлять 10–12 мин. Повышение производительности процесса достигается тем, что на пленке печатаются одновременно несколько шкал, что возможно для больших тиражей шкал. Недостатки технологии шелкографии связаны с неточностью размеров элементов изображения и нечеткостью их границ, неточностью позиционирования изображения на пленке, низким разрешением, нестабильной цветопередачей; в результате брак при печати шкал может достигать до 40 %.

К цифровым методам печати, получившим практическое применение, относятся лазерный (гравировальный и, электрофотографический) и импульсный струйный (пьезоструйный, термоэлектрический, электромеханический). В отличие от шелкографии, когда изображение вначале формируется на печатной форме, а затем переносится на пленку, с использованием цифровых методов изображение сразу же формируется на пленке. Цифровые технологии печати позволяют уменьшить время нанесения краски до 30 с на один цвет, повысить точность элементов и улучшить цветопередачу посредством смешения нескольких цветов, а также уменьшить время подготовки к печати и сделать процесс экономически эффективным для малых тиражей. Печать при этом возможна как на листовых, так и рулонных материалах, после чего выкраивается шкала требуемой формы, а также выполняются окна для приборов и отвер-

ствия для базирования шкалы на приборе. Запечатываемый материал (чаще всего поликарбонат) после нанесения слоев прозрачных элементов обладает показателем полного светопропускания в диапазоне 40–60 %. Краски содержат в своем составе пигмент, связующее вещество, сиккатив и вспомогательные вещества.

Изготовления шкалы и фиксации ее на приборной панели является заключительной операцией в процессе изготовления приборной панели, после чего выполняется общая проверка ее качества изготовления.

Предложенный автоматизированный технологический комплекс [9] (рис. 3) содержит аппаратную и программную части. Программная часть включает систему управления технологическими процессами печати и раскроя шкал, режимами работы приборной панели и ее проверки, печати этикеток со штрих-кодом. В аппаратную часть комплекса входит оборудование для печати и раскроя шкал и проверки приборов. Структура системы для проверки приборов описана в работе [10]. Характеристики УФ-принтера во многом определяют показатели производительности, гибкости и качества всего комплекса.

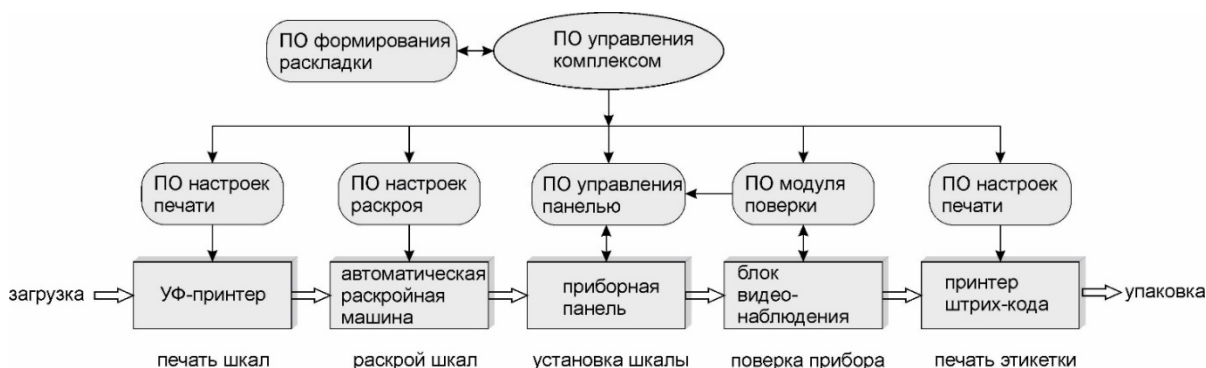


Рис. 3. Схема автоматизированного технологического комплекса для изготовления пленочных шкал и проверки приборных панелей

Аппаратная часть построена по модульному принципу и включает ряд единиц оборудования с микропроцессорным управлением: струйный принтер с УФ-отверждением, автоматическую раскройную машину, блок видеонаблюдения и принтер штрих-кода. Перечисленное оборудование имеет проприетарное программное обеспечение для задания различных режимов работы и выполнения различных настроек, что затрудняет интеграцию оборудования в состав автоматизированного комплекса. Закрытость поставляемого с оборудованием программного обеспечения приводит к необходимости разрабатывать дополнительные скриптовые приложения для автоматизации приложений с графическим пользовательским интерфейсом (GUI). Соответствующие скриптовые приложения на языке разработаны отдельно для изменения настроек УФ-принтера, настроек автоматической раскройной машины и настроек принтера штрих-кода. Отдельные программные модули выполняют формирование команд управления для передачи в аппаратную часть и чтение сообщений от проверяемой приборной панели.

ПО формирования раскладки, разработанное на языке C#, считывает информацию о слоях изображения приборной панели из файла векторного формата CorelDraw и формирует новое изображение путем размещения копий исходного изображения на листе формата A2. Также на результирующее изображение раскладки добавляются специальные метки, предназначенные для автоматического определения положения листа при его раскрое. Автоматическая раскройная машина оснащена системой технического зрения, которая считывает положение меток и позволяет минимизировать погрешности, вызванные смещениями листа при его ручной заправке.

ПО управления приборной панелью использует среду передачи данных на основе интерфейса локальной сети контроллеров CAN для передачи сигналов управления стрелочными указателями, светодиодными индикаторами, камерами и т.д.

ПО модуля проверки использует систему технического зрения для контроля соответствия углового положения стрелочных указателей с уровнем сигнала; соответствия цвета, располо-

жения и состояния светодиодных индикаторов с управляющими сигналами; работоспособности камер и т.д. По результатам работы модуля поверки выводится заключение о работоспособности поверяемых электронных элементов приборной панели.

Блок видеонаблюдения служит для видеосъемки приборной панели и передачи цифрового видео в режиме реального времени для обработки ПО модуля поверки.

Необходимость интеграции оборудования в состав единого комплекса с единой системой управления вызвана тем, что режимы работы технологического оборудования тесно взаимосвязаны друг с другом и определяются видом изготавливаемой шкалы. Устройство и принцип действия автоматизированного технологического комплекса позволяют применить единое программное обеспечение для управления технологическим процессом, контроля параметров приборной панели, диагностики отдельных компонентов комплекса.

Использование комплекса позволяет обеспечить баланс между производительностью и гибкостью посредством применения компьютерных технологий и достичь высокой степени адаптации к быстроизменяющемуся рыночному потребительскому спросу. Процесс подготовки производства при модернизации существующей панели прибора или освоении новой сводится к разработке дизайна шкалы в векторном виде и алгоритма поверки панели прибора посредством системы технического зрения.

Применение предложенного комплекса для печати и раскроя пленочных шкал, а также поверки приборной панели позволяет повысить производительность и гибкость по сравнению с существующими аналоговыми способами печати шкал.

Библиографический список

1. Kim, S.-H. Vehicle instrument cluster layout differentiation for elderly drivers / S. H. Kim // Journal of the ergonomics society of Korea. – 2016. – Vol. 35 (5). – P. 449–464.
2. Green, P. Practical aspects of prototyping instrument clusters / P. Green, A. Olson // SAE transactions. – 1996. – Vol. 105. – P. 657–670.
3. Analogue versus Digital Speedometer: Effects on Distraction and Usability for Truck Driving / M. Francois, F. Osiurak, A. Fort, P. Crave, J. Navarro // Conference: Proceedings of european conference on human centred design for intelligent transport systems. – Loughborough, UK, 2016. – P. 18–26.
4. Francois, M. Gauges design for a digital instrument cluster: Efficiency, visual capture, and satisfaction assessment for truck driving / M. Francois, F. Osiurak, A. Fort, P. Crave, J. Navarro // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2019. – Vol. 7. – P. 290–297.
5. US patent 0157008 A1. Plastic film instrument cluster overlays and method of making / Johny G. Cooper, John D. Andersen. – 12.08.2004.
6. US patent 7435470 B2. Indicator panel for instrument and method of manufacturing the same / Y. Mig-taka, T. Iwase, M. Takahira. – 14.10.2008.
7. US patent 6856478 B1. Indicator panel for vehicle instrument panel and method of manufacture thereof / T. Miyanishi, T. Ohta. – 15.01.2005.
8. US patent 0016510 A1. Light guide film applied at instrument cluster / H. M. Alvarado. – 21.01.2006.
9. Заявка на патент № 20190224. Способ изготовления приборной шкалы и автоматизированная линия для его осуществления / Колпаков В. И., Зиновенко В. С., Сакевич В. Н., Кириллов А. Г. – 25.06.2019.
10. Kirillov, A. G. Automated laser engraving system for the calibration and manufacturing of nonlinear scales for electrical measuring instruments / A. G. Kirillov, V. N. Sakevich, R. Trochimczuk ; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E // Journal of Process Mechanical Engineering. – 2018. – DOI 10.1177/0954408918812248.

References

1. Kim S.-H. *Journal of the ergonomics society of Korea*. 2016, vol. 35 (5), pp. 449–464.
2. Green P., Olson A. *SAE transactions*. 1996, vol. 105, pp. 657–670.
3. Francois M., Osiurak F., Fort A., Crave P., Navarro J. *Conference: Proceedings of european conference on human centred design for intelligent transport systems*. Loughborough, UK, 2016, pp. 18–26.
4. Francois M., Osiurak F., Fort A., Crave P., Navarro J. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2019, vol. 7, pp. 290–297.
5. US patent 0157008 A1. *Plastic film instrument cluster overlays and method of making*. Johny G. Cooper, John D. Andersen. 12.08.2004.
6. US patent 7435470 B2. *Indicator panel for instrument and method of manufacturing the same*. Y. Mig-taka, T. Iwase, M. Takahira. 14.10.2008.

7. US patent 6856478 B1. *Indicator panel for vehicle instrument panel and method of manufacture thereof*. T. Miyanishi, T. Ohta. 15.01.2005.
8. US patent 0016510 A1. *Light guide film applied at instrument cluster*. H. M. Alvarado. 21.01.2006.
9. *Zayavka na patent № 20190224. Sposob izgotovleniya pribornoy shkaly i avtomatizirovannaya liniya dlya ego osushchestvleniya* [Patent application no. 20190224. Method of manufacturing the instrument scale and automated line for its implementation]. Kolpakov V. I., Zinovenko V. S., Sakevich V. N., Kirillov A. G. 25.06.2019.
10. Kirillov A. G., Sakevich V. N., Trochimczuk R.; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2018. DOI 10.1177/0954408918812248.

Кириллов Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных систем
и автоматизации производства,
Витебский государственный
технологический университет
(Республика Беларусь, г. Витебск,
Московский проспект, 72)
E-mail: kirillov.malp@gmail.com

Kirillov Alexey Gennadievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information systems
and production automation,
Vitebsk State Technological University
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk,
Republic of Belarus)

Сакевич Валерий Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра физики и технической механики,
Витебский государственный
технологический университет
(Республика Беларусь, г. Витебск,
Московский проспект, 72)
E-mail: igsakevich@yandex.by

Sakevich Valeriy Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of physics
and technical mechanics,
Vitebsk State Technological University
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk,
Republic of Belarus)

Образец цитирования:

Кириллов, А. Г. Автоматизированный комплекс для изготовления пленочных шкал и поверки приборных панелей / А. Г. Кириллов, В. Н. Сакевич // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 27–34. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-3.

А. Н. Дорохов, С. Г. Ковалевский, А. В. Лукичев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ПОДМЕННОГО ФОНДА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕДОМСТВЕННЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

A. N. Dorokhov, S. G. Kovalevsky, L. V. Lukichev

DETERMINATION OF THE VOLUME OF THE REPLACEMENT FUND OF MEASUREMENTS INSTRUMENTS DURING VERIFICATION IN THE DEPARTMENTAL METROLOGICAL UNITS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Проведение поверки средств измерений зачастую сопряжено с необходимостью длительного их изъятия из эксплуатирующих организаций. Выходом в данной ситуации является формирование подменного фонда средств измерений в ведомственных метрологических подразделениях. Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью обоснования состава такого подменного фонда. В связи с этим авторы работы ставили перед собой целью получение адекватных расчетных соотношений, которые позволили бы определить объем подменного фонда средств измерений, обеспечивающий нормальное функционирование ведомственного метрологического подразделения. **Результаты.** В работе для оценки эффективности функционирования ведомственного метрологического подразделения использован математический аппарат замкнутой многоканальной системы массового обслуживания с неограниченной очередью. На основе комплексных показателей эффективности авторы получили соотношения, позволяющие определить необходимый объем подменного фонда средств измерений ведомственных метрологических подразделений. **Выводы.** Полученные в работе соотношения позволяют провести оценку целесообразности создания обменного фонда и рассчитать его объем. Адекватность таких оценок способствует сокращению избыточности средств измерений и, как следствие, снижению затрат на их закупку, эксплуатацию, обслуживание и утилизацию. С другой стороны, наличие правильно сформированного обменного фонда повышает готовность организаций, решающих целевые задачи, что подтверждается полученными в работе соотношениями.

A b s t r a c t. Background. Verification of measuring instruments often involves the need for long-term removal from operating organizations. The decision in this situation is the formation of a exchange fund of measuring instruments in departmental metrological divisions. Thus, the relevance of the work is due to the need to justify the composition of such a exchange fund. In this regard, the authors of the work set themselves the goal of obtaining adequate calculation ratios that would make it possible to determine the volume of the exchange fund of measuring instruments, which ensures the normal functioning of the departmental metrological division. **Results.** In work for assess the efficiency of the departmental metrological division a mathematical apparatus of a closed multi-channel queuing system with an unlimited queue is used. Based on complex performance indicators, the authors obtained ratios that allow determining the necessary amount of the exchange fund of measuring instruments of departmental

metrological divisions. **Conclusion.** The ratios obtained in the work make it possible to assess the feasibility of creating an exchange fund and calculate its volume. The adequacy of such estimates helps to reduce the redundancy of measuring instruments, and, as a result, reduces the cost of their purchase, operation, maintenance and disposal. On the other hand, the presence of a properly formed exchange fund increases the readiness of organizations solving target tasks, which is confirmed by the ratios obtained in the work.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ведомственные метрологические подразделения, подменный фонд, поверка средств измерений, система массового обслуживания.

Key words: departmental metrological divisions, replacement fund, calibration of measuring instruments, queuing system.

Решение целевых задач во многих областях человеческой деятельности при современном уровне развития техники требует использования средств измерений (СИ), позволяющих обеспечить требуемую точность и достоверность измерений. Использование точно измеренного количества вещества в нанотехнологиях, заправка ракеты-носителя при выведении космического аппарата, обеспечение действия высокоточных производственных линий в современных производствах предполагают наличие единства измерений и качественного метрологического обеспечения. Эксплуатационно-технические характеристики технических систем, решающих целевые задачи, оказываются зависимыми от качества измерений и характеристик СИ.

Единство измерений может быть обеспечено, если единицы величин унифицированы, размеры величин передаются от эталонов средствам измерений, эталоны и методики передачи размера величины совершенствуются, результаты измерений обладают свойствами метрологической сопоставимости и метрологической совместимости, а показатели точности измерений выражены так, что обеспечивается возможность сравнения и совместного использования результатов измерений.

Одним из условий достижения единства измерений и обеспечения их точности является квалифицированное содержание и применение средств измерений, соблюдение обязательных требований к СИ, в том числе обеспечение их метрологической исправности – состояния, определяемого соответствием нормируемых метрологических характеристик СИ или эталона установленным требованиям [1, 2]. Метрологическую неисправность определяют только метрологические отказы. Обнаружить наличие метрологического отказа в процессе эксплуатации или хранения СИ или эталона единицы величины можно лишь путем контроля его метрологических характеристик, осуществляемого при периодической поверке или аттестации, выполняемой через равные промежутки времени, называемые интервалами между поверками или аттестациями [3–5].

Метрологические отказы СИ, используемых для определения либо технического состояния техники, решающей целевые задачи, либо ее тактико-технических и эксплуатационных характеристик, напрямую определяют ее надежность, готовность и работоспособность. Изъятие СИ для проведения поверки может оказать негативное воздействие на достижение цели и должно быть учтено при планировании и решении целевых задач (РЦЗ).

Для оценки качества РЦЗ в системе «человек – техника – среда» в наибольшей степени подходят комплексные характеристики системы, учитывающие взаимодействие человека с техникой в условиях внешней среды при выполнении определенной целевой задачи. Они служат для оценки приспособленности технической системы к выполнению целевых задач и системы обеспечения эксплуатации – к поддержанию технической системы в этом состоянии. Среди комплексных характеристик безопасности, надежности, эффективности процесса целевой эксплуатации необходимо выделить такую характеристику, как готовность к применению, т.е. к решению целевых задач. Готовность – основная комплексная характеристика системы эксплуатации многих видов техники, в том числе систем энергетики, связи, вооружения, поскольку позволяет учитывать особенности эксплуатации.

Под готовностью будем понимать свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных ре-

жимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены [1]. Готовность – это свойство технической системы, отражающее ее приспособленность к переводу из любого исходного состояния в состояние непосредственного применения по назначению. Именно поэтому в качестве характеристики приспособленности организации, решающей целевые задачи (ОРЦЗ), к выполнению задач по назначению часто используют готовность.

В решении целевых задач, как правило, участвуют несколько подразделений ОРЦЗ и различные виды техники, а общий эффект определенным образом зависит от показателей готовности каждой из составных частей системы. Таким образом, вклад в общую готовность ОРЦЗ вносят те ее подразделения, от которых зависит результат РЦЗ, в том числе и метрологическое подразделение (МП), обеспечивающее решение целевых задач.

Часто используемым показателем готовности является коэффициент готовности – вероятность того, что техническая система окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых ее применение по назначению не предусматривается [2]. В случае использования коэффициента готовности $K_{гм}$ для оценивания МП его можно трактовать как вероятность того, что в произвольный момент времени в ОРЦЗ не произойдет срыв решения целевой задачи из-за метрологического отказа, который может произойти, если СИ, необходимые при РЦЗ, не будут своевременно поверены, или если поверенные СИ окажутся метрологически неисправными:

$$K_{гм} = 1 - P_{срцз}, \quad (1)$$

где $P_{срцз}$ – вероятность срыва решения целевой задачи из-за метрологического отказа. Эта вероятность определяется по формуле

$$P_{срцз} = (1 - P_{ми})(1 - P_{пп}), \quad (2)$$

где $P_{ми}$ – вероятность того, что все допущенные к применению после поверки СИ являются метрологически исправными; $P_{пп}$ – вероятность того, что все СИ, необходимые при РЦЗ, своевременно поверены.

Вероятность $P_{миij}$ того, что допущенное к применению после поверки единичное i -е СИ j -го типа является метрологически исправным, т.е. вероятность отсутствия метрологических отказов между поверками этого СИ равна [3]

$$P_{миij} = P_j (1 - q_{ij})(1 - Q_{ij})(1 - \alpha_{ij}), \quad (3)$$

где P_j – вероятность не возникновения метрологического отказа между поверками (аналог вероятности безотказной работы СИ j -го типа в межповерочном интервале); q_{ij} – вероятность повреждения или метрологического отказа i -го СИ j -го типа в процессе поверки; $(1 - q_{ij})$ – вероятность того, что при поверке это СИ не будет повреждено и не перейдет в состояние метрологического отказа; Q_{ij} – вероятность повреждения i -го СИ j -го типа в межповерочный интервал времени; $(1 - Q_{ij})$ – вероятность того, что при эксплуатации в межповерочном интервале это СИ не будет повреждено; α_{ij} – вероятность забракования поверителем метрологически исправного i -го СИ j -го типа по результатам поверки (вероятность ошибки первого рода); $(1 - \alpha_{ij})$ – вероятность того, что метрологически исправное i -е СИ j -го типа будет признано поверителем пригодным к применению по результатам поверки. Вероятности q_{ij} и α_{ij} зависят от квалификации поверителя, а вероятность Q_{ij} – от квалификации персонала, обслуживающего и использующего СИ при решении целевых задач.

Предположим, что вероятность $\alpha_{ij} = \alpha$ неизменна для всех типов СИ, а для однотипных СИ $q_{ij} = \text{const} = q_j$ и $Q_{ij} = \text{const} = Q_i$. Тогда

$$P_{\text{мн}ij} = P_j (1 - q_{ij}) (1 - Q_{ij}) (1 - \alpha_{ij}) = P_j (1 - q_j) (1 - Q_j) (1 - \alpha) , \quad (4)$$

а вероятность $P_{\text{ми}}$ того, что все допущенные к применению после поверки и используемые при РЦЗ СИ метрологически исправны, равна

$$P_{\text{ми}} = \prod_{j=1}^D \prod_{i=1}^{m_j} P_{\text{мн}ij} , \quad (5)$$

где m_j – общее количество однотипных СИ j -го типа, необходимое при РЦЗ; D – количество типов СИ, используемых при РЦЗ.

Анализ выражения (5) позволяет сделать заключение о том, что вероятность $P_{\text{ми}}$ зависит от надежности, в том числе и метрологической, каждого типа СИ, используемого при РЦЗ, от квалификации эксплуатирующего СИ персонала и от квалификации поверителей, выполняющих поверку, устанавливающих пригодность СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждающих соответствие СИ установленным обязательным требованиям. Параметры q_j и α могут быть оценены статистически в процессе функционирования МП, а вероятности безотказной работы P_j и повреждения СИ в процессе эксплуатации Q_j могут быть оценены по данным эксплуатации данного типа СИ.

Если предположить, что имеющееся в ОРЦЗ по штату количество m_j СИ данного j -го типа достаточно для РЦЗ, то событие, заключающееся в том, что все СИ этого типа, необходимые для РЦЗ, были своевременно поверены, происходит при правильном планировании поверки в ОРЦЗ при условии, что на поверке СИ не будет задержано. Вероятность такого события равна

$$P_{\text{пл}j} = P_{\text{пл}} (1 - P_{\text{зад}j}) , \quad (6)$$

где $P_{\text{пл}j}$ и $P_{\text{зад}j}$ – вероятности правильного планирования поверки и задержки на поверке СИ j -го типа. Вероятность того, что все СИ, необходимые при РЦЗ в ОРЦЗ, своевременно поверены, равна

$$P_{\text{пл}} = \prod_{j=1}^D P_{\text{пл}j} . \quad (7)$$

Значение вероятности $P_{\text{пл}j}$ можно определить путем анализа качества планирования поверки СИ в данной ОРЦЗ. Если поверка спланирована правильно, то срывов РЦЗ по вине метрологов, планирующих поверку в ОРЦЗ нет, и можно предположить, что $P_{\text{пл}} = 1$. Вероятность $P_{\text{зад}j}$ зависит от параметров, характеризующих работу осуществляющего поверку метрологического подразделения: длительности поверки данного типа СИ; количества каналов обслуживания (КО), т.е. аттестованных поверителей, обеспеченных рабочими местами по поверке данного типа СИ; дисциплины обслуживания; наличия очереди на обслуживание и определяется вероятностью ожидания СИ в очереди на поверку.

Вероятность $(1 - P_{\text{зад}j})$ того, что все СИ, необходимые для решения целевых задач, своевременно поверены, при условии, что процессы планирования поверки не имеют изъянов, можно определить, проанализировав процесс поверки СИ, который можно рассматривать как процесс массового обслуживания и оценивать с помощью показателей, используемых в теории массового обслуживания.

Под системой массового обслуживания (СМО) в данном случае будем понимать аттестованное надлежащим образом МП, являющееся структурным подразделением ОРЦЗ и способное выполнять поверочные работы в его интересах.

Схему функционирования метрологического подразделения можно представить в виде СМО (рис. 1), в которую из ОРЦЗ, имеющей m_j необходимых для РЦЗ однотипных СИ, в МП поступает входящий поток заявок на поверку с параметром потока h_k , где k – количество заявок. В число необходимых однотипных СИ следует включать только те СИ, отсутствие которых приведет к срыву решения целевых задач. Если в ОРЦЗ имеется z_j однотипных СИ, v_j из которых являются запасными, то $m_j = z_j - v_j$. При поступлении в МП заявки на поверку СИ могут быть поставлены в очередь длиной r . Поверка выполняется n КО, число которых равно количеству аттестованных поверителей, обеспеченных рабочими местами по поверке данного типа СИ. В ОРЦЗ из МП возвращаются поверенные СИ с параметром потока μ_k .

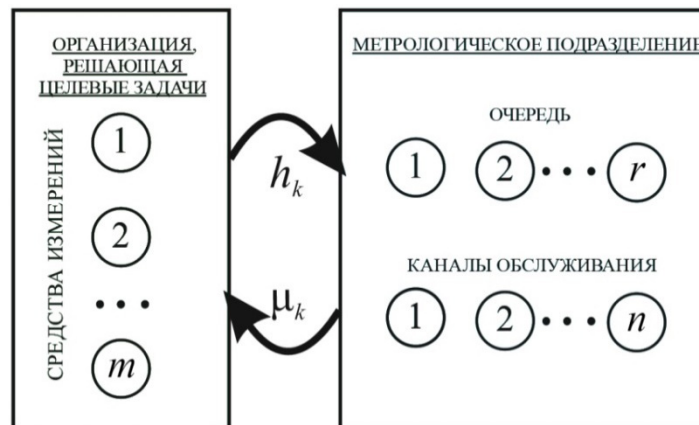


Рис. 1. Метрологическое подразделение как система массового обслуживания

Такая СМО может быть представлена моделью МП, обслуживающего конечное число m_j СИ j -го типа, необходимых для РЦЗ и не поверяемых в других метрологических подразделениях. Будем считать, что поверка является бесприоритетной, а число каналов обслуживания СИ j -го типа меньше числа таких СИ ($n_j < m_j$).

Такая система массового обслуживания является замкнутой. Вторичные и рабочие эталоны, обеспечивающие передачу размера величины в замкнутой системе ведомственной поверки не только обеспечивают метрологические характеристики СИ ОРЦЗ, но и влияют на готовность и эксплуатационно-технические характеристики техники, решающей целевые задачи.

Параметр h_k входного потока заявок на поверку СИ обусловлен количеством СИ данного типа, межповерочным интервалом таких СИ, правильностью планирования поверки. Если поверка организована и спланирована правильно, можно считать, что параметры потоков заявок на поверку каждого из m обслуживаемых СИ одинаковы и равны h . Тогда параметр входного потока заявок из ОРЦЗ на поверку СИ будем считать ординарным и равным $h_k = (m - k)h$ при $0 \leq k \leq m$.

Параметр μ_k потока возвращения поверенных СИ из МП зависит от параметра потока возвращения поверенных СИ единичного канала обслуживания μ и количества КО n . Если для всех однотипных СИ длительность поверки определяется временными нормами на поверку, то можно предположить, что параметр потока возвращения поверенных СИ от каждого КО $\mu = \text{const}$, а из МП равен

$$\mu_k = \mu k \quad \text{при } 1 \leq k \leq n; \quad \mu_k = \mu n \quad \text{при } n \leq k \leq m. \quad (8)$$

Если потоки заявок на поверку и возвращения СИ ординарны и переходы возможны лишь между соседними состояниями (под состоянием СМО в данном случае понимаем количество заявок на поверку, поступивших в МП), модель такой СМО может быть представлена в виде графа (рис. 2).

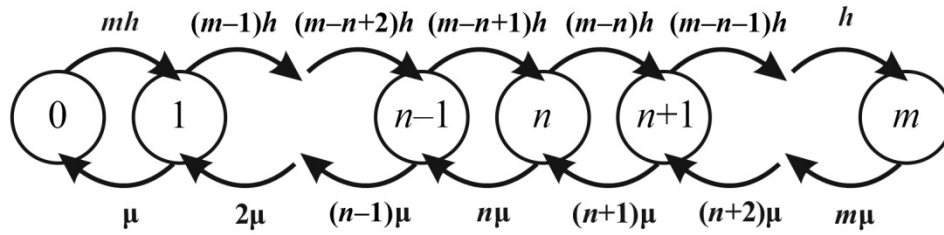


Рис. 2. Граф переходов СМО, соответствующий модели ведомственного метрологического подразделения

В этой модели СМО может поочередно переходить из одного состояния в другое. Условия нормировки в такой СМО определяют формулой

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1, \quad (9)$$

где P_k – вероятности нахождения СМО в различных состояниях $k = 0(1)\infty$, которые вычисляются при помощи нижеупомянутых выражений.

Вероятность нахождения МП в k -м состоянии, т.е. вероятность поступления в МП ровно k заявок на поверку, определяется выражением [7]

$$P_k = P_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{h(m-i)}{\mu(i+1)}. \quad (10)$$

В случае, когда число заявок не превосходит числа каналов обслуживания данного типа СИ $k \leq n$, вероятность нахождения МП в k -м состоянии равна

$$P_k = P_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{h(m-i)}{\mu(i+1)} = P_0 \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!k!}. \quad (11)$$

Если же число заявок больше числа каналов обслуживания, т.е. $n < k \leq m$, то вероятность P_k может быть рассчитана по формуле

$$\begin{aligned} P_k &= P_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{h(m-i)}{\mu(i+1)} = P_0 \prod_{i=0}^{n-1} \frac{h(m-i)}{\mu(i+1)} \prod_{j=n}^{k-1} \frac{h(m-j)}{\mu n} = \\ &= P_0 \frac{h^k}{\mu^k} \frac{\prod_{l=0}^{k-1} (m-l)}{n^{(k-n)} \prod_{i=0}^{n-1} (i+1)} = P_0 \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!n!n^{(k-n)}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вероятность P_0 отсутствия заявок на поверку СИ в МП, т.е. вероятность его простоя, можно определить из условия нормировки (9):

$$\begin{aligned} P_0 &= 1 - \sum_{k=1}^m P_k = 1 - \sum_{k=1}^n P_0 \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!k!} - \sum_{k=n+1}^m P_0 \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!n!n^{(k-n)}} = \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!k!} + \sum_{k=n+1}^m \frac{h^k}{\mu^k} \frac{m!}{(m-k)!n!n^{(k-n)}}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Загрузку МП характеризует среднее число находящихся на поверке СИ.

Так как количество заявок на поверку, определяющее номер состояния СМО, является дискретной случайной величиной, среднее число заявок в МП на поверку СИ j -го типа может быть вычислено по формуле

$$N_{zj} = \sum_{k_j=1}^{m_j} k_j P_{k_j}. \quad (14)$$

Среднее число поверяемых СИ j -го типа в МП, имеющем n КО, равно

$$N_{\text{пов}j} = \sum_{k_j=1}^{n_j} k_j P_{k_j} . \quad (15)$$

Если число заявок на поверку СИ j -го типа больше числа каналов обслуживания, $k_j > n_j$, то средняя длина образующейся очереди

$$N_{\text{оч}j} = \sum_{k_j=n_j+1}^{m_j} (k_j - n_j) P_{k_j} . \quad (16)$$

Вероятность того, что СИ j -го типа сразу будет поставлено на поверку, равна

$$P_{\text{пов}j} = \sum_{k_j=1}^{n_j} P_{k_j} , \quad (15)$$

а вероятность ожидания в очереди

$$P_{\text{зая}j} = 1 - P_{\text{пов}j} = 1 - \sum_{k_j=1}^{n_j} P_{k_j} = \sum_{k_j=n_j+1}^{m_j} P_{k_j} . \quad (16)$$

Если число заявок на поверку не больше числа каналов обслуживания, т.е. $k \leq n$, то среднее число свободных КО в МП определяется по формуле

$$M_{\text{ко}j} = \sum_{k_j=0}^{n_j-1} (n_j - k_j) P_{k_j} . \quad (17)$$

Поскольку в МП СИ поверяют беспriorитетно, то вероятность $P_{\text{пн}j}$ того, что все СИ поверяемого j -го типа, необходимые для решения целевых задач в ОРЦЗ, поверены в срок, равна вероятности $P_{\text{пов}j}$ того, что СИ j -го типа сразу будет поставлено в МП на поверку

$$P_{\text{пн}j} = P_{\text{пов}j} = \sum_{k_j=1}^{n_j} P_{k_j} . \quad (18)$$

Вероятность $P_{\text{пн}}$ того, что все СИ, необходимые для решения целевых задач, поверены, в этом случае равна

$$P_{\text{пн}} = \prod_{j=1}^D P_{\text{пн}j} = \prod_{j=1}^D \sum_{k_j=1}^{n_j} P_{k_j} = \prod_{j=1}^D (1 - P_{\text{зая}j}) = \prod_{j=1}^D \sum_{k_j=n_j+1}^{m_j} P_{k_j} . \quad (19)$$

Исходя из вышеизложенного, коэффициент готовности МП ОРЦЗ можно рассчитать с помощью выражения

$$K_{\text{гм}} = (1 - P_{\text{срцз}}) = [1 - (1 - P_{\text{ми}})(1 - P_{\text{пн}})] = [1 - (1 - \prod_{j=1}^D \prod_{i=1}^{m_j} P_{\text{ми}ij}) (1 - \prod_{j=1}^D \sum_{k_j=1}^{n_j} P_{k_j})] , \quad (20)$$

из которого следует, что готовность МП и ОРЦЗ в целом зависит от характеристик МП, осуществляющего передачу размера единицы величины от эталона средствами измерения, а также от организации поверочных работ и транспортирования СИ на поверку в МП и обратно.

Для своевременного и качественного выполнения целевых задач и для повышения готовности ОРЦЗ необходимо либо увеличивать количество аттестованных поверителей, обеспеченных рабочими местами по поверке СИ (каналов обслуживания), либо компенсировать отсутствие СИ при РЦЗ дополнительными СИ, находящимися в подменном фонде МП.

Целесообразность создания такого фонда может быть определена с помощью экономического критерия, позволяющего сравнить и минимизировать потери от приобретения СИ и

содержания подменного фонда и потери от невыполнения целевых задач из-за отсутствия СИ, находящихся на поверке.

Предположим, что штатное количество СИ j -го типа в ОРЦЗ достаточно для обеспечения РЦЗ при правильной организации поверки СИ. При отсутствии очереди в МП количество СИ j -го типа в подменном фонде можно определить равным среднему числу таких СИ, находящихся на поверке, т.е. числу заявок на поверку $N_{зj} < m_j$ на интервале времени, равном обычной длительности их нахождения на поверке τ_n , с учетом временных затрат на демонтаж и монтаж СИ j -го типа в ОРЦЗ τ_n и длительности транспортирования СИ в МП и обратно τ_m :

$$N_{\text{пф}oj} = N_{зj} \frac{\tau_{nj} + \tau_{mj} + \tau_m}{\tau_{nj}}. \quad (21)$$

При наличии очереди на поверку дополнительное количество N_{dj} однотипных СИ j -го типа в подменном фонде ОРЦЗ, необходимое для восполнения СИ, ожидающих поверки, можно определить, приняв это число равным длине очереди

$$N_{dj} = N_{очj} = \sum_{k_j=n_j+1}^{m_j} (k_j - n_j) P_k. \quad (22)$$

Суммарное количество СИ j -го типа в подменном фонде ОРЦЗ равно

$$N_{\text{пф}oj} = (N_{зj} + N_{dj}) \frac{\tau_{nj} + \tau_{mj} + \tau_m}{\tau_{nj}}. \quad (23)$$

Заключение

Таким образом, показатели эффективности функционирования ОРЦЗ при поверке СИ в МП зависят от характера потока заявок на поверку h , числа n аттестованных поверителей, обеспеченных рабочими местами по поверке СИ, характеристик потоков обслуживания, организации очереди и дисциплины обслуживания.

Комплексные характеристики МП влияют на качество решения целевых задач и поэтому в МП необходимо создавать собственный подменный фонд СИ для восполнения необходимого числа СИ, находящихся на поверке, в объеме $N_{\text{пф}o}$ СИ.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва, 2016.
2. Дорохов, А. Н. Обеспечение надежности сложных технических систем : учебник / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. Л. Шестопалова. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 352 с.
3. Дорохов, А. Н. Выбор оптимального по критерию готовности интервала между аттестациями эталона / А. Н. Дорохов, А. П. Гончаров // Информация и космос. – 2019. – № 3. – С. 84–87.
4. РМГ 74–2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – Москва, 2006. – 22 с.
5. Кравцов, А. Н. Метрология : учебник / А. Н. Кравцов, А. Н. Дорохов, Р. О. Лавров. – Санкт-Петербург : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2019. – 313 с.

References

1. GOST 27.002–2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and definitions]. Moscow, 2016. [In Russian]
2. Dorokhov A. N., Kernozhitskiy V. A., Mironov A. N., Shestopalova O. L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem: uchebnik* [Ensuring the reliability of complex technical systems: textbook]. Saint-Petersburg: Lan', 2017, 352 p. [In Russian]
3. Dorokhov A. N., Goncharov A. P. *Informatsiya i kosmos* [Information and space]. 2019, no. 3, pp. 84–87. [In Russian]

4. RMG 74–2004 GSI. *Metody opredeleniya mezhpoverochnykh i mezhkalibrovochnykh intervalov sredstv izmereniy* [RMG 74-2004 GSI. Methods for determining calibration and calibration intervals of measuring instruments]. Moscow, 2006, 22 p. [In Russian]
5. Kravtsov A. N., Dorokhov A. N., Lavrov R. O. *Metrologiya: uchebnik* [Metrology: textbook]. Saint-Petersburg: VKA imeni A. F. Mozhayskogo, 2019, 313 p. [In Russian]

Дорохов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра 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

Dorokhov Alexander Nikolaevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of metrological support of arms,
military and special equipment,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Ковалевский Сергей Георгиевич

кандидат технических наук, преподаватель,
кафедра 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

Kovalevsky Sergey Georgievich

candidate of technical sciences, lecturer,
sub-department of metrological support of arms,
military and special equipment,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Лукичев Леонид Викторович

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

Lukichev Leonid Viktorovich

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

Образец цитирования:

Дорохов, А. Н. Определение объема подменного фонда средств измерений ведомственных метрологических подразделений / А. Н. Дорохов, С. Г. Ковалевский, Л. В. Лукичев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 35–43. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-4.

А. С. Ильин, И. А. Кострикина, А. П. Воронов, Р. Ф. Плаксунов

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ УПК-30ПТ

A. S. Ilin, I. A. Kostrikina, A. P. Voronov, R. F. Plaksunov

INSTALLATION FOR VERIFICATION OF KILOVOLT METERS UPK-30PT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность разрабатываемой установки для поверки киловольтметров определяется постоянно растущими требованиями к модернизации и совершенствованию метрологического обеспечения новых средств измерений (СИ) высоких напряжений. Целью работы является ознакомление с результатами разработки, а также описание ее функционирования. **Материалы и методы.** Для решения данной задачи использовался метод сличения поверяемого СИ с образцовым СИ того же вида. **Результаты.** В ходе работы разработана установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Проведены испытания в целях утверждения типа средств измерений установки УПК-30ПТ. **Выводы.** Положительные результаты работы открывают перспективу полной замены устаревших установок УПК-100 или У400 на отечественную, современную, малогабаритную и автоматизированную трехканальную измерительную систему с рабочими напряжениями до 100 кВ.

A b s t r a c t. Background. The relevance of the developed installation for checking kilovoltmeters is determined by the constantly growing requirements for the modernization and improvement of metrological support for new high-voltage measuring instruments (SI). The purpose of the work is to get acquainted with the results of the development, as well as a description of its operation. **Materials and methods.** To solve this problem, we used the method of comparing the verified SI with the model SI of the same type. **Results.** In the course of the work, an installation for checking kilovoltmeters of the UPK-30PT was developed. Tests were carried out in order to approve the type of measuring instruments of the UPK-30PT installation. **Conclusions.** Positive results of the work open the prospect of complete replacement of outdated installations of the UPK-100 or U400 with a domestic, modern, small-sized and automated three-channel measuring system with operating voltages up to 100 kV.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокое напряжение, канал, делитель напряжения, измерение, интерфейс.

К e y w o r d s: high voltage, channel, voltage divider, measurement, interface.

Создание и широкое применение в последние годы новых средств измерений высоких (до 30 кВ) напряжений классов 1, 0,5 % вызвало настоятельную необходимость модернизации и совершенствования их метрологического обеспечения.

Результатом поиска путей решения поставленной проблемы было создание компактной установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ (масса менее 40 кг), работающей в ручном и автоматизированном режимах. Диапазон воспроизведений и измерений напряжения постоянного тока – от 1 до 30 кВ. Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения постоянного тока составляют $\pm 0,1$ %. Данная установка заменяет в вышеуказанном диапазоне напряжений установку УПК-100 (масса 600 кг) и разработанную

позднее У-400 (масса 400 кг). При этом установка рассматривается как трехканальная измерительная система, управляемая персональным компьютером (ПК), один из каналов которой воспроизводит заданное оператором напряжение, а два других преобразовывают и передают измерительную информацию с образцового и поверяемого киловольтметров на ПК. Результаты измерений сравниваются и сохраняются в памяти ПК или в виде протокола измерений на бумажном носителе.

Воспроизводимое первым каналом напряжение получается преобразованием напряжения питания в напряжение постоянного тока с регулируемой амплитудой, которое с помощью умножителя увеличивается до необходимого уровня. Второй канал представляет собой измерительный масштабный преобразователь (омический делитель высокого напряжения) и цифровой вольтметр с выходом в виде разъема интерфейса RS-232 для связи с ПК. Третий канал представляет собой поверяемый киловольтметр, соединяемый через интерфейс с ПК.

Конструктивно установка выполнена в настольном исполнении и состоит из источника высокого напряжения и измерителя напряжения.

Источник высокого напряжения состоит из двух блоков: управляемого источника высокого напряжения УИВН и регулируемого источника опорного напряжения РИОН-10.

В качестве управляемого источника высокого напряжения использован источник напряжения Spellman SMS30P60.

Регулируемый источник опорного напряжения двухканальный РИОН-10 предназначен для питания управляемого источника высокого напряжения стабилизированным постоянным напряжением и формирования управляющего напряжения на входе УИВН. На задней панели источника имеется разъем интерфейса RS-232 для связи с ПК.

Измеритель напряжения представляет собой образцовый цифровой киловольтметр, состоящий из двух блоков: делителя напряжения высоковольтного ДНВ-30ПТ и вольтметра СКВ-30ПТ.

ПК имеет специальное программное обеспечение, с помощью которого по команде оператора запускается процесс измерения, включающий: выработку команды на включение высокого напряжения; выработку команды на одновременное включение образцового и поверяемого киловольтметров; выработку команд на передачу результатов измерений на ПК и т.д.

В установке используется метод сличения поверяемого СИ с образцовым СИ того же вида.

Структурная схема установки приведена на рис. 1.

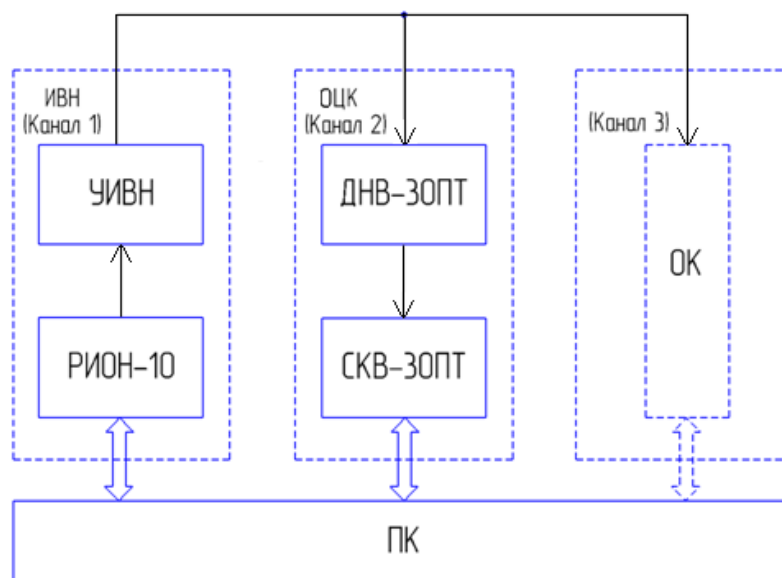


Рис. 1. Структурная схема установки:

ИВН (Канал 1) – источник высокого напряжения; УИВН – управляемый источник высокого напряжения SMS30P60 фирмы «Spellman»; РИОН-10 – регулируемый источник опорного напряжения; ОЦК (Канал 2) – образцовый цифровой киловольтметр; ДНВ-30ПТ – делитель напряжения высоковольтный; СКВ-30ПТ – блок измерительный киловольтметра постоянного тока; ОК (Канал 3) – объект контроля; ПК – персональный компьютер

Канал 1 установки отвечает за воспроизведение высокого напряжения. Программа управления с ПК устанавливает опорное напряжение с регулируемой амплитудой на выходе блока РИОН-10 и подает команду на включение выходного напряжения и напряжения питания блока УИВН через интерфейс RS-232. РИОН-10 имеет одностороннюю связь с блоком УИВН типа Spellman SMS30P60. УИВН усиливает опорное напряжение в 3000 раз. В результате на выходе канала 1 образуется высокое напряжение в диапазоне от 1 до 30 кВ.

Канал 2 установки является образцовым измерительным каналом. Высокое напряжение с выхода канала 1 поступает на вход высоковольтного делителя напряжений ДНВ-30ПТ, который преобразует входное высокое напряжение в напряжение 1-30 В. ДНВ-30ПТ является высоковольтной частью измерителя напряжения и имеет непосредственную связь с вольтметром СКВ-30ПТ. Преобразованное напряжение с выхода ДН поступает на вход вольтметра, где происходит измерение. Выбор быстрого действия, процесс запуска измерения и выработка команды опроса результатов измерений блока СКВ-30ПТ контролируются программой управления на ПК с помощью интерфейса RS-232.

Канал 3 установки – канал объекта контроля. Контролируемый высоковольтный делитель напряжений и его цифровой вольтметр совместно представляют собой объект контроля, являющийся высоковольтным измерителем напряжения. Высокое напряжение с выхода канала 1 поступает на вход контролируемого высоковольтного делителя объекта контроля. Интерфейс RS-232 позволяет связать поверяемый измеритель с ПК. Программа управления осуществляет одновременный с каналом 2 запуск измерения и дальнейшую выработку команды опроса результатов измерений поверяемого вольтметра.

Важной особенностью установки УПК-30ПТ в автоматизированном режиме с использованием ПК является возможность подключения различных измерителей напряжений, режимы поверки которых установлены в НТД на поверяемые СИ (например, вольтметр В7-40: время до подачи напряжения – 1 мин; время до измерения – 2 мин).

Временная диаграмма работы системы изображена на рис. 2.

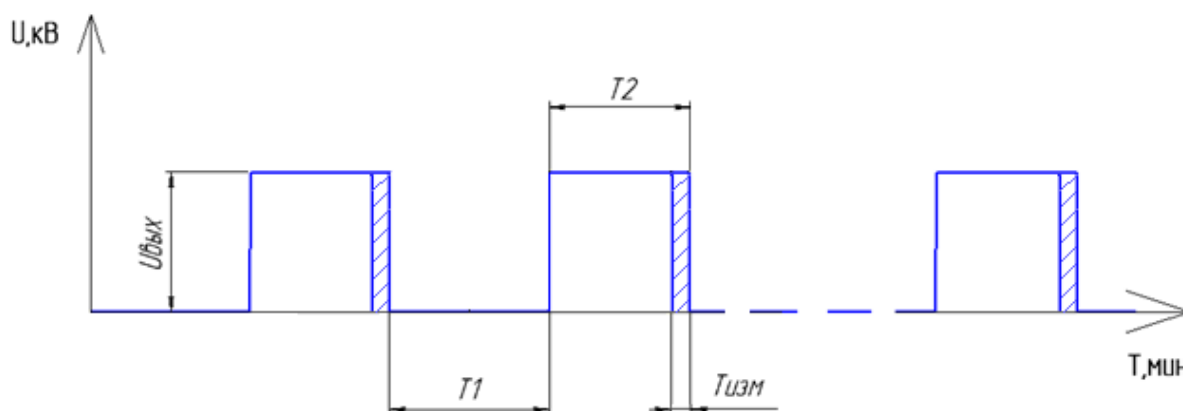


Рис. 2. Временная диаграмма работы установки УПК-30ПТ:
 $U_{\text{вых}}$ – выходное высокое напряжение; T_1 – время до подачи напряжения;
 $T_{\text{изм}}$ – время измерения; T_2 – время выдержки под напряжением

При работе в непрерывном режиме погрешность системы возрастает благодаря нестабильности компонентов. Однако рассматриваемый режим работы позволяет повысить точность измерения, используя менее стабильный источник высокого напряжения путем сокращения временных интервалов воздействия напряжения, а также устанавливать соотношения интервалов времени T_1 и T_2 , в которых погрешность не превышает заданного на установку значения.

Время выдержки под напряжением T_2 намного больше времени измерений $T_{\text{изм}}$, которое включает время непосредственного измерения и время нахождения киловольтметра под напряжением после завершения процесса измерения. Время выдержки до измерения позволяет установиться переходным процессам в образцовом и контролируемом первичных высоковольтных преобразователях. Возможность программной регулировки количества измерений

в секунду дает возможность подстраивать систему в целом к работе с объектом контроля, имеющим свой вольтметр. Благодаря чему имеется возможность точного сравнения результатов измерений. Применение ПК позволяет производить одновременный запуск измерений и последовательный опрос блоков измерительных, тем самым устраняет так называемую погрешность оператора. Автоматическая фиксация измерений с дальнейшим сравнением повышает точность системы. А последующее формирование протокола результатов измерений с учетом его сохранения в память ПК или распечатку на бумажный носитель делает установку более мобильной, а также позволяет облегчить работу оператора.

Внешний вид установки приведен на рис. 3.

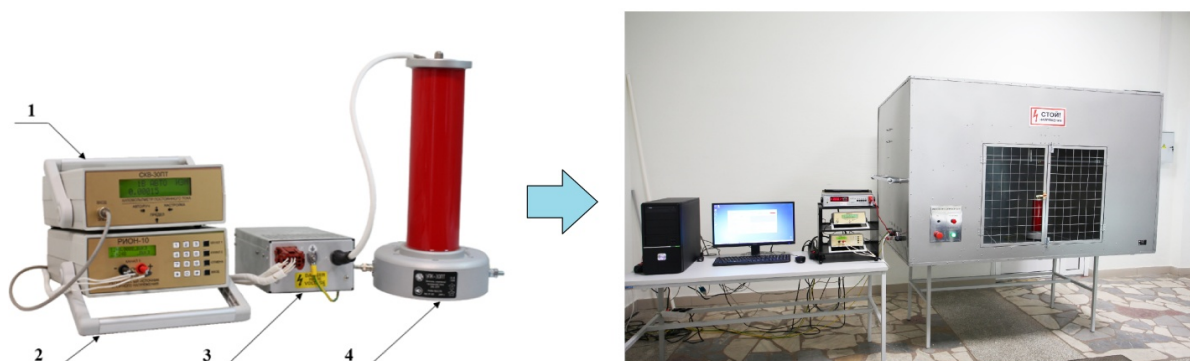


Рис. 3. Внешний вид установки УПК-30ПТ:

1 – блок измерительный киловольтметра постоянного тока (СКВ-30ПТ); 2 – регулируемый источник опорного напряжения (РИОН-10); 3 – управляемый источник высокого напряжения SMS30P60 фирмы «Spellman» (УИВН); 4 – делитель напряжения высоковольтный (ДНВ-30ПТ) и кабели, предназначенные для соединения между собой блоков установки, подключения установки к объекту измерений, ПК и контуру заземления

В табл. 1 приведены метрологические характеристики установки.

Таблица 1

Метрологические характеристики

Наименование характеристики	Значение
Диапазон воспроизведений и измерений напряжения постоянного тока, кВ	от 1 до 30
Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения постоянного тока, %	$\pm 0,1$
Нормальные условия применения:	
– температура окружающей среды, °С	от +15 до +25
– относительная влажность, %	от 30 до 80
– атмосферное давление, кПа	от 84 до 106

Испытательным центром ФГУП «ВНИИМС» были проведены испытания в целях утверждения типа средств измерений установки поверки киловольтметров УПК-30ПТ. При проведении испытаний вместо объекта контроля использовался государственный вторичный эталон единицы электрического напряжения постоянного тока (ГЭТ) и вольтметр В7-78/1.

Схема для определения основной относительной погрешности измерения установки приведена на рис. 4.

Расчет относительной погрешности измерений напряжения δU осуществляется по формуле

$$\delta U = 100 \cdot (U_{\text{пов}} - U_{\text{обр}}) / U_{\text{обр}}, \% \quad (1)$$

где $U_{\text{пов}}$ – значение напряжения испытуемого СИ; $U_{\text{обр}}$ – значение напряжения образцового СИ.

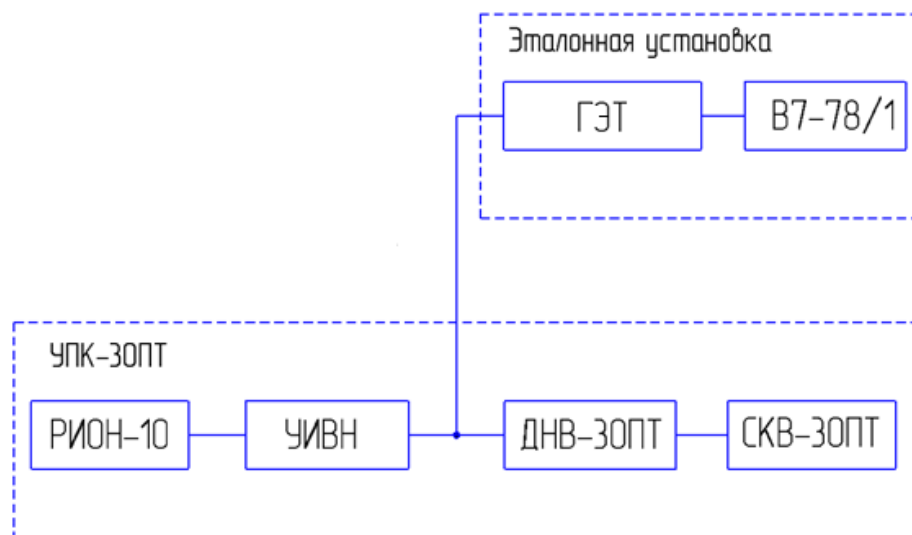


Рис. 4. Схема определения основной относительной погрешности измерения установки:
 УПК-30ПТ – поверяемая установка; РИОН-10 – регулируемый источник опорного напряжения;
 УИВН – управляемый источник высокого напряжения; ДНВ-30ПТ – делитель напряжения
 высоковольтный; СКВ-30ПТ – блок измерительный киловольтметра постоянного тока;
 ГЭТ – образцовое средство поверки; В7-78/1 – образцовый вольтметр

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Относительная погрешность измерения

Номинальное значение измеряемого параметра, U_i , кВ	Показания образцового СИ (ГЭТ), $U_{обр}$, кВ	Показания испытуемого СИ (УПК-30ПТ), $U_{пов}$, кВ	Относительная погрешность измерения напряжений постоянного тока δU , %
1	0,99806	0,9972	0,086
5	4,9932	4,9923	0,018
10	9,9931	9,9916	0,015
15	14,9818	14,9782	0,024
20	19,9860	19,9799	0,03
25	24,9631	24,9554	0,031
30	29,9639	29,9578	0,02

Результаты измерений, приведенные в табл. 3, соответствуют диапазону воспроизведений и измерений напряжения постоянного тока, а относительная погрешность измерения напряжений постоянного тока не превышает пределов, установленных в табл. 1.

Положительные результаты работы открывают перспективу полной замены устаревших установок УПК-100 или У400 на отечественную, современную, малогабаритную и автоматизированную трехканальную измерительную систему с рабочими напряжениями до 100 кВ.

Библиографический список

1. Степанчук, К. Ф. Техника высоких напряжений / К. Ф. Степанчук. – Минск : Высш. шк., 1982.
2. Шваб, А. Измерения на высоком напряжении / А. Шваб. – Москва : Энергоатомиздат, 1983.
3. Установки для поверки на постоянном токе электростатических киловольтметров УПК-100. Госреестр № 5481-76. Справочник измерительного оборудования. – URL: <http://www.kip-guide.ru/info/5481-76>
4. Установка типа У400. Описание. – URL: <http://www.measurement.ru/gk/electro/03/06/005.htm>
5. Instruction manual. SPELLMAN EPM/SMS SERIES. High Voltage Power Supply. – URL: <https://www.spellmanhv.com>
6. Гук, М. Аппаратные интерфейсы ПК : энциклопедия / М. Гук. – Санкт-Петербург : Питер, 2002.
7. Демидова, Н. В. Метрология, стандартизация и сертификация : конспект лекций / Н. В. Демидова. – Москва : Эксмо, 2007.

8. Сигов, А. С. Метрология, стандартизация и технические измерения / А. С. Сигов. – Москва : Высш. шк., 2008.
9. ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. – Москва, 1994.
10. ГОСТ IEC 61010-1-2014 Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. – Москва, 2014.

References

1. Stepanchuk K. F. *Tekhnika vysokikh napryazhenii* [High-voltage technology]. Minsk: Vyssh. shk., 1982. [In Russian].
2. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii* [High voltage measurements]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. [In Russian]
3. *Ustanovki dlya poverki na postoyannom toke elektrosticheskikh kilovol'tmetrov UPK-100. Gosreestr № 5481-76. Spravochnik izmeritel'nogo oborudovaniya* [Installations for direct current verification of electrostatic kilovoltmeters UPK-100. The state register № 5481-76. Measuring equipment reference]. Available at: <http://www.kip-guide.ru/info/5481-76> [In Russian]
4. *Ustanovka tipa U400. Opisanie* [Installation type U 400. Description]. Available at: <http://www.measurement.ru/gk/electro/03/06/005.htm> [In Russian]
5. *Instruction manual. SPELLMAN EPM/SMS SERIES. High Voltage Power Supply*. Available at: <https://www.spellmanhv.com>
6. Guk M. *Apparatnye interfeysy PK : Entsiklopediya* [Hardware interfaces of the PC : Encyclopedia]. Saint-Petersburg: Piter, 2002. [In Russian]
7. Demidova N. V. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: konspekt lektsiy* [Metrology, standardization and certification: the abstract of lectures]. Moscow: Eksmo, 2007. [In Russian]
8. Sigov A. S. *Metrologiya, standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya* [Metrology, standardization and technical measurements]. Moscow: Vyssh. shk., 2008. [In Russian]
9. GOST 22261-94 *Sredstva izmereniy elektricheskikh i magnitnykh velichin* [GOST 22261-94 measuring instruments for electric and magnetic quantities]. Moscow, 1994. [In Russian]
10. GOST IEC 61010-1-2014 *Bezopasnost' elektricheskikh kontrol'no-izmeritel'nykh priborov i laboratornogo oborudovaniya* [GOST IEC 61010-1-2014 Safety of electrical control and measuring devices and laboratory equipment]. Moscow, 2014. [In Russian]

Ильин Алексей Сергеевич

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

Ilin Alexey Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
electronics engineer,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Кострикина Инна Анатольевна

главный метролог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: Tbmc2@mail.ru

Kostrikina Inna Anatolyevna

chief metrologist,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Воронов Александр Павлович

ведущий инженер,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: swe.voron@yandex.ru

Voronov Aleksandr Pavlovich

lead engineer,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Плаксунов Ринат Фатихович

начальник НПК-4,

Научно-исследовательский институт

электронно-механических приборов

(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)

E-mail: NPK-4@niiemp.ru

Plaksunov Rinat Fatihovich

head of NPC-4,

Scientific Research Institute

of Electro-Mechanical Devices

(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ильин, А. С. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ / А. С. Ильин, И. А. Кострикина, А. П. Воронов, Р. Ф. Плаксунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 44–50. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-5.

А. И. Нефедьев, В. Г. Гусев, Д. И. Нефедьев, В. Г. Шаронова

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

A. I. Nefed'ev, V. G. Gusev, D. I. Nefed'ev, V. G. Sharonova

SPARK DISCHARGE PARAMETERS CONTROL IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Для повышения надежности системы зажигания газового или бензинового двигателя необходимо обеспечить контроль сгорания воздушно-топливной смеси в цилиндрах ДВС. Статья посвящена проблеме контроля искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания. Рассмотрен метод контроля наличия искрового разряда во вторичной цепи катушки зажигания по напряжению на ее первичной обмотке. Предложена система контроля, позволяющая диагностировать аварийные режимы работы системы зажигания, рассмотрены принципы ее построения. **Материалы и методы.** В двигателях внутреннего сгорания для снижения расхода топлива используется высокая степень сжатия, при этом давление в цилиндрах двигателя увеличивается, что ведет к значительному увеличению напряжения разряда в зазоре свечи зажигания. При отказе свечи зажигания воздушно-топливная смесь сгорает не в цилиндре, а в каталитическом нейтрализаторе, выводя его из строя. Авторы пришли к выводу, что для повышения надежности работы системы зажигания необходимо отслеживать процесс искрообразования в цилиндрах и информировать водителя об отказе свечи зажигания. **Результаты.** Для решения этой задачи была разработана система контроля, позволяющая диагностировать аварийные режимы работы системы зажигания, рассмотрены принципы ее построения. Показана схема устройства контроля параметров искрового разряда в ДВС и приведены временные диаграммы работы. **Выводы.** Таким образом, в разработанном устройстве для контроля параметров искрового разряда, путем измерения напряжения на конденсаторе и длительности времени его зарядки блоком управления, возможно определить состояние свечи зажигания и обнаружить пропуски зажигания. При возникновении аномального режима работы системы зажигания или при неисправности свечи зажигания блок управления отключает подачу воздушно-топливной смеси в цилиндры двигателя и предупреждает водителя об отказе системы зажигания.

A b s t r a c t. Background. To improve the reliability of the ignition system of a gas or gasoline engine, it is necessary to control the combustion of the air-fuel mixture in the internal combustion engine cylinders. The article is devoted to the problem of spark discharge control in an internal combustion engine. The article discusses a method for monitoring the presence of a spark discharge in the secondary circuit of the ignition coil by voltage on its primary winding. The main attention is paid to the properties of the flame and the peculiarities of the operation of photoelectric sensors. A control system is proposed that allows diagnosing emergency modes of operation of the ignition system, the principles of its construction are considered. **Materials and methods.** In internal combustion engines, a high compression ratio is used to reduce fuel consumption, while the pressure in the engine cylinders increases, which leads to a

significant increase in the spark plug discharge voltage. If the spark plug fails, the air-fuel mixture burns not in the cylinder, but in the catalytic converter, causing it to fail. The authors suggested that in order to improve the reliability of the ignition system, it is necessary to monitor the sparking process in the cylinders, and inform the driver about the spark plug failure.

Results. To solve this problem, a monitoring system was developed that allows diagnosing emergency operating modes of the ignition system, and the principles of its construction were considered. A diagram of a device for monitoring the parameters of a spark discharge in an internal combustion engine is shown and time diagrams of operation are given. **Conclusions.** Thus, by measuring the voltage across the capacitor and the length of its charging time, it is possible to determine the condition of the spark plug and detect misfires. If an abnormal operation of the ignition system occurs, or if the spark plug is faulty, the control unit turns off the supply of the air-fuel mixture to the engine cylinders and warns the driver about the failure of the ignition system.

К л ю ч е в ы е с л о в а: топливная смесь, катушка зажигания, искровой разряд.

Key words: fuel mixture, ignition coil, spark discharge.

В последние годы в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) для снижения расхода топлива используется высокая степень сжатия, и технология прямого впрыска бензина в цилиндр все чаще применяется для улучшения топливной экономичности ДВС. При увеличении степени сжатия давление в цилиндрах двигателя также увеличивается, что ведет к значительному увеличению напряжения искрового разряда в зазоре свечи зажигания. Поскольку повышение степени сжатия увеличивает отдаваемую эффективную мощность двигателя, желательно иметь степень сжатия как можно более высокой. Верхний предел давления в цилиндре всегда ограничен моментом возникновения детонации. Степень сжатия влияет на большое количество факторов: мощность, экономичность, приемистость, детонационная стойкость, расход топлива и состав отработавших газов.

Кроме того, при непосредственном впрыске бензина в цилиндр могут образовываться зоны с различной плотностью воздушно-топливной смеси. При таких условиях для воспламенения воздушно-топливной смеси требуется большая энергия искрового разряда. Примером может служить четырехцилиндровый двигатель Dynamic Force фирмы Toyota [1], в котором коэффициент компрессии составляет 13:1.

При неисправности системы зажигания из-за выхода из строя свечи зажигания из-за пробоя изолятора или пробоя высоковольтного транзистора в коммутаторе, или при невозможности пробоя искрового промежутка при высоком давлении в цилиндре из-за увеличенного зазора в свече зажигания возникают пропуски воспламенения воздушно-топливной смеси [2–4]. В этом случае воздушно-топливная смесь не сгорает и при такте выпуска попадает в выпускную систему. Не сгоревшее топливо смывает масляную пленку со стенок цилиндра, что ведет к повышенному износу цилиндра и поршня. Воздушно-топливная смесь проходит через каталитический нейтрализатор, полностью в нем не сгорает и выбрасывается в окружающую среду [5–8]. При этом температура каталитического нейтрализатора повышается до 1400 °С. Такая ситуация является опасной и может привести к оплавлению или разрушению каталитического нейтрализатора и загрязнению окружающей среды.

В настоящее время разработаны микропроцессорные системы диагностирования параметров систем зажигания [9,10]. Для решения обозначенных проблем было разработано устройство для контроля параметров искрового разряда, способное обнаруживать отклонения в напряжении разряда и пропуски разряда в зазорах свечей зажигания. Наличие или отсутствие искрового разряда определяется путем измерения напряжения разряда свечи зажигания в первичной цепи катушки зажигания. Но при таком подходе возникают проблемы, связанные с тем, что разрядное напряжение зажигания в разных условиях становится высоким, аномально низким или имеется пропуск разряда свечи зажигания.

Схема устройства для контроля параметров искрового разряда в ДВС приведена на рис. 1.

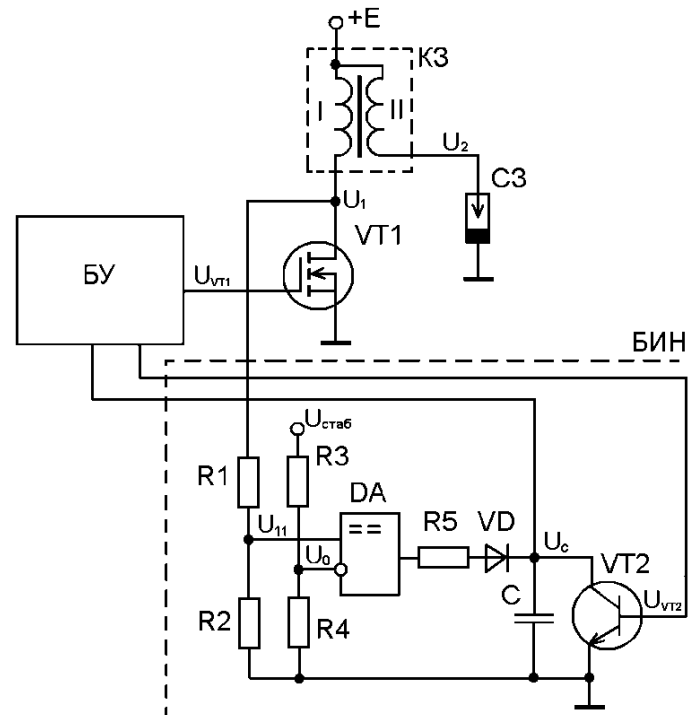


Рис. 1. Устройство для контроля параметров искрового разряда

Устройство для контроля параметров искрового разряда в ДВС содержит блок управления БУ, высоковольтный ключ $VT1$, катушку зажигания $K3$ с первичной обмоткой I и вторичной обмоткой II, свечу зажигания $C3$ и блок измерения напряжения БИН. В качестве блока управления может быть использован электронный блок управления двигателем (ЭБУ).

Высоковольтный ключ $VT1$ переключается по сигналу блока управления, коммутируя ток в первичной обмотке I катушки зажигания $K3$.

Блок измерения напряжения БИН предназначен для определения напряжения первичной обмотки катушки зажигания и содержит компаратор DA , резисторы делителей напряжения $R1 - R4$, резистор $R5$, диод VD , конденсатор C и транзисторный ключ $VT2$. Компаратор DA сравнивает напряжение U_1 первичной обмотки 4 (напряжение U_{11} с выхода делителя напряжения, образованного резисторами $R1$ и $R2$) и опорное напряжение U_0 с выхода делителя напряжения, образованного резисторами $R3$ и $R4$.

Когда напряжение U_{11} с делителя напряжения, подключенного к первичной обмотке катушки зажигания, выше опорного напряжения U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается высокий уровень напряжения. При этом конденсатор C заряжается от источника питания через резистор $R5$. Диод VD служит для предотвращения разрядки конденсатора C . Если напряжение U_{11} меньше опорного напряжения U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается нулевой уровень напряжения. Следовательно, напряжение зарядки U_C конденсатора C увеличивается пропорционально длительности времени, в течение которого напряжение U_{11} выше опорного напряжения U_0 . Длительность времени зарядки конденсатора C контролируется блоком управления БУ. Кроме того, блок управления разряжает конденсатор C с помощью транзисторного ключа $VT2$ перед включением высоковольтного ключа $VT1$ для подготовки к следующему такту измерения.

На рис. 2 представлены временные диаграммы работы устройства при нормальном режиме работы системы зажигания.

Блок управления БУ в момент времени t_1 выключает транзисторный ключ $VT2$, и в этот момент времени напряжение U_C на конденсаторе C равно нулю. В момент времени t_1 блок управления включает высоковольтный ключ $VT1$, и ток начинает протекать через первичную обмотку катушки зажигания $K3$.

В момент времени t_2 высоковольтный ключ $VT1$ выключается, и ток, протекающий через первичную обмотку катушки зажигания, прерывается. При этом магнитный поток в катушке зажигания очень быстро изменяется, что вызывает изменение напряжения первичной и вторичной обмоток катушки зажигания. В частности, напряжение U_2 вторичной обмотки катушки зажигания начинает постепенно увеличиваться.

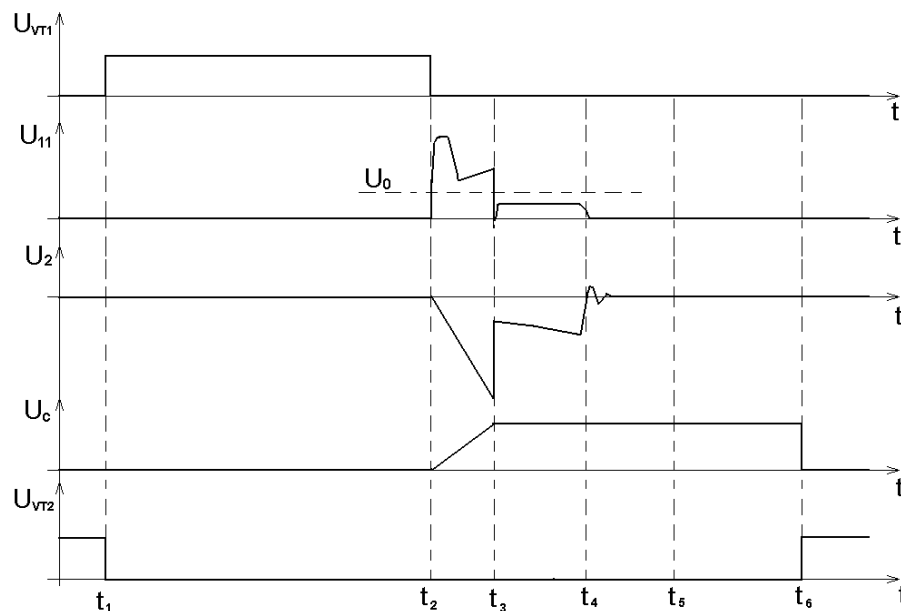


Рис. 2. Временные диаграммы работы устройства при нормальном режиме работы системы зажигания

Напряжение первичной обмотки U_1 и, соответственно, напряжение U_{11} с выхода делителя напряжения $R1R2$ имеет высокую скорость нарастания в момент времени t_2 , а затем постепенно увеличивается. Высокое пиковое напряжение первичной обмотки возникает благодаря наличию индуктивности рассеяния первичной обмотки катушки зажигания из-за неидеальной связи между ее первичной и вторичной обмотками. Затем изменение напряжения в первичной обмотке и вторичной обмотке определяется соотношением $|\Delta U_1| = |\Delta U_2|/n$, где n – коэффициент трансформации катушки зажигания.

Блок измерения напряжения БИН сравнивает напряжение на первичной обмотке U_1 , уменьшенное с помощью делителя напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ до уровня U_{11} , с опорным напряжением U_0 . Когда напряжение U_{11} превышает опорное напряжение U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается напряжение, равное напряжению питания, и конденсатор C начинает заряжаться через резистор $R5$ и диод VD .

В момент времени t_3 , когда напряжение U_2 , генерируемое во вторичной обмотке катушки зажигания, превышает напряжение пробоя свечи зажигания, возникает искровой разряд. Напряжение вторичной обмотки U_2 и напряжение первичной обмотки U_1 существенно уменьшаются, при этом напряжение U_{11} в период времени $t_3 - t_4$ становится меньше, чем опорное напряжение U_0 . При этом на выходе компаратора DA напряжение становится равным нулю, и зарядка конденсатора C останавливается.

Значение опорного напряжения U_0 выбирается таким, чтобы оно было ниже, чем напряжение U_{11} в период времени $t_2 - t_3$, и выше, чем U_{11} в период времени $t_3 - t_4$. В момент времени t_4 искровой разряд в зазоре свечи зажигания заканчивается, и напряжения первичной и вторичной обмотках катушки зажигания КЗ становятся равными нулю.

В момент времени t_5 , по истечении заданного периода времени с момента времени t_2 , блок управления считывает напряжение U_C конденсатора C .

В момент времени t_6 происходит включение транзисторного ключа $VT2$, и он разряжает конденсатор C , подготавливая его к следующему циклу работы.

В случае, когда напряжение на свече зажигания увеличивается из-за увеличения давления в камере сгорания или из-за увеличения зазора между электродами свечи зажигания, это

приводит к увеличению напряжения U_2 вторичной обмотки катушки зажигания и, соответственно, к увеличению напряжения U_1 первичной обмотки. При этом увеличивается длительность периода времени $t_2 - t_3$, в течение которого происходит зарядка конденсатора C , при этом конденсатор заряжается до большего значения напряжения, что детектируется блоком управления БУ.

На рис. 3 представлены временные диаграммы работы устройства для контроля параметров искрового разряда при неисправной свече системы зажигания. Диаграммы напряжений, приведенные на рис. 3, отличаются от диаграмм рис. 2 в основном в период времени $t_3 - t_4$. В случае, когда пробой диэлектрика происходит не в искровом зазоре свечи зажигания, что случается при пробое изолятора свечи зажигания или загрязнении ее межэлектродного промежутка, происходит внезапное падение напряжения в первичной и вторичных обмотках катушки зажигания. Напряжения в первичной и вторичных обмотках катушки зажигания имеют форму плавных волн, как показано на рис. 3.

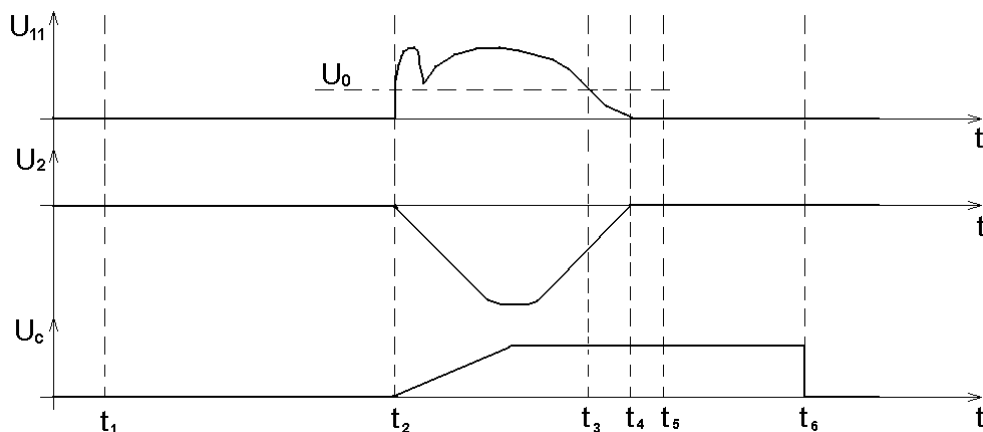


Рис. 3. Временные диаграммы работы устройства при неисправной свече системы зажигания

Период времени $t_2 - t_3$ становится существенно больше, в течение которого напряжение U_{11} , приложенное к входу компаратора, выше напряжения U_0 источника опорного напряжения. В результате конденсатор C непрерывно заряжается, и его напряжение достигает уровня напряжения питания за указанный период времени.

На рис. 4 представлен график, показывающий соотношение между длительностью времени заряда конденсатора C , его напряжением U_C .

По напряжению заряда конденсатора C можно диагностировать как состояние свечи зажигания, так и наличие или отсутствие искрового разряда. При напряжении конденсатора $U_C < U_{C1}$ имеется утечка тока мимо искрового зазора свечи зажигания, при этом искровой разряд слабый или отсутствует.

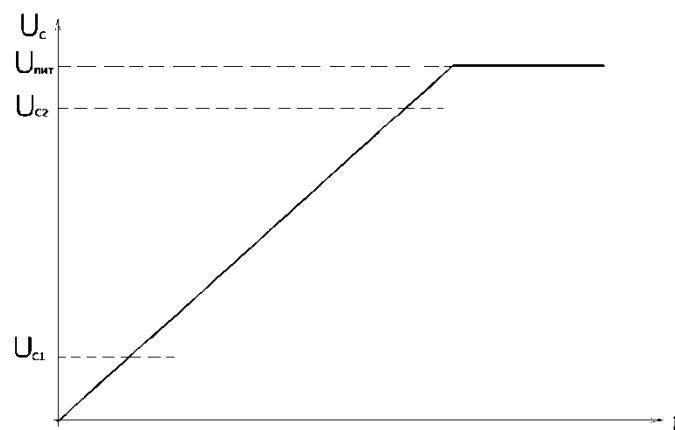


Рис. 4. График напряжения на конденсаторе C

При условии $U_{C1} \leq U_C < U_{C2}$ свеча работает в нормальном режиме. При условии $U_C \geq U_{C2}$ напряжение на свече зажигания аномально высокое, что говорит об износе свечи (увеличенный искровой зазор или разрушение одного из электродов).

Таким образом, путем измерения напряжения на конденсаторе C и длительности периода времени t_2-t_3 возможно определить состояние свечи зажигания и обнаружить пропуски зажигания. При возникновении аномального режима работы системы зажигания или при неисправности свечи зажигания блок управления отключает подачу воздушно-топливной смеси в цилиндры двигателя и предупреждает водителя об отказе системы зажигания.

Библиографический список

1. Фирма Toyota представила передовые агрегаты. – URL: <https://www.drive.ru/news/toyota/584682faec05c44015000051.html> (дата обращения: 22.10.2020).
2. Nefed'ev, A. I. Development of Microprocessor-Based Car Engine Control System / A. I. Nefed'ev, G. I. Sharonov // *Procedia Engineering* : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A. A. Radionov. – Elsevier publishing, 2016. – Vol. 150. – P. 1341–1344.
3. Нефедьев, А. И. Формирователь импульсов для электронной системы зажигания автомобиля / А. И. Нефедьев // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2019. – № 2 (27). – С. 54–57.
4. Шаронов, Г. И. Конденсаторно-тиристорный модуль зажигания для ДВС со встроенными средствами исследования токовременных параметров первичной цепи / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // *Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта : материалы X Междунар. заочн. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 15 мая 2015 г.)* / под общ. ред. Э. Р. Домке. – Пенза : Пенз. гос. ун-т архитектуры и строительства, 2015. – С. 388–396.
5. Шаронов, Г. И. Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2016. – № 3. – С. 2–4.
6. Нефедьев, А. И. Многоканальные конденсаторные модули зажигания для микропроцессорных систем управления газовым двигателем внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов, С. В. Тимохин // *Транспортные системы Сибири : материалы II Всерос. науч.-техн. конф. (25–26 ноября, г. Красноярск)*. – Красноярск : КГТУ, 2004. – С. 166–168.
7. Лянденбургский, В. В. Бортовая система диагностирования микропроцессорной системы управления зажигания / В. В. Лянденбургский, М. В. Шилин // *Успехи современной науки*. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 28–31.
8. Францев, С. М. Микропроцессорная система исследования распределения значений пробивных напряжений системы зажигания ДВС / С. М. Францев, А. Ю. Кавторев // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 2 (49). – С. 55.
9. Пат. 9726140 США, МПК F02P 17/12, F02P 11/06. Internal Combustion Engine Control Apparatus / Hiroshi Okuda ; опубл. 08.08.2017.
10. Францев, С. М. Исследование длительности и энергии искрового разряда транзисторной системы зажигания на нагрузочном режиме работы двигателя / С. М. Францев, А. Ю. Кавторев // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 1, ч. 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2842

References

1. Firma Toyota predstavila peredovye agregaty [Toyota has introduced advanced units]. Available at: <https://www.drive.ru/news/toyota/584682faec05c44015000051.html> (accessed Oct. 22, 2020). [In Russian]
2. Nefed'ev A. I., Sharonov G. I. *Procedia Engineering: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. Elsevier publishing, 2016, vol. 150, pp. 1341–1344.
3. Nefed'ev A. I. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport* [Energy and resource conservation: industry and transport]. 2019, no. 2 (27), pp. 54–57. [In Russian]
4. Sharonov G. I., Nefed'ev A. I. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv: Ekspluatatsiya i razvitie avtomobil'nogo transporta : materialy X Mezhdunar. zaochn. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 15 maya 2015 g.)* [Problems of quality and operation of motor vehicles: Operation and development of motor transport: materials X international. part-time scientific and technical conf. (Penza, may 15, 2015)]. Penza: Penz. gos. un-t arkhitektury i stroitel'stva, 2015, pp. 388–396. [In Russian]
5. Sharonov G. I., Nefed'ev A. I. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Transport electronics and electrical equipment]. 2016, no. 3, pp. 2–4. [In Russian]

6. Nefed'ev A. I., Sharonov G. I., Timokhin S. V. *Transportnye sistemy Sibiri: materialy II Vseros. nauch.-tekhn. konf. (25–26 noyabrya, g. Krasnoyarsk)* [Transport systems of Siberia: materials of the II all-Russian scientific-tech. conf. (November 25–26, Krasnoyarsk)]. Krasnoyarsk: KG TU, 2004, pp. 166–168. [In Russian]
7. Lyandenburskiy V. V., Shilin M. V. *Uspekhi sovremennoy nauki* [Advances in modern science]. 2017, vol. 4, no. 4, pp. 28–31. [In Russian]
8. Frantsev S. M., Kavtorev A. Yu. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, no. 2 (49), p. 55. [In Russian]
9. Pat. 9726140 SShA, MPK F02P 17/12, F02P 11/06. *Internal Combustion Engine Control Apparatus*. Hiroshi Okuda; publ. 08.08.2017.
10. Frantsev S. M., Kavtorev A. Yu. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, no. 1, pt. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2842 [In Russian]

Нефедьев Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра электротехники,
Волгоградский государственный технический
университет
(Россия, г. Волгоград, проспект Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Nefediev Alexey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Гусев Владимир Георгиевич

аспирант,
Волгоградский государственный технический
университет
(Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: gusev.vl.g@mail.ru

Gusev Vladimir Georgievich

postgraduate student,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ndi200106@yandex.ru

Nefediev Dmitry Ivanovich

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

Шаронова Вероника Геннадьевна

старший преподаватель,
кафедра основ архитектурного проектирования,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: virineya73@mail.ru

Sharonova Veronika Gennadyevna

senior lecturer,
sub-department of basics of architectural design,
Penza State University of Architecture
and Construction
(28 Germana Titova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Нефедьев, А. И. Контроль параметров искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, В. Г. Гусев, Д. И. Нефедьев, В. Г. Шаронова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 51–57. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-6.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.316.8

DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-7

*К. Э. Уткин, П. А. Колосов, Б. В. Цыпин, И. В. Макаров***ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
РЕЗИСТОРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ***K. E. Utkin, P. A. Kolosov, B. V. Tsypin, I. V. Makarov***THEORETICAL ASPECTS OF PULSE-CURRENT
STABILIZATION OF RESISTANCE OF THIN-FILM
RESISTORS OF PRIMARY CONVERTERS**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Обеспечение высокого и стабильного качества тонкопленочных резисторов является в настоящее время одной из основных задач при изготовлении первичных преобразователей, актуальной остается проблема обеспечения долговременной стабильности их выходных параметров. Одним из способов стабилизации выходных параметров тонкопленочных резисторов является применение импульсно-токовой обработки на этапе изготовления тонкопленочных резисторов. Цель работы – определение оптимальных параметров воздействия на тонкопленочные резисторы импульсно-токовым методом с целью стабилизации их выходных параметров. *Материалы и методы.* Проведено определение основных процессов в структуре тонкопленочного резистора, влияющих на временную стабильность их выходных параметров. Проведено определение соотношения между длительностью импульса и его амплитудой при проведении обработки импульсно-токовым методом. *Результаты.* Определены оптимальные параметры воздействия на тонкопленочные резисторы импульсно-токовым методом. Определена формула соотношения между длительностью импульса и его амплитудой, обеспечивающих достаточную температуру для структурирования тонкой резистивной пленки. Представлены выводы об основных принципах импульсно-токовой стабилизации. *Выводы.* Полученные данные позволяют определить оптимальные параметры для стабилизации тонкопленочных резисторов импульсно-токовым методом.

A b s t r a c t. *Background.* Ensuring high and stable quality of thin-film resistors is currently one of the main tasks in the manufacture of primary converters; the problem of ensuring long-term stability of their output parameters remains urgent. One of the ways to stabilize the output parameters of thin-film resistors is the use of pulse-current processing at the stage of manufacturing thin-film resistors. The purpose of the work is to determine the optimal parameters of the impact on thin-film resistors by the pulse-current method in order to stabilize their output parameters. *Materials and methods.* The definition of the main processes in the structure of a thin-film resistor, which affect the temporal stability of their output parameters, is car-

ried out. Determination of the ratio between the pulse duration and its amplitude during processing by the pulse-current method is carried out. *Results.* The optimal parameters of the impact on thin-film resistors by the pulse-current method have been determined. The formula for the relationship between the pulse duration and its amplitude is determined, which provides a sufficient temperature for structuring a thin resistive film. Conclusions on the basic principles of pulse-current stabilization are presented. *Conclusions.* The data obtained make it possible to determine the optimal parameters for stabilizing thin-film resistors by the pulse-current method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: стабилизация параметров тонкопленочных резисторов, импульсно-токовая стабилизация, тонкопленочная технология, удельная теплоемкость резистивного вещества, длительность импульса, амплитуда импульсов напряжения, диффузия, тонкопленочный резистор, теплопроводность.

Key words: stabilization of parameters of thin-film resistors, pulsed current stabilization, thin-film technology, specific heat of a resistive substance, pulse duration, amplitude of voltage pulses, diffusion, thin-film resistor, thermal conductivity.

Качество и стабильность характеристик датчиков-преобразующей аппаратуры всегда являются приоритетными направлениями при ее изготовлении. Стабильность датчиков давления напрямую зависит от стабильности тонкопленочных резисторов. В процессе эксплуатации и хранения датчиков давления происходит естественное «старение» тонкопленочных резисторов. При этом значения резисторов изменяются: увеличиваются или уменьшаются в зависимости от процессов, преобладающих в это время. Известно, что при длительном хранении или эксплуатации в тонкопленочных структурах происходят следующие процессы:

- межзерновая диффузия в резистивном слое;
- взаимодиффузия на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрика);
- окисление верхних слоев резистивного слоя.

При межзерновой диффузии значения резисторов уменьшаются, при окислении резистивного слоя и при взаимодиффузии резистивного слоя и диэлектрика значения резисторов увеличиваются. Эти процессы происходят постоянно и одновременно, при увеличении температуры более активно, при понижении температуры активность падает, но не останавливается, поэтому в зависимости от того, какой процесс преобладает в данный момент, значение резистора может увеличиваться или уменьшаться [1–3]. Если значения резисторов, образующих «измерительный мост Уитстона», изменяются одинаково, то значение начального выходного сигнала не изменяется, изменяется только потребляемый ток. Если значения резисторов изменяются с разной скоростью, то происходит изменение начального выходного сигнала, и чем больше разница в скоростях изменения значений сопротивлений, тем больше изменение начального выходного сигнала. Если значения резисторов изменяются в разные стороны (значения одних резисторов увеличиваются, а значения других уменьшаются), то происходит резкое скачкообразное изменение начального выходного сигнала [1, 4].

Стабилизация параметров тонкопленочных резисторов предполагает остановку или замедление указанных выше процессов. Стабилизация осуществляется с помощью термообработки (отжига в вакууме и на воздухе при высокой температуре), после подобных операций устраняются дефекты тонкопленочной структуры [5].

Импульсно-токовая стабилизация является одной из разновидностей термотокерной обработки. Основной комплексной задачей импульсно-токовой стабилизации является предотвращение окисления верхнего резистивного слоя в процессе хранения и эксплуатации, предотвращение взаимодиффузии на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрического) и устранение межзерновой диффузии [6]. Эти задачи решаются путем:

- образования защитного оксидного слоя, препятствующего дальнейшему окислению резистивного слоя;
- образования слоя силицидов на границах раздела слоев, препятствующего взаимодиффузии резистивного слоя и слоя диэлектрика;
- сращивания кристаллитов в один монокристалл, что предотвращает межзерновую диффузию в процессе хранения и эксплуатации [4].

При проведении импульсно-токовой стабилизации сам тонкопленочный резистор является нагревательным элементом. Так как тонкопленочный резистор неподвижен, а электрический ток постоянен, то работа сторонних сил расходуется на нагревание резистора. Энергия W , выделяющаяся за время t в объеме тонкопленочного резистора [7, 8]:

$$W = JUt,$$

где J – сила тока; U – напряжение, приложенное к резистору.

При этом количество теплоты, необходимое для нагревания резистора массой M от температуры T_0 до температуры T , можно вычислить по формуле

$$Q_{\text{рез}} = cM\Delta T,$$

где c – удельная теплоемкость резистивного вещества; M – масса резистора; ΔT – изменение температуры.

В нашем случае теплота возникает внутри тонкопленочного резистора за счет прохождения по нему электрического тока. Поскольку объемное тепловыделение может быть не только равномерным, но и неравномерным, для таких процессов важным является понятие мощности внутренних источников теплоты. Эта величина, обозначаемая q_v , определяет собой количество теплоты, выделяемое единицей объема тела в единицу времени (Вт/м^3).

При наличии внутренних источников теплоты основной задачей является расчет температурного поля внутри тонкопленочного резистора. Представим поперечный разрез тонкопленочного резистора в виде однородной плоской стенки толщиной 2δ , коэффициент теплопроводности стенки λ . Внутри этой стенки имеются равномерно распределенные источники теплоты q_v . Выделившаяся теплота через боковые поверхности стенки, верхнюю и нижнюю поверхности резистора, передается в окружающую среду: вверх – в атмосферу, вниз – к диэлектрику. Относительно площади стенки в среднем сечении процесс теплопроводности будет протекать симметрично, поэтому именно здесь целесообразно разместить начало координат, а ось x направить перпендикулярно боковым стенкам резистора (рис. 1) [7, 9].

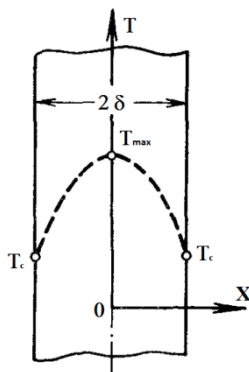


Рис. 1. Теплопроводность плоской стенки при наличии внутренних источников теплоты

Из уравнения теплового баланса следует, что при наличии внутренних источников теплоты плотность теплового потока q_x в плоской стенке линейно возрастает с увеличением расстояния x от центра стенки:

$$q_x = q_v x.$$

Из этого следует, что плотность теплового потока в плоской стенке будет равна нулю в центре (начало координат), а на боковых поверхностях достигает своего максимального значения.

Согласно закону теплопроводности Фурье [7, 8]

$$q_x = q_v x = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

где $\frac{dT}{dx}$ – скорость изменения температуры.

Разделив переменные, можно определить приращение температуры при минимальном увеличении расстояния от центра стенки как дифференциал:

$$dT = -\frac{1}{\lambda} q_v dx.$$

Проведя интегрирование этого уравнения по x , получим

$$T_x = -\frac{1}{2\lambda} q_v x^2 + C. \quad (1)$$

Постоянную интегрирования C находим из граничных условий. При $x = 0$ $T = T_{\max} = C$, и уравнение (1) примет вид

$$T_x = T_{\max} - \frac{1}{2\lambda} q_v x^2.$$

При $x = \delta$ $T = T_C$, при этом разность температур $T_{\max} - T_C$ определяется как

$$T_{\max} - T_C = q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} = q_\delta \frac{\delta}{2\lambda}.$$

Разность $T_{\max} - T_C$ – это перепад температур между серединой и внешними поверхностями тонкопленочного резистора, а $q_\delta = q_v \delta$ – плотность теплового потока на этих поверхностях (при $x = \delta$).

Учитывая вышеизложенное, тепловой поток $Q_{\text{рез}}$, необходимый для нагревания тонкопленочного резистора, можно представить в виде [2, 6, 10]

$$Q_{\text{рез}} = cm \left(\frac{T_{\max} + T_C}{2} - T_0 \right),$$

где $cm = C$ – теплоемкость тела, определенная как произведение удельной теплоемкости вещества на массу тела.

Как было указано выше, теплота внутри тонкопленочного резистора с теплопроводностью λ распространяется перпендикулярно плоскости резистора в направлении от максимальной температуры $T_{\max}$ к минимальной температуре T_C .

При прохождении через резистор импульса тока длительностью Δt происходит нагрев не только середины резистора до температуры $T_{\max}$, но и внешних поверхностей резистора до температуры T_C , большей чем температура окружающей среды.

Согласно закону теплопроводности Фурье, количество тепла $\Delta Q_{\text{пер}}$, передаваемое за время Δt через площадку S :

$$\Delta Q_{\text{пер}} = -\lambda \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) S \Delta t = -\Delta P_{\text{пер}} \Delta t,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $\Delta T / \Delta x$ – градиент температуры вдоль нормали (x) к площадке S ; $\Delta P_{\text{пер}}$ – мощность, передаваемая от резистора подложке (основанию, на котором расположен резистор).

Тело, нагретое до температуры большей, чем температура окружающей среды, отдает теплоту в виде излучения электромагнитных волн (непрерывный спектр). Количество теплоты $\Delta Q_{\text{изл}}$, излучаемое единицей поверхности тела S в единицу времени Δt по всем длинам волн, определяется как

$$\Delta Q_{\text{изл}} = -RS \Delta t = -\Delta P_{\text{изл}} \Delta t,$$

где R – светимость или излучательная способность тела; $\Delta P_{\text{изл}}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью резистора в окружающую среду.

При этом теплота, передаваемая в тонкопленочном резисторе вверх, путем конвективного переноса и излучения, распространяется в атмосферу. А теплота, передаваемая вниз, расходуется на разогрев нижележащего слоя диэлектрика.

Знак (–) в выражениях показывает, что тепло передается в направлении убывания температуры вдоль нормали x к площадке S .

Формула баланса энергии для импульсно-токовой стабилизации выглядит следующим образом [3, 4, 11]:

$$\frac{U^2}{R} \Delta t = Q_{\text{рез}} + \Delta P_{\text{пер}} \Delta t + \Delta P_{\text{изл}} \Delta t. \quad (2)$$

Из данного уравнения следует: чтобы энергия W , получаемая за счет прохождения электрического тока, использовалась на разогрев резистора для устранения скрытых дефектов и структурные преобразования в резистивном слое, надо уменьшить величины $Q_{\text{пер}}$ и $Q_{\text{изл}}$. Этого можно достичь, уменьшая величину Δt времени воздействия. Однако если мы уменьшим Δt , при этом уменьшится и величина энергии W , которую можно сохранить на прежнем уровне, увеличив величину напряжения, прикладываемого к тонкопленочному резистору.

Из выражения (2) можно вывести соотношение между длительностью импульса $t_{\text{имп}}$ и его амплитудой $U_{\text{имп}}$, создающее количество теплоты, достаточное для структурирования тонкой резистивной пленки

$$t_{\text{имп}} = \frac{Q_{\text{рез}}}{\frac{U_{\text{имп}}^2}{R_{\text{н}}} - P_{\text{пер}} - P_{\text{изл}}},$$

где $U_{\text{имп}}$ – амплитуда импульсов напряжения; $R_{\text{н}}$ – начальное сопротивление резистора; $Q_{\text{рез}}$ – количество теплоты, полученное резистором за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп}}$; $P_{\text{пер}}$ – мощность, передаваемая от резистора подложке (основанию, на котором он расположен); $P_{\text{изл}}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью резистора в окружающую среду.

Расчеты показывают, что при выбранной длительности импульса в 10 мкс температура в центре резистора может достигать $(300 \div 350)^\circ\text{C}$ в течение импульса. При этом температура на границах раздела слоев увеличится лишь на $(1,5 \div 1,7)^\circ\text{C}$. Чтобы вывести соотношение между длительностью импульса $t_{\text{имп}}$ и его амплитудой $U_{\text{имп}}$, обеспечивающими достаточную температуру для образования слоя силицидов на границе раздела слоев и образование оксидного слоя, необходимо учитывать количество теплоты, полученное диэлектриком от резистора за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп}}$, а также учитывать не только мощность рассеиваемого резистора, но и мощность, рассеиваемую поверхностью диэлектрика в окружающую среду, и мощность, передаваемую от диэлектрика расположенному ниже основанию.

С учетом изложенного, соотношение будет выглядеть следующим образом:

$$t_{\text{имп.1}} = \frac{Q_{\text{рез}} + Q_{\text{диэл}}}{\frac{U_{\text{имп.1}}^2}{R_{\text{н}}} - (P_{\text{пер}}^1 + P_{\text{изл}}^1 + P_{\text{изл}}^1)},$$

где $t_{\text{имп.1}}$ – длительность импульса при проведении третьего этапа обработки; $Q_{\text{диэл}}$ – количество теплоты, полученное диэлектриком от резистора за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп.1}}$; $U_{\text{имп.1}}$ – амплитуда импульсов при проведении третьего этапа обработки; $R_{\text{н}}$ – значение сопротивления резистора, полученное после проведения второго этапа обработки; $P_{\text{изл}}^1$ – мощность, рассеиваемая поверхностью диэлектрика в окружающую среду; $P_{\text{пер}}^1$ – мощность, передаваемая от диэлектрика нижерасположенному основанию.

Согласно расчетам, при выбранной длительности импульса в 10 мс температура в центре резистора достигает $(270 \div 400)^\circ\text{C}$ в течение импульса. При этом температура на границе раздела слоев достигает $(220 \div 330)^\circ\text{C}$, которой достаточно для образования силицидов.

Из изложенного можно сделать вывод об основных принципах импульсно-токовой стабилизации: чтобы теплота оставалась внутри тонкопленочного резистора и расходовалась только на структурирование резистивного материала и устранение внутренних дефектов, надо прикладывать напряжение к резистору на короткое время, т.е. импульсом короткой величины, но при этом амплитуду этого импульса надо устанавливать большой. Чтобы образовывать

промежуточный слой силицидов, необходимо увеличить длительность импульсов, но при этом амплитуду импульса уменьшить.

Библиографический список

1. Чебурахин, И. Н. Способ повышения стабильности тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин, П. А. Колосов // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 23–25.
2. Патент RU 2722213. Способ стабилизации резисторов / Уткин К. Э., Колосов П. А., Торгашин С. И., Степанов С. В. – 2020.
3. Аверин, И. А. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетероструктуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления / И. А. Аверин, И. В. Волохов, Е. А. Мокров, Р. М. Печерская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 123–124.
4. Поута, Дж. Тонкие пленки, взаимная диффузия и реакции / Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. – Москва : Мир, 1982. – 576 с.
5. Болгарский, А. В. Термодинамика и теплопередача / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щуки. – Москва : Высш. шк., 1975. – 496 с.
6. Кандыба, П. Е. Повышенные импульсные электрические нагрузки в производстве тонкопленочных резисторов / П. Е. Кандыба, П. А. Фоменко // Электронная техника. Сер. VI, Микроэлектроника. – 1971. – Вып. 8 (34). – С. 115–120.
7. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.
8. Mikhaylov, P. G. Microelectronic Sensors for the Aircraft and Space-Rated Equipment / P. G. Mikhaylov, A. O. Kassimov, M. A. Khizirova // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P 123–151.
9. Чебурахин, И. Н. Оборудование для пакетной импульсно-токовой стабилизации тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 14–17.
10. Ozhikenov, K. A. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov, R. S. Ismagulova // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE). – 2016. – Vol. 1. – P. 62–79.
11. Belozubov, E. M. Problems and basic research directions in the field of thin-film nanoand microelectromechanical systems of pressure sensors / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov // Automation and Remote Control. – 2010. – Vol. 72, № 11. – P. 312–344.

References

1. Cheburakhin I. N., Kolosov P. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 10, pp. 23–25. [In Russian]
2. Patent RU 2722213. *Sposob stabilizatsii rezistorov* [Patent RU 2722213. Method for stabilizing resistors]. Utkin K. E., Kolosov P. A., Torgashin S. I., Stepanov S. V. 2020. [In Russian]
3. Averin I. A., Volokhov I. V., Mokrov E. A., Pecherskaya R. M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2008, no. 2, pp. 123–124. [In Russian]
4. Pouta Dzh., Tu K., Meyera Dzh. *Tonkie plenki, vzaimnaya diffuziya i reaktsii* [Thin films, mutual diffusion and reactions]. Moscow: Mir, 1982, 576 p. [In Russian]
5. Bolgarskiy A. V., Mukhachev G. A., Shchuki V. K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 496 p. [In Russian]
6. Kandyba P. E., Fomenko P. A. *Elektronnaya tekhnika. Ser. VI, Mikroelektronika* [Electronics. Ser. VI, Microelectronics]. 1971, iss. 8 (34), pp. 115–120. [In Russian]
7. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. 2nd ed. stereotip. Moscow: Energiya, 1977, 344 p. [In Russian]
8. Mikhaylov P. G., Kassimov A. O., Khizirova M. A. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 123–151.
9. Cheburakhin I. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 2 (20), pp. 14–17. [In Russian]
10. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE)*. 2016, vol. 1, pp. 62–79.
11. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Gromkov N. V. *Automation and Remote Control*. 2010, vol. 72, no. 11, pp. 312–344.

Уткин Кирилл Эдуардович

аспирант,
заместитель начальника цеха микроэлектроники,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: utkin.kirill.niifi@gmail.ru

Колосов Павел Александрович

ведущий инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: pavel.kolosov.54@bk.ru

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения
при АО «НИИФИ»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Макаров Иван Васильевич

аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Utkin Kirill Eduardovich

postgraduate student,
deputy head of the microelectronics workshop,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Kolosov Pavel Alexandrovich

leading process engineer,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Tsy-pin Boris Vulfovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument engineering
at JSC "SRIPM",
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Makarov Ivan Vasilievich

postgraduate student, design engineer,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Уткин, К. Э. Теоретические аспекты импульсно-токовой стабилизации сопротивления тонко-пленочных резисторов первичных преобразователей / К. Э. Уткин, П. А. Колосов, Б. В. Цыпин, И. В. Макаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 58–64. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-7.

Е. А. Шачнева

СПОСОБЫ ЮСТИРОВКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Е. А. Shachneva

MAIN TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FIBER-OPTIC FLUID FLOW VELOCITY SENSOR AND SENSOR'S ADJUSTMENTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. К средствам измерения скорости подачи топлива на борту воздушного судна предъявляются высокие требования по искро-взрывопожаробезопасности, а также отсутствию вредных электромагнитных воздействий, удобству монтажа, точности измерений и сохранению работоспособности в тяжелых условиях эксплуатации. Для применения в таких условиях хорошо себя зарекомендовали волоконно-оптические средства измерений. Несмотря на очевидные преимущества по сравнению с существующими аналогами, волоконно-оптические датчики не получили широкого распространения на отечественном рынке средств измерений. Во многом основной причиной тому послужило отсутствие достаточной информации о технологических особенностях проведения процедуры юстировки и настройки волоконно-оптических датчиков. В данной статье рассматриваются особенности проведения таких процедур и их эффективность при проектировании и изготовлении волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости (ВОДСДЖ). **Материалы и методы.** Для улучшения метрологических характеристик волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости разработана технология его юстировки и технология точного позиционирования оптического волокна относительно источника и приемника излучения. **Результаты.** Определены основные критерии и функции юстировки волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости. Улучшены основные технические и метрологические характеристики волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости в тяжелых эксплуатационных условиях. На основании полученных экспериментальных данных сформированы основные технические характеристики датчика. **Выводы.** Разработанная технология юстировки и технология позиционирования оптического волокна относительно источника и приемников излучения ВОДСДЖ позволяет добиться повышения чувствительности преобразования оптических сигналов в 1,5 раза. При правильном проведении процедуры юстировки снижается количество дополнительных погрешностей, влияющих на увеличение изгибов оптического волокна.

A b s t r a c t. Background. The means of measuring the speed of fuel on Board the aircraft subject to high demands on intrinsically-explosion-fire safety without harmful electromagnetic interference, ease of installation, accuracy and preservation of health in extreme conditions. Fiber-optic measuring instruments have proven themselves well for use in such conditions. Despite the obvious advantages over existing analogues, fiber-optic sensors are not widely used in the domestic market of communication equipment. In many ways, the main reason for this was the lack of sufficient information about the technological features of the procedure for adjusting and configuring fiber-optic sensors. This article discusses the features of such procedures

and their effectiveness. **Materials and methods.** To improve the metrological characteristics of the fiber-optic fluid flow velocity sensor, the technology of its alignment and the technology of precise positioning of the optical fiber relative to the radiation source and receiver have been developed. **Results.** The main criteria and functions of adjustment of fiber-optic sensors of liquid flow velocity are determined. The main technical and metrological characteristics of fiber-optic liquid flow velocity sensors in severe operating conditions have been improved. Based on the obtained experimental data, the main technical characteristics of the sensor are formed. **Conclusions.** The developed technology of alignment and positioning of the optical fiber relative to the source and receivers of the radiation of the fiber-optic fluid flow velocity sensor allows to increase the sensitivity of optical signal conversion by 1.5 times. If the alignment procedure is carried out correctly, the number of additional errors that affect the increase in the bends of the optical fiber is reduced.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ракетно-космическая техника, волоконно-оптический датчик скорости потока жидкости, юстировка, волоконно-оптический кабель, метрологические характеристики.

Key words: rocket and space technology, fiber-optic fluid flow velocity sensor, alignment, fiber-optic cable, metrological characteristics.

Актуальность

Существующие на данный момент аналоговые и механические системы год за годом утрачивают свою популярность, на смену данным средствам измерения приходят цифровые технологии. Несмотря на очевидные преимущества по функциональным характеристикам, не решенным остается вопрос безопасности и надежности таких систем. В условиях повышения уровня сложности, технологичности и интеграции систем современного воздушного судна или летательного аппарата остро встает вопрос обеспечения безопасности полетов.

Одними из самых надежных и пригодных для эксплуатации в подобных условиях являются волоконно-оптические средства измерений [1]. Но для обеспечения работоспособности волоконно-оптических средств измерений необходимо обеспечить в процессе сборки точную юстировку оптической системы. Данное требование особенно актуально при изготовлении волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости отражательного типа [2]. Именно от качества проведенной юстировки зависит точное позиционирование оптического волокна относительно отражателя, если речь идет о датчиках отражательного типа, реализующих дифференциальную схему преобразования, правильная фиксация оптического волокна внутри волоконно-оптического кабеля, а также улучшение чувствительности средства измерений, обеспечивают повышение точности измерений ВОДСДЖ.

Материалы и методы

Разработана обобщенная структурно-аналитическая модель дифференциальных ВОДСДЖ, основными элементами которых являются волоконно-оптические преобразователи угловых микроперемещений (ВОПУМП) отражательного типа (рис. 1).

В основе разрабатываемых ВОДСДЖ лежит принцип построения в виде блоков и модулей, данный подход к проектированию позволяет определять технические характеристики каждого блока на стадиях разработки и проектирования или изготовления, что улучшает метрологические, технические и некоторые эксплуатационные характеристики датчика [1].

Как уже было сказано, в основе конструкции ВОДСДЖ лежит дифференциальный ВОПУМП, в состав которого входит оптико-модулирующий элемент (ОМЭ) в виде отражателя, который представляет из себя металлическую пластину с двумя зеркальными отражающими поверхностями [2].

Для передачи силового воздействия жидкостного потока на ВОПУМП в конструкцию датчика введен воспринимающий элемент (ВЭ), состоящий из сильфона и погружного элемента.

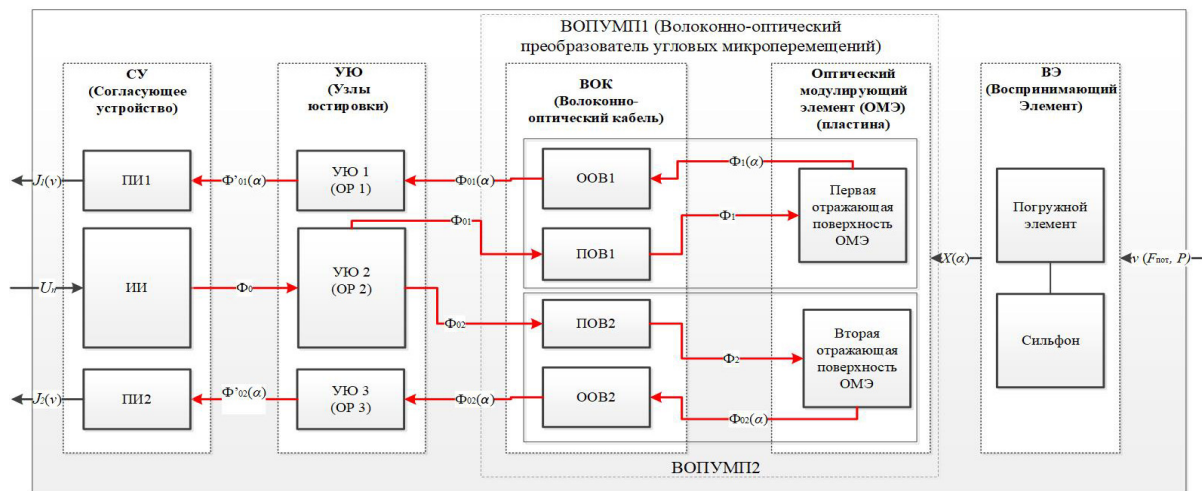


Рис. 1. Структурно-аналитическая модель дифференциального волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости: СУ – согласующее устройство; ПИ – приемник излучения; ИИ – источник излучения; УЮ – узел юстировки; ВОК – волоконно-оптический кабель; ОМЭ – оптико-модулирующий элемент; ВЭ – воспринимающий элемент; ВОПУМП – волоконно-оптический преобразователь угловых микроперемещений

Неотъемлемой частью ВОДСДЖ является волоконно-оптический кабель (ВОК), представляющий собой жгут, в его состав входят два подводящих (ПОВ) и два отводящих (ООВ) оптических волокна, расположенных в двух измерительных каналах (ИК). ВОК является передатчиком световых потоков от источника излучения (ИИ) в измерительную зону и обратно к приемникам излучения ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК соответственно. Приемные торцы ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК подстыкованы к ИИ с помощью ПОВ1 и ПОВ2. Оптические волокна измерительных каналов расположены с разных сторон относительно ОМЭ, при этом подводящие оптические волокна (ПОВ1) первого ИК расположены соосно с отводящими оптическими волокнами (ООВ2) второго ИК и, наоборот, ПОВ2 второго ИК расположены соосно с ООВ1 первого ИК.

При силовом воздействии жидкостного потока погружной элемент отклонится на некоторый угол α , что в свою очередь повлечет отклонение на такой же угол отражателя с зеркальными поверхностями.

В разрабатываемых ВОДСДЖ унифицированными являются конструктивно-технологические решения ВОПУМП, ВЭ, ВОК. Для измерения скорости потока в разных условиях и с различными типами жидкости изменяется только конструкция погружного элемента.

Неправильное расположение волокна относительно источника или приемника излучения вызывает резкое снижение точности результатов измерений или может привести к неработоспособности датчика.

Цель работы

Исследование и обоснование основных процедур юстировки ВОДСДЖ, снижающих погрешности датчика и разработка узлов его юстировки, обеспечивают повышение чувствительности средства измерения.

Результаты

В структуре ВОДСДЖ присутствуют узлы юстировки УЮ1, УЮ2, УЮ3, от точности изготовления которых в процессе сборки зависят метрологические характеристики датчика.

Основной функцией процедуры юстировки является достижение верного взаиморасположения элементов волоконно-оптического датчика относительно друг друга, а также их правильное взаимодействие между собой.

Разработаны технология юстировки ВОДСДЖ и технология позиционирования оптических волокон относительно отражателя и относительно приемников и источника излучений.

Основными критериями правильного проведения процедуры юстировки ВОДСДЖ являются:

- 1) достижение высокой чувствительности преобразования оптического сигнала;
- 2) достижение максимальной линейности функции преобразования датчика.

Для повышения чувствительности преобразования оптического сигнала в конструкции датчика предусмотрены узлы юстировки, данные узлы показаны на структурной схеме (см. рис. 1), в разработанном ВОДСДЖ таких узла три.

Узел юстировки представляет собой элемент, который помогает зафиксировать положение оптического волокна относительно источника и приемника излучения.

На рис. 2 представлена юстировка оптических волокон в конструкции ВОДСДЖ, для ПОВ1 и ООВ2, аналогичным образом выглядит и юстировка оптических волокон ВОДСДЖ, расположенных на таком же расстоянии от отражателя, но с противоположной стороны. Процедуры юстировки оптического волокна первого и второго измерительных каналов аналогичны. При проведении такой процедуры в конструкцию датчика добавляются дополнительные элементы 1, которые вводятся в корпус 2 для фиксации оптического волокна (ОВ) 3.

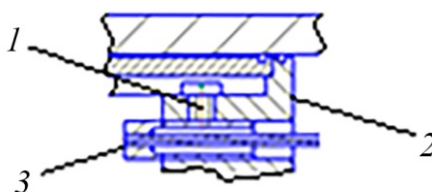


Рис. 2. Процедура юстировки оптического волокна в корпусе датчика:

1 – винт, для фиксации оптического волокна в корпусе датчика;
2 – корпус датчика; 3 – оптическое волокно

За счет точной и жесткой фиксации ОВ в корпусе можно добиться повышения чувствительности преобразования оптических сигналов в 2 раза.

Оптико-модулирующий элемент необходимо располагать в зоне с равномерной освещенностью – это способствует проведению простых расчетов и графических построений, а также обеспечивает максимальную линейность выходной зависимости.

На рис. 3 представлен узел стыковки отражателя 1 и погружного элемента датчика 2. Отражатель закреплен на погружном элементе датчика с помощью резьбы, при этом для того, чтобы отражатель был стабильно закреплен на погружном элементе, предварительно резьбу можно обработать клеем или дополнительно закрепить его на поверхности с помощью сварки [6].

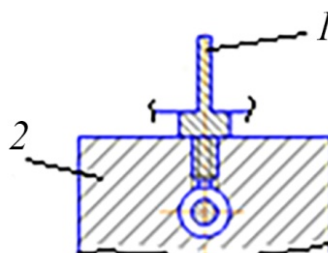


Рис. 3. Узел стыковки отражателя и погружного элемента ВОДСДЖ:

1 – отражатель; 2 – погружной элемент

Процедура юстировки заключается в следующем: при введении оптических волокон в корпус отражатель 1 должен быть размещен перпендикулярно ПОВ и ООВ, если после распространения излучения светового потока внутри оптического волокна наблюдаются большие потери отраженного светового потока, попадающего в ООВ, то с помощью резьбы положение отражателя 1 на погружном элементе 2 можно отрегулировать, тем самым задав более точное позиционирование относительно ОВ. При получении необходимой интенсивности отраженного светового потока положение отражателя можно дополнительно фиксировать с помощью клея или импульсной сварки.

Еще одним источником возникновения дополнительных погрешностей ВОДСДЖ может служить ОВ при его неправильном расположении и фиксации внутри ВОК: могут происходить изгибы, которые влияют на точность измерений датчика.

Для снижения дополнительных погрешностей, вызванных изгибами оптических волокон, разработан волоконно-оптический кабель для ВОДСДЖ. Дополнительные погрешности, вносимые изгибами такого кабеля, учтены и проанализированы в работе [3].

На оптическое волокно на протяжении всего срока службы оказывают воздействия вибрации, удары и т.д. В дифференциальной схеме преобразования данные факторы практически не оказывают влияния на результаты измерения, это достигается тем, что все волокна расположены в одном жгуте и испытывают одинаковые внешние воздействия [4].

На рис. 4 представлены основные способы позиционирования оптических волокон относительно световозлучающей площади светодиода 3Л107Б, а также световой чувствительной площадки фотодиода КФДМ [3].

Все рассматриваемые варианты имеют свои достоинства по различным параметрам и свои недостатки, вызванные различными факторами.

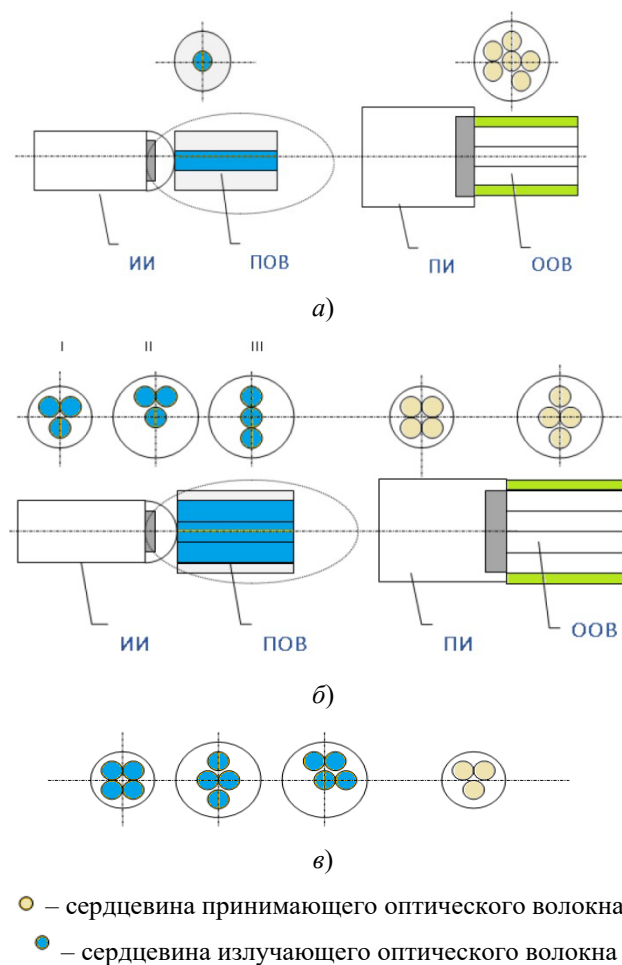


Рис. 4. Обоснование взаимного расположения оптического волокна относительно источника и приемника излучений: а – первый (I); б – второй (II); в – третий (III) варианты позиционирования оптических волокон относительно световозлучающей площади светодиода

Первый вариант (I) наиболее простой в изготовлении, но недостатком такого подхода остаются существенные потери светового потока, что связано с наибольшей мощностью лучей, распространяющихся из центра ИИ, в данной зоне отсутствует ПОВ.

В таком случае более предпочтительным окажется второй вариант (II), имеющий одно ПОВ, расположенное по центру ИИ [3]. Дополнительные погрешности средства измерения вносит несимметричное расположение оптических волокон в жгуте.

При изготовлении ВОДСДЖ эффективным будет использование небольших отрезков технологических оптических волокон, с помощью которых возможно обеспечить более точное совпадение оптических осей источника излучения и центрального подводящего оптического волокна. К тому же такое расположение ОВ в жгуте позволяет определить угловое отклонение диаграммы направленности светодиода при настройке ВОДСДЖ по уровню выходного сигнала при обеспечении взаимного углового смещения жгута и источника излучения по отношению друг к другу и вдоль оптической оси.

При третьем варианте (III) ПОВ растянуты вдоль некоторой поперечной оси, предпочтение в применении получило угловое смещение диаграммы по излучению светового потока светодиодов, а не поперечное. Кроме того, данный жгут прост в изготовлении [3].

Технология юстировки ИИ относительно ПОВ

На рис. 5 показан узел стыковки ПОВ и ИИ.

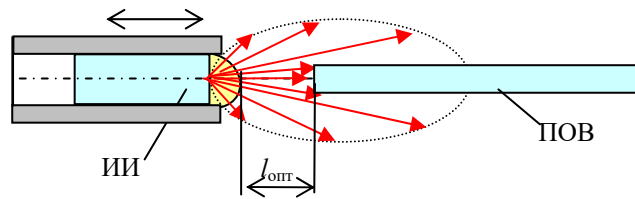


Рис. 5. Узел «ИИ – ПОВ»

Процедура юстировки ПОВ относительно ИИ следующая: ИИ приближается и удаляется относительно отверстия ПОВ, предназначенного для окончательной установки ОВ, относительно общего нерабочего торца ВОК.

При расчетно-конструктивном способе должно быть указано расчетное расстояние $l_{\text{расч}}$ между ИИ и ПОВ, а также настраивается узел перемещения ИИ вдоль продольной оси узла «ИИ – ПОВ» и фиксируется экспериментально полученное расстояние $l_{\text{эсп}}$.

Примечание. При настройке подводящие оптические волокна остаются неподвижными, что, в свою очередь, связано с их полировкой до $R_Z = 0,63$ [3].

С помощью оптического тестера фиксируется оптическая мощность W в последовательности:

1. Первоначально фиксируется W_{max} при радиусе изгиба $R_{\text{изг}} = 0$.

При W_{max} определяется положение ИИ в $l_{\text{эсп}}$.

2. На данном этапе поочередно изгибается ПОВ в трех местах: в середине, в месте соединения ВОК и ВОПУМП и в месте соединения ВОК и СУ.

Начинают изгибать ПОВ с угла 30 и далее по порядку: 60, 90, 120, 150, 180°.

На основании полученных результатов строится график, как показано рис. 6, в виде примера.

Выбирают зависимость, имеющую самую высокую чувствительность, при которой оптическая мощность W практически не меняется от изгиба оптического волокна на радиус $R_{\text{изг}}$ (рис. 6).

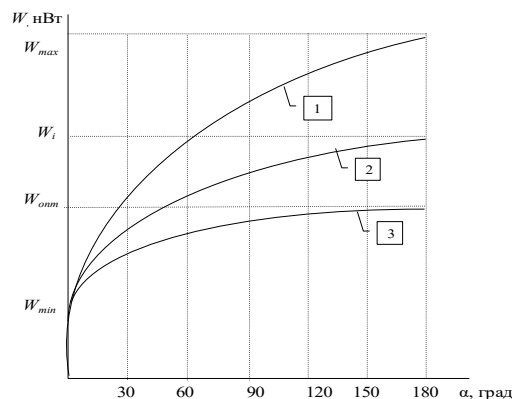


Рис. 6. Графики зависимостей $W = f(\alpha)$ разных радиусах изгиба $R_{\text{изг}}$

Проводится анализ полученных зависимостей:

зависимость 1

а) имеет наибольшее значение W при отсутствии изгибов;

б) одновременно при изменении $R_{\text{изг}}$ резко меняется W ;

зависимость 2

а) значение W при наиболее характерных значениях изгибов (в процессе изготовления и эксплуатации не изменяется) [3–5];

б) W не на много меньше, по сравнению с зависимостью 1;

в) изгибы $R_{\text{изг}}$ влияют на W ;

зависимость 3 (предпочтительная)

а) имеет наименьшее значение W при всех значениях α ,

б) при этом изгибы $R_{\text{изг}}$ не оказывают влияния на W .

Вывод: *зависимость 3* желательно выбирать только в том случае, если $W \geq W_{\text{крит}}$, где $W_{\text{крит}}$ – допустимое наименьшее значение начальной оптической мощности, при котором датчик осуществляет функционирование при воздействии внешних факторов. Это значение определяется до начала процедуры юстировки [3–5].

Заключение

Разработанные процедуры юстировки позволили уменьшить в 2–3 раза дополнительные погрешности, вызванные воздействиями внешних факторов, в первую очередь от изменения температуры окружающей среды, приводящей к изменению мощности излучения источника излучения и интегральной токовой чувствительности приемника излучения.

Чувствительный элемент датчика обеспечивает требуемую чувствительность преобразования оптического сигнала, если качественно выполнить процедуры юстировки.

В статье рассмотрены основные критерии и технологии юстировки ПОВ относительно ИИ, узел стыковки отражателя и погружного элемента, процедура юстировки оптического волновода в корпусе датчика, способы снижения дополнительных погрешностей и улучшения метрологических характеристик ВОДСДЖ.

Библиографический список

1. Бадеева, Е. А. Принципы повышения надежности волоконно-оптических кабелей для датчиков с открытым оптическим каналом / Е. А. Бадеева, Е. А. Полякова, А. В. Мотин // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении («Свет-2018») : материалы Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной молодежной школы, посвящ. 20-летию ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение» / под ред. проф. Т. И. Мурашкиной. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 23–27.
2. Шачнева, Е. А. Волоконно-оптический датчик расхода жидкостных сред для системы жизнеобеспечения космонавтов / Е. А. Шачнева, Т. И. Мурашкина, А. Ю. Удалов // Сборник конкурсных докладов XIII Всерос. молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. – Москва : ФГБУ науки Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2015. – С. 361–366.
3. Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники : дис. ... д-ра техн. наук / Бадеева Е. А. – Пенза, 2017. – 463 с.
4. Юрова, О. В. Вывод функции преобразования дифференциального волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений / О. В. Юрова, С. А. Бростилов, А. С. Щевелев, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы : сб. докл. XXX науч.-техн. конф. молодых специалистов (30–31 марта 2011 г.) / под ред. акад. Академии проблем качества РФ А. В. Блинова. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 45–51.
5. Щевелев, А. С. Технология дифференциального волоконно-оптического датчика виброускорения / А. С. Щевелев, О. В. Юрова, С. А. Бростилов, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы : сб. докл. XXX науч.-техн. конф. молодых специалистов (30–31 марта 2011 г.) / под ред. акад. Академии проблем качества РФ А. В. Блинова. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 61–67.

References

1. Badeeva E. A., Polyakova E. A., Motin A. V. *Volonno-opticheskie, lazernye i nanotekhnologii v naukoemkom priborostroenii («Svet-2018»): materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy*

- molodezhnoy shkoly, posvyashch. 20-letiyu vedushchey nauchnoy shkoly Rossii «Volokonno-opticheskoe priborostroenie»* [Fiber-optical, laser and nanotechnologies in high-tech instrument engineering (Svet-2018): proceedings of the international scientific and technical conference. conf. with elements of a scientific youth school, vol. 20th anniversary of the leading scientific school of Russia "Fiber-optical instrumentation"]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 23–27. [In Russian]
2. Shachneva E. A., Murashkina T. I., Udalov A. Yu. *Sbornik konkursnykh dokladov KhIII Vseros. molodezhnogo Samarskogo konkursa-konferentsii nauchnykh rabot po optike i lazernoy fizike* [Collection of competitive reports XIII all-Russian Samara youth competition-conference of scientific papers on optics and laser physics]. Moscow: FGBU nauki Fizicheskiiy institut im. P. N. Lebedeva RAN, 2015, pp. 361–366. [In Russian]
 3. Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki: diss. d-ra tekhn. nauk* [Fiber-optic pressure sensors for information and measurement systems of rocket, space and aviation equipment: diss. ... doctor of technical sciences]. Penza, 2017, 463 p. [In Russian]
 4. Yurova O. V., Brostilov S. A., Shchevelev A. S., Murashkina T. I. *Datchiki i sistemy: sb. dokl. XXX nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (30–31 marta 2011 g.)* [Sensors and systems: sat. Dokl. XXX scientific and technical conf. of young specialists (March 30–31, 2011)]. Penza: OAO «NIIFI», 2011, pp. 45–51. [In Russian]
 5. Shchevelev A. S., Yurova O. V., Brostilov S. A., Murashkina T. I. *Datchiki i sistemy: sb. dokl. XXX nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (30–31 marta 2011 g.)* [Sensors and systems: sat. Dokl. XXX scientific and technical conf. of young specialists (March 30–31, 2011)]. Penza: OAO «NIIFI», 2011, pp. 61–67. [In Russian]

Шачнева Елена Андреевна

соискатель,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
программист,
ООО «Норд-Пак»
(Россия, г. Пенза, ул. Рябова, 7)
E-mail: e_shachnva@mail.ru

Shachneva Elena Andreevna

applicant,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
programmer,
LLC "NORD-Pak"
(7 Ryabova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Шачнева, Е. А. Способы юстировки волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости / Е. А. Шачнева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 65–72. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-8.

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 614.21

DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-9

О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, Б. В. Чувькин

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

О. Е. Bezborodova, O. N. Bodin, M. N. Kramm, B. V. Chuvykin

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN MEDICAL INFORMATION SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В настоящее время уделяется большое внимание исследованиям различных информационных систем на основе мультиагентных технологий, являющихся наряду с искусственным интеллектом и облачными вычислениями одним из последних достижений информационных технологий, способствующих повышению эффективности обработки информации, автоматизации и управления. Статья посвящена применению современных информационных технологий в медицинских информационных системах, широкое распространение которых обусловлено необходимостью совершенствования профилактики, диагностики и лечения заболеваний. **Материалы и методы.** Использован агентно-ориентированный подход к построению медицинских информационных систем. **Результаты.** В статье показано, что основным элементом в медицинских информационных системах является автоматизированное рабочее место врача, где на основе технологии *eHealth*, мультиагентной и облачной технологий в рамках Государственного единого облачного пространства обеспечивается оказание необходимых медицинских услуг. **Выводы.** Отличительной особенностью автоматизированного рабочего места врача является трехзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая: осуществлять мониторинг функционального состояния организма пациента; автоматически с помощью носимого мобильного устройства, которым оснащен пациент из группы риска, принимать решение по оказанию экстренной медицинской помощи в случае определения жизни угрожающего функционального состояния организма; моделировать функциональное состояние организма пациента и прогнозировать течение заболевания; организовать консилиум специалистов для принятия врачебного решения; освободить врача от рутинной бумажной работы, и отличающаяся иерархической организацией информационного взаимодействия гетерогенной группы интеллектуальных агентов. Благодаря современным информационным технологиям расширяются функциональные возможности медицинских информационных систем.

A b s t r a c t. Background. At present, much attention is paid to the research of various information systems based on multi-agent technologies, which, along with artificial intelligence and cloud computing, are one of the latest achievements of information technologies that con-

tribute to improving the efficiency of information processing, automation and control. The article is devoted to the use of modern information technologies in medical information systems, the widespread use of which is due to the need to improve the prevention, diagnosis and treatment of diseases. **Materials and methods.** An agent-based approach to the construction of medical information systems is used. **Results.** The article shows that the main element in medical information systems is an automated workstation for a doctor, where, based on eHealth technology, multi-agent and cloud technologies, the provision of necessary medical services is provided within the framework of the State Unified Cloud Space. **Conclusions.** A distinctive feature of the automated workstation of a doctor is a three-tier client-server architecture, which allows: monitoring the functional state of the patient's body; automatically, using a wearable mobile device equipped with a patient from a risk group, make a decision on the provision of emergency medical care in the event that a life threatening functional state of the body is determined; simulate the functional state of the patient's body and predict the course of the disease; organize a consultation of specialists to make a medical decision; free the doctor from routine paperwork, and a hierarchical organization of information interaction of a heterogeneous group of intelligent agents. Thanks to modern information technologies, the functionality of medical information systems is expanding.

К л ю ч е в ы е с л о в а: современные информационные технологии, медицинские информационные системы, интеллектуальные агенты, автоматизированное рабочее место врача.

К e y w o r d s: modern information technologies, medical information systems, intelligent agents, automated workstation of a doctor.

Актуальность

Электронное здравоохранение (*eHealth*) включает в себя комплекс средств, повышающих доступность и качество медицины за счет реализации потенциала информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). ИКТ открывают широкие возможности для использования носимых медицинских устройств (НМУ) с целью мониторинга здоровья пациентов, дистанционного и оперативного оказания высококвалифицированной медицинской помощи, использования систем поддержки принятия решения, а также организации дистанционных консилиумов врачей [1, 2]. Прогнозируется, что к 2024 г. рынок носимых медицинских устройств достигнет 67 млрд долл. [3].

В настоящее время в России в целом сформирован рынок медицинских информационных систем (МИС) и программного обеспечения для них. Разработка, развитие и внедрение МИС для регионального здравоохранения являются приоритетом (85 % от всего финансирования) государственного финансирования в 2019–2024 гг. Наиболее перспективными направлениями совершенствования МИС на период до 2024 г. являются развитие сферы использования НМУ, для этого необходимо развитие облачных технологий и интеллектуализации медицинской деятельности [4].

Постановка проблемы

В настоящее время наблюдается бум персональных портативных систем мониторинга состояния здоровья – НМУ или же *wearables* – это мини-компьютеры, в которые встроены специальные датчики, измеряющие параметры окружающей среды и физические показатели человека, а также уровень его активности. Устройства при этом подключены к сети *Internet* и синхронизированы с ПК или смартфоном врача и/или пациента. Эти устройства характеризуются непосредственным соединением с сетью *Internet*, взаимодействием с окружающей средой и владельцем; выполнением функции не только умного устройства, но и аксессуара (часы, браслеты, трекеры). НМУ позволяют снизить риск госпитализации или даже смерти, уменьшают вероятность травмы, помогают предупредить развитие болезни, позволяют осуществлять удаленный мониторинг состояния пациентов в режиме 24/7 [5]. Учитывая статистику

сердечно-сосудистых заболеваний и внезапной сердечной смерти, необходимость обеспечения пациентов портативными кардиоанализаторами (ПКА) выходит на первый план.

Для эффективного использования ПКА в целях своевременного оказания экстренной кардиологической помощи и предотвращения внезапной сердечной смерти необходима постоянная связь ПКА через *Internet* с автоматизированным рабочим местом (АРМ) врача-кардиолога и наличие больших вычислительных мощностей для обработки электрокардиосигнала (ЭКС).

Целью статьи является разработка путей совершенствования МИС медицинской организации (МО) для повышения качества медицинских услуг.

Решение проблемы

С 2015 г. в РФ разрабатывается и поэтапно реализуется «Концепция создания государственной единой облачной платформы» [6, 7]. Проект Государственного единого облачного пространства (ГЕОП) нацелен на предоставление государственным структурам единой облачной платформы. «Гособлако» – это защищенное облако, безопасность работы в котором обеспечивается государством. Это особенно важно при передаче по *Internet* медицинских данных. Если данные хранятся в «облаке», их копии автоматически распределяются по нескольким серверам. При выходе из строя компьютера на АРМ врач не теряет данные – он может получить их с любого другого компьютера ГЕОП. Дата-центры ГЕОП обеспечивают круглосуточную поддержку функционирования виртуальных машин. Это создает высокий уровень надежности и отказоустойчивости функционирования МИС МО.

Авторы считают, что наиболее подходящей для организации информационного взаимодействия в МИС МО является трехзвенная клиент-серверная архитектура [8]. На рис. 1 приведена схема трехзвенной клиент-серверной архитектуры МИС МО. Клиент связывается с базой данных (БД) не напрямую, а через сервер приложений.

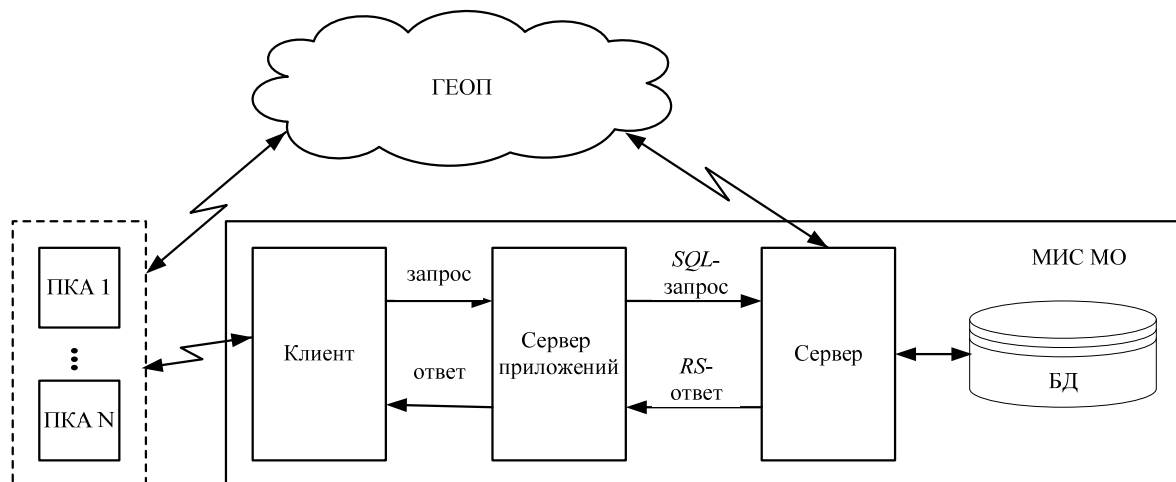


Рис. 1. Схема трехзвенной клиент-серверной архитектуры МИС МО

В рамках ГЕОП работа трехзвенной клиент-серверной архитектуры МИС МО построена следующим образом:

- БД в виде набора файлов находится на жестком диске специально выделенного компьютера (сервера сети МИС МО);
- система управления БД (СУБД) располагается также на сервере сети МИС МО;
- существует специально выделенный сервер приложений, на котором располагается программное обеспечение (ПО) анализа медицинской информации;
- существует множество клиентских компьютеров, на каждом из которых установлен так называемый «тонкий клиент» – клиентское приложение, реализующее интерфейс пользователя;
- на каждом из клиентских компьютеров пользователи имеют возможность запустить приложение – «тонкий клиент», который инициирует обращение к ПО анализа медицинской информации;

- сервер приложений анализирует требования пользователя и формирует запросы к БД. Для общения используется специальный язык запросов *SQL*, т.е. по сети от сервера приложений к серверу БД передается лишь текст запроса;
- СУБД инкапсулирует внутри себя все сведения о физической структуре БД, расположенной на сервере;
- СУБД инициирует обращения к данным, находящимся на сервере, в результате которых результат выполнения запроса копируется на сервер приложений;
- сервер приложений возвращает результат в клиентское приложение (пользователю);
- приложение, используя пользовательский интерфейс, отображает результат выполнения запросов.

По мнению авторов, трехзвенная клиент-серверная архитектура МИС МО способствует повышению качества медицинских услуг.

Облачные вычисления

Облачные вычисления осуществляются сетевыми компьютерными системами, основными элементами которых являются: компьютерная сеть с повышенной надежностью и пропускной способностью; клиент «облака» – аппаратное и программное обеспечение, взаимодействующее с «облаком» на основе стека протоколов TCP/IP; собственно «облако» – программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий работу «облачных» сервисов, взаимодействие с клиентом и динамическое управление ресурсами облака [9]. Применительно к МО это соответственно локальная вычислительная сеть МИС МО, АРМ врача-кардиолога и ГЕОП.

С точки зрения АРМ врача-кардиолога отличием работы в «облачной» среде от использования традиционных сетевых ресурсов является универсальный интерфейс, ориентированный на *web*-технологии и *http*-протокол в качестве базовых средств управления «облаком» и доступа к его сервисам. Для специализированного ПО сохраняется возможность использования собственных прикладных протоколов, работающих в составе стека протоколов *TCP/IP*.

При построении «облачной» МИС базовой является трехзвенная модель «клиент – сервер», предполагающая выделение клиента – выполняющего функции взаимодействия с пользователем и формирования запросов на основе заложенной логики, и сервера – выполняющего специализированную обработку данных. Сетевые коммуникации клиента и сервера выполняются в соответствии с нормами эталонной модели взаимодействия открытых систем *ISO/OSI* и моделью взаимодействия *TCP/IP* [10].

Способ доступа – «*http*-клиент – *web*-интерфейс доступа к серверу – сервер», показанный на рис. 2, универсален и позволяет использовать любой тип сервиса при наличии у пользователя только *http*-клиента, что характерно для мобильных устройств, таких как ПКА.

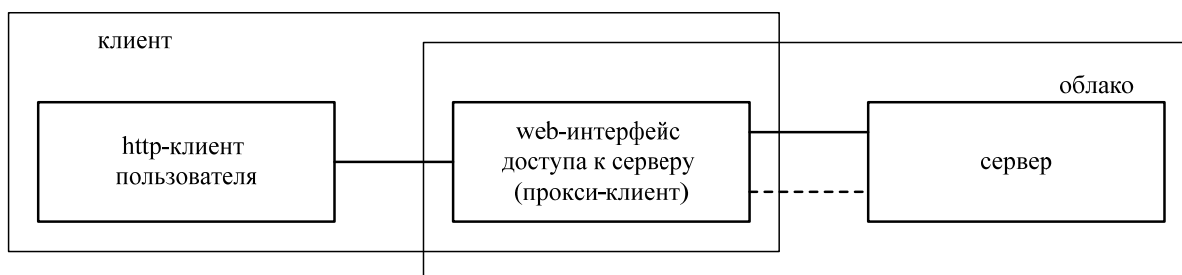


Рис. 2. Особенности клиент-серверной модели организации «облака» МИС МО

При этом:

- реализуется единый для всех сервисов путь «*http*-клиент – компьютерная сеть – программно-аппаратное ядро – *web*-интерфейс управления ресурсами и обеспечения доступа к сервисам – шина доступа к сервисам «облака» – сервис»;
- разделяются функции клиента на платформо-зависимый интерфейс пользователя, который реализуется аппаратурой, операционной системой и *Internet*-обозревателем, и платформо-независимую исполнительную часть, реализующую бизнес-логику и технический интерфейс доступа к серверу.

Таким образом, имеющийся в составе архитектуры «облака» *web*-интерфейс управления ресурсами и обеспечения доступа к сервисам транслирует *http*-трафик клиента в трафик специализированного сервисного протокола и освобождает программно-аппаратные средства пользователя от сложных, производительных вычислений; обеспечивая пространственную и временную мобильность пользователя. При использовании «облака» пользователь МИС МО ориентирован на обработку информации, а не на передачу данных, что способствует повышению качества медицинских услуг.

Мультиагентные технологии

Мультиагентная система (МАС) – это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами (ИА). МАС создаются для решения проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента. Примерами таких задач являются моделирование развития заболевания или подбор лекарственных препаратов с учетом особенностей и противопоказаний пациента.

МАС – это сложный программно-аппаратный комплекс с интеллектуальными компонентами или использующий нейронные сети, в которых традиционное понятие «программы» оказывается в определенной степени размытым. В работе [11] дается формализованное определение МАС, не детализируя содержание входящих в формулу составляющих:

$$MAS = (A, E, R, ORG, ACT, COM, EV),$$

где A – множество ИА, E – множество сред, находящихся в определенных отношениях R и взаимодействующих друг с другом, формирующие некоторую систему ORG , обладающих набором индивидуальных и совместимых действий ACT (стратегия поведения и поступков), включая возможные коммуникативные действия COM и возможность эволюции EV .

Согласно работе [12] МАС может рассматриваться как сильно связанная сеть решателей, совместно работающих над проблемами, которые могут выходить за рамки возможностей отдельных ИА.

Исходя из этого, МАС – это совокупность взаимосвязанных программно-аппаратных ИА, способных взаимодействовать друг с другом и внешней средой, обладающих определенными интеллектуальными способностями и возможностью индивидуальных и совместных действий.

На основе материалов, приведенных в работах [13, 14], где отмечены характерные особенности ИА: чувствительность к внешним воздействиям, объем памяти и времени, необходимого на выполнения действия, авторами для определения интеллектуальности агентов осуществлено ранжирование агентов (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры, характеризующие интеллектуальность агентов

Сенсорные свойства агента	S1	0	С одним чувством
		1	С несколькими чувствами
	S2	0	Только одно из многих чувств в данной ситуации
		1	Множественные чувства на единичный объект, событие или ситуацию
Характеристики памяти	M1	0	Без памяти
		1	С памятью на прошедшие события (конечной)
		2	С потенциально неограниченной или бесконечной памятью
	M2	0	Только с кратковременной памятью
		1	С кратковременной и долговременной памятью
	M3	0	Не может обучаться (не наращивает долговременную память)
		1	Может обучаться (наращивает долговременную память)
	M4	0	Хранит сенсорную информацию по некоторому чувству
		1	Хранит сенсорную информацию по всем чувствам
Возможность действия во времени	T1	0	Действует только в реальном времени
		1	Может планировать действия
	T2	0	Не может визуализировать чувства
		1	Может визуализировать некоторые чувства
		2	Может визуализировать все чувства
	T3	0	Не имеет модели среды существования
		1	Имеет предопределенную модель
		2	Может создавать ментальные модели среды

Значения приведенных в табл. 1 параметров можно рассматривать как координаты вектора в параметрическом пространстве или как кодовое слово вида $S_1 S_2 M_1 M_2 M_3 M_4 T_1 T_2 T_3$ в троичной системе счисления.

По приведенной в работе [14] формуле можно вычислить и сравнить уровень интеллектуальности различных агентов:

$$ID = \sum_{i=S_1}^{T_3} |Par_{ai} - Par_{bi}|,$$

где Par_{ai} , Par_{bi} – значения признака для агентов a и b соответственно, а индекс i – состоит из множества параметров $\{S_1, S_2, M_1, M_2, M_3, M_4, T_1, T_2, T_3\}$, приведенных в табл. 1.

Для МАС может быть введено понятие среднего веса ИА в системе, определяемое по формуле

$$IW_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n IW_i,$$

где n – число ИА в МАС, IW_i – вес i -го ИА.

Основной отличительной особенностью агента является интеллектуальность, т.е., комплекс технологических решений, имитирующий когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и позволяющий при выполнении задач достигать результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека. Комплекс технологических решений включает информационно-коммуникационную инфраструктуру, ПО, в котором в том числе используются методы машинного обучения, процессы и сервисы по обработке данных и выработке решений.

Предлагаемая концепция МАТ в МИС на основе функциональных моделей ИА и МАС обеспечивает интеграцию ИА и облачных вычислений в рамках одной структуры МИС, оптимизацию и персонализацию оказания лечебно-диагностической медицинской помощи путем функционального распределения целей и задач агентов.

Результаты

Основой взаимодействия МИС МО с ГЕОП является АРМ врача-специалиста, «Гособлако» генерирует рабочее место как услугу. В основе данного подхода по предоставлению МИС МО АРМ врачей лежит технология *VDI* – виртуальное рабочее место [15]. В этом случае обеспечивается доставка полноценного профиля врача-пользователя до его рабочего места. Основной функционал подхода «Рабочее место как услуга» заключается в настройке и развертывании виртуального АРМ на основе единого программного шаблона с учетом специализации врача (шаблоны медицинских заключений врачей-специалистов, средства для заполнения электронных медицинских карт, доступ к разделам БД лекарств и пр.). Также, в зависимости от размеров и специализации МО, осуществляется масштабирование АРМ – количество и функционал АРМ каждой специализации.

В МИС на основе мультиагентной технологии интеллектуальный агент вместе со своей онтологией и персональными настройками поставлен в соответствие каждому пациенту и врачу-специалисту, руководителям различного уровня в МО, любым ресурсам МО, таким как подразделение, лекарство или диагностическая процедура, метод лечения.

Функции контроля и первичной диагностики пациента в условиях свободной двигательной активности или стационара возложены на интеллектуального агента прогноза течения болезни (ИА ПТБ). Этот ИА размещен на сервере МИС МО и имеет возможность клонирования стационарного ИА ПТБ на АРМ врачей-специалистов, в том числе и кардиолога, а также мобильного ИА ПТБ для ПКА (см. рис. 1).

Мониторинг состояния сердца пациента осуществляется следующим образом. Врач-кардиолог устанавливает пациенту ПКА и в состоянии покоя и оптимального состояния сердца регистрирует и фиксирует ЭКС в исходном мире ИА ПТБ как стандартный для данного пациента. Этот сигнал в дальнейшем будет считаться ИА ПТБ как эталонный и использоваться для анализа последующих состояний сердца пациента. После чего по каналу связи (*Internet*,

wi-fi, и пр.) врач-кардиолог подключает ПКА пациента к своему АРМ, оснащённому специальным ПО.

ПКА в условиях свободной двигательной активности пациента вне МО регистрирует ЭКС пациента, а ИА ПТБ фиксирует его как состояние «своего» мира. На рис. 3 представлена схема алгоритма работы ПКА в составе МИС МО [16].



Рис. 3. Схема алгоритма работы ПКА в составе МИС

В случае обнаружения жизни угрожающего состояния сердца пациента мобильный ИА ПТБ **экстренно** передает информацию на АРМ врача-кардиолога. Если диагноз подтверждается, стационарный ИА ПТБ отправляет на ПКА соответствующее сообщение, при этом осуществляется вызов скорой медицинской помощи к текущему местоположению пациента. Если же диагноз не подтверждается, ПКА продолжает штатную работу.

При предварительной обработке на зарегистрированном ЭКС осуществляется устранение дрейфа изолинии. На рис. 4 и 5 представлены соответственно ЭКС с дрейфом изолинии и результат устранения дрейфа изолинии ЭКС в ПКА.

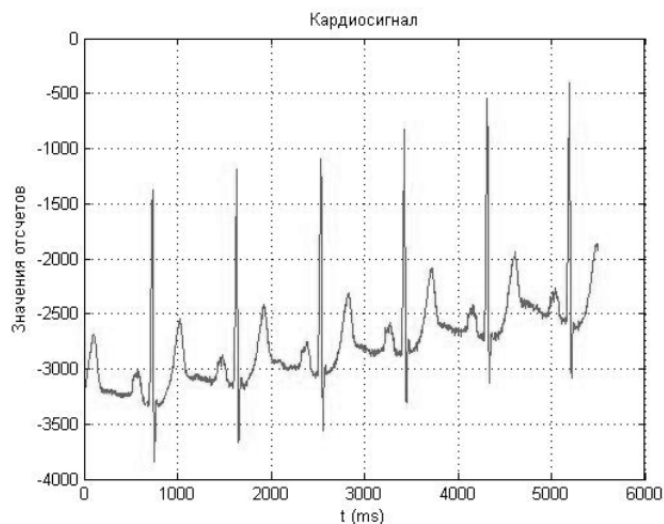


Рис. 4. ЭКС с дрейфом изолинии

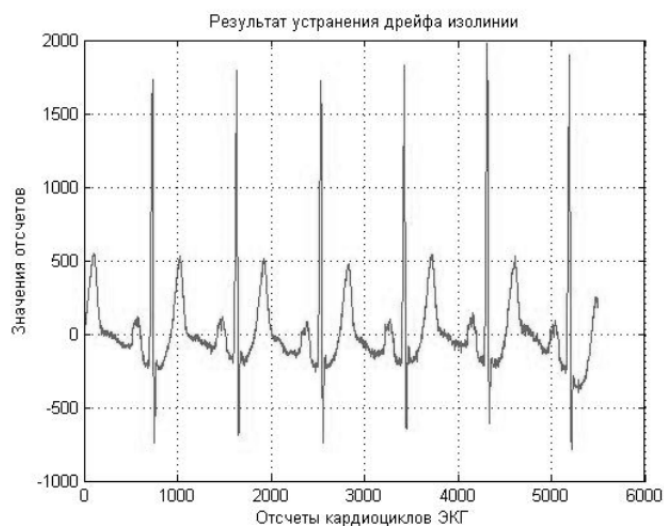


Рис. 5. Результат устранения дрейфа изолинии ЭКС в ПКА

Дрейф изолинии представляет собой низкочастотные колебания с частотой менее 1 Гц и обусловлен влиянием на ЭКС аддитивных низкочастотных помех. Наибольшее влияние дрейф изолинии оказывает на анализ низкочастотных участков ЭКС, особенно *ST* сегментов (см. рис. 3). Кроме того, непостоянство изолинии влияет на точность измерения амплитудных параметров зубцов, так как именно от изолинии ведется отсчет их амплитуды [17].

Для устранения дрейфа изолинии ЭКС в ПКА в каждом цикле сердечных сокращений на *TP*-сегменте выделяют и запоминают значения отсчетов ЭКС. Далее выделяют участки монотонности ЭКС и формируют значения отсчетов сигнала дрейфа изолинии на каждом участке монотонности ЭКС путем сортировки по возрастанию (для монотонно возрастающего участка) или убыванию (для монотонно убывающего участка) значений их отсчетов. Полученный сигнал дрейфа изолинии вычитают из исходного ЭКС. Результат устранения дрейфа изолинии ЭКС в ПКА приведен на рис. 4. Как следует из анализа рис. 4, дрейф изолинии ЭКС значительно снижается, что позволяет повысить качество диагноза.

Заключение

Авторами предложена методика построения МИС с использованием мультиагентных и облачных технологий, опирающаяся на принцип распределения функций между всеми агентами системы. Такая система по своей сути представляет собой совокупность отдельных ин-

теллектуальных систем, каждая из которых решает свою задачу в соответствии с принципом распределенного решения задач.

Предлагаемая вычислительная модель МИС с использованием МАТ в рамках трехзвенной архитектуры «клиент–сервер» обеспечивает мониторинг состояния сердца, оценку состояния сердца, моделирование электрической активности сердца с использованием облачных вычислений.

Ядром вычислительной модели МИС с использованием МАТ является АРМ врача-кардиолога. Согласно принципу распределения функций между агентами множество модулей АРМ, реализующих функции агентов, интерпретируют задачу МИС с различных точек зрения. В результате формируется ЭМК пациента, в которой отражена деятельность агентов.

Предлагаемая вычислительная модель МИС призвана помочь врачу и не навредить пациенту.

Библиографический список

1. Сайт «Telados. Health». – URL: <https://www.teladoc.com/> (дата обращения: 26.10.2020).
2. Журавлев, М. С. Электронное здравоохранение: становление и развитие / М. С. Журавлев // Право. Журнал Высшей школы экономики. – 2016. – № 2. – С. 235–241. – DOI 10.17323/2072-8166.2016.2.235.241.
3. Сайт «Прогрессивные медицинские технологии 2019 года». – URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5cd56130a27d9900b324d676/progressivnye-medicinskie-tehnologii-2019-goda-ot-telemeditsiny-do-3dorganov-5cf7b1d195ea7300af21942a> (дата обращения: 26.10.2020).
4. Гусев, А. В. Тренды и прогнозы развития медицинских информационных систем в России / А. В. Гусев, М. А. Плисс, М. Б. Левин, Р. Э. Новицкий // Врач и информационные технологии. – 2019. – № 2. – С. 38–49.
5. Сайт «M-Health Congress». – URL: <https://mhealthcongress.ru/ru/article/nosimic-ustroystva-v-medsinsine-sovremennye-gadgeti-dlya-zdorovya-95183> (дата обращения: 26.10.2020).
6. Концепция создания государственной единой облачной платформы, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2019 г. № 1911-р.
7. Сайт TAdviser «Государственная единая облачная платформа ГЕОП». – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Гособлако_Государственная_единая_облачная_платформа_\(ГЕОП\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Гособлако_Государственная_единая_облачная_платформа_(ГЕОП)) (дата обращения: 26.10.2020).
8. Мартин, Дж. Организация баз данных в вычислительных системах / Дж. Мартин. – Москва : Мир, 1980. – 664 с.
9. Листопад, Н. И. Модели функционирования «облачной» компьютерной системы / Н. И. Листопад, Е. В. Олизарович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 3 (65). – С. 23–29.
10. Олифер, В. Г. 0-54 Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 944 с.
11. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – Москва : Вильямс, 2006. – 1408 с.
12. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – Москва : Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
13. Durfee, E. H. Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning. Distributed Artificial Intelligence: Vol. II / E. H. Durfee, V. Lesser ; ed. by L. Gasser, M. Huhns. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 1989. – P. 229–244.
14. Franklin, S. Artificial Minds / S. Franklin. – Cambridge, Mass. ; London : MIT press, 1995. – 449 p.
15. Патент 2486584 Российская Федерация. Способ построения иерархической системы сетевого взаимодействия виртуальных рабочих мест / Пильщиков Д. Е., Борисов В. В., Завьялов Г. Е., Дудиков А. М., Жосану А. М. – Заявл. 16.07.2013 ; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
16. Патент 2567271 РФ. Способ экспресс-оценки электрической стабильности сердца / Бодин О. Н., Иванчуков А. Г., Кривоногов Л. Ю., Петровский М. А., Рахматуллов Ф. К. – Заявл. 16.09.2011 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
17. Бодин, О. Н. Помехоустойчивая обработка электрокардиосигналов в системах неинвазивной кардиодиагностики / О. Н. Бодин, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, К. А. Ожикенов. – Алматы : Изд-во ЛЕМ, 2016.

References

1. Website «Telados. Health». Available at: <https://www.teladoc.com/> (accessed Oct. 26, 2020).
2. Zhuravlev M. S. *Pravo. Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki* [Law. Journal of the Higher school of Economics]. 2016, no. 2, pp. 235–241. DOI 10.17323/2072-8166.2016.2.235.241. [In Russian]

3. Sayt «Progressivnye meditsinskie tekhnologii 2019 goda» [Website "Progressive medical technologies 2019"]. Available at: <https://zen.yandex.ru/media/id/5cd56130a27d9900b324d676/progressivnye-medicinskie-tehnologii-2019-goda-ot-telemeditsiny-do-3dorganov-5cf7b1d195ea7300af21942a> (accessed Oct. 26, 2020). [In Russian]
4. Gusev A. V., Pliss M. A., Levin M. B., Novitskiy R. E. *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technology]. 2019, no. 2, pp. 38–49. [In Russian]
5. Website «M-Health Congress». Available at: <https://mhealthcongress.ru/ru/article/nosimie-ustroystva-v-meditsine-sovremennye-gadgeti-dlya-zdorovya-95183> (accessed Oct. 26, 2020).
6. *Kontseptsiya sozdaniya gosudarstvennoy edinoi oblachnoy platformy, utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 avgusta 2019 g. № 1911-r* [The concept of creating a state unified cloud platform, approved by decree of the Government of the Russian Federation No. 1911-R of August 28, 2019]. [In Russian]
7. Sayt TAdviser «Gosudarstvennaya edinaya oblachnaya platforma GEOP» [The website TAdviser "The national unified cloud platform HEAP"]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Gosoblako_Gosudarstvennaya_edinaya_oblachnaya_platforma_\(GEOP\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Gosoblako_Gosudarstvennaya_edinaya_oblachnaya_platforma_(GEOP)) (accessed Oct. 26, 2020). [In Russian]
8. Martin Dzh. *Organizatsiya baz dannykh v vychislitel'nykh sistemakh* [Organization of databases in computing systems]. Moscow: Mir, 1980, 664 p. [In Russian]
9. Listopad N. I., Olizarovich E. V. *Doklady BGUIR* [BSUIR reports]. 2012, no. 3 (65), pp. 23–29. [In Russian]
10. Olifer V. G., Olifer N. A. *0-54 Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: uchebnik dlya vuzov* [Computer network. Principles, technologies, protocols: textbook for universities]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2010, 944 p. [In Russian]
11. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod: per. s angl.* [Artificial intelligence: a modern approach]. Moscow: Vil'yams, 2006, 1408 p. [In Russian]
12. Tarasov V. B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p. [In Russian]
13. Durfee E. H., Lesser V. *Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning. Distributed Artificial Intelligence: Vol. II.*; ed. by L. Gasser, M. Hunhs. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1989, pp. 229–244.
14. Franklin S. *Artificial Minds*. Cambridge, Mass.; London: MIT press, 1995, 449 p.
15. Patent 2486584 Russian Federation. *Sposob postroeniya ierarkhicheskoy sistemy setevogo vzaimodeystviya virtual'nykh rabochikh mest* [Patent 2486584 Russian Federation. Method for building a hierarchical network interaction system for virtual workstations]. Pil'shchikov D. E., Borisov V. V., Zav'yalov G. E., Dudakov A. M., Zhosanu A. M.; appl. 16.07.2013; publ. 27.06.2013, bull. № 18. [In Russian]
16. Patent 2567271 Russian Federation. *Sposob ekspress-otsenki elektricheskoy stabil'nosti serdtsa* [Patent 2567271 of the Russian Federation. Method for rapid assessment of electrical stability of the heart]. Bodin O. N., Ivanchukov A. G., Krivonogov L. Yu., Petrovskiy M. A., Rakhmatullov F. K.; appl. 16.09.2011; publ. 10.04.2015, bull. № 10. [In Russian]
17. Bodin O. N., Krivonogov L. Yu., Lomtev E. A., Ozhikenov K. A. *Pomekhoustoychivaya obrabotka elektrokardiosignalov v sistemakh neinvazivnoy kardiadiagnostiki* [Noise-resistant processing of electrocardiosignals in non-invasive cardiodiagnostics systems]. Almaty: Izd-vo LEM, 2016. [In Russian]

Безбородова Оксана Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Bezborodova Oksana Evgen'evna

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

Бодин Олег Николаевич

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolayevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering fundamentals,
National Research University «MPEI»
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Чувькин Борис Викторович

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

Chuvykin Boris Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Безбородова, О. Е. Современные информационные технологии в медицинских информационных системах / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, Б. В. Чувькин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 73–83. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-9.

*А. Н. Спиркин***БИОНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННЫМ МЕХАНИЗМОМ***A. N. Spirkin***BIONIC METHODS OF CONTROL
OF A ROBOTIC MECHANISM**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются роботизированные мобильные механизмы. Предметом исследования являются бионические методы управления. Целью исследования является разработка архитектуры и алгоритмического обеспечения системы управления с использованием бионического подхода для автономного выполнения поставленных задач. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач в работе использовались методы распознавания команд, отдаваемых инвалидом, с привлечением аппарата искусственного интеллекта. **Результаты.** Предложена структура и алгоритм работы роботизированной инвалидной коляски, оперативное управление которой осуществляется бортовым компьютером, а роль оператора сводится к постановке цели передвижения. **Выводы.** Использование предложенных подходов к построению систем управления роботизированными механизмами могут найти применение не только при создании реабилитационной техники, но и при разработке и проектировании мобильных интеллектуальных роботов, создаваемых для работы в условиях быстро меняющейся динамичной и опасной для жизни человека среды.

A b s t a r c t. Background. The subject of research is bionic control methods. The aim of the study is to develop the architecture and algorithmic support of the control system using a bionic approach for the autonomous performance of the assigned tasks. **Materials and methods.** To solve the set tasks, the work used methods of recognizing commands given by a disabled person, with the involvement of an artificial intelligence apparatus. **Results.** The structure and algorithm of operation of a robotic wheelchair are proposed, the operational control of which is carried out by an onboard computer, and the role of the operator is reduced to setting the goal of movement. **Conclusions.** The use of the proposed approaches to the construction of control systems for robotic mechanisms can find application not only in the creation of rehabilitation equipment, but also in the development and design of mobile intelligent robots created to work in a rapidly changing dynamic and life-threatening environment.

К л ю ч е в ы е с л о в а: двигательная активность, инвалидная коляска, человеко-машинный интерфейс, датчики, реабилитация, роботизированные устройства.

Key words: physical activity, wheelchair, human-machine interface, sensors, rehabilitation, robotic devices.

Введение

В настоящее время роботизированные механизмы активно используются во всех сферах деятельности человека. С одной стороны, данная тенденция продиктована стремительным скачком в развитии компьютерной и микропроцессорной техники. С другой стороны, стремление всего мирового сообщества к рыночной модели экономических отношений привело

к расширению области применения робототехнических систем, вплоть до детских игрушек. Таким образом, можно сказать, что роботы все чаще входят в нашу повседневную жизнь, как в качестве бытовых систем, так и в качестве комплексов, от которых, порой, зависит наша жизнь и здоровье.

Большинство существующих роботизированных механизмов являются мобильными, т.е. имеют автономную систему навигации и передвижения в заранее неопределенной среде. В настоящее время, как правило, управление роботом осуществляет человек-оператор, при этом от человека требуется непрерывное наблюдение за действиями робота и оперативное управление ими. Сложный процесс управления в сочетании с характером работ, требующих повышенного внимания и осторожности, приводит к быстрой утомляемости оператора и вероятности принятия ошибочных действий. Указанных недостатков можно избежать, если управление со стороны оператора будет проводиться не на уровне движений, а на уровне постановки цели. Перспективными методами, позволяющими повысить точность управления роботизированными механизмами, являются бионические методы управления.

Целью данной статьи является разработка системы управления мобильным роботизированным механизмом с использованием бионического подхода.

Материалы и методы

Бионикой называют прикладную науку о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы [1]. Бионический подход заключается в изучении и использовании опыта живой природы при создании технических систем. Известно, что живые организмы качественнее решают задачи распознавания сложных объектов в реальном времени, чем технические системы обработки сенсорной информации; мышцы животных имеют существенно лучшие массогабаритные характеристики, чем современные приводы.

Однако если на первых порах развития робототехники и жесткой автоматизации была иллюзия возможности в перспективе полного устранения человека из мира машин, то с переходом к гибкой комплексной автоматизации и роботизации стало очевидно, что реализация наиболее сложных функций управления невозможна без приложения разума человека и его интуиции. Так, в современной робототехнике сформировался принцип симбиоза, оптимального сочетания человека и техники. Очевидно, что эффективность применения роботов будет во многом определяться возможностями средств человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) по оперативной постановке решаемых прикладных задач и контролю их выполнения оператором [2].

Человеко-машинный интерфейс – это набор технических средств, предназначенных для обеспечения двустороннего взаимодействия между оператором и оборудованием, с помощью которого осуществляется управление роботом и контролируется его функционирование. ЧМИ может включать в себя речевое взаимодействие (голосовые команды, голосовое оповещение), управление жестами, управление с помощью биологических сигналов самого оператора. При создании ЧМИ важную роль играет необходимость разработки интуитивной системы управления, чтобы оператору было легко понять то, о чем ему сообщает система. Рассмотрим наиболее распространенные в робототехнике ЧМИ.

Речь – это естественный интерфейс управления для любого, даже неподготовленного человека. Основу любого речевого интерфейса составляет система автоматического распознавания речи (АРР), преобразующая входную речь (речевой сигнал) в распознанное сообщение [3]. Система АРР почти полностью определяет качество работы речевого интерфейса, которое, прежде всего, зависит от точности распознавания слов пользователя. Система АРР может работать в двух режимах: дикторозависимом и дикторонезависимом. В дикторозависимом режиме производится настройка системы на определенного диктора, и предполагается, что будут распознаваться слова, произнесенные только этим диктором. В дикторонезависимом режиме такая настройка не требуется, и система должна в идеале «понимать» любого диктора. Последний режим, очевидно, удобнее в использовании, но точность распознавания в нем всегда меньше, чем в первом. Речевой интерфейс достаточно широко используется в системе умного дома [4]. К его недостаткам при управлении роботизированным механизмом следует отнести уязвимость к посторонним шумам и необходимость четкого произношения речевой команды, что не всегда возможно.

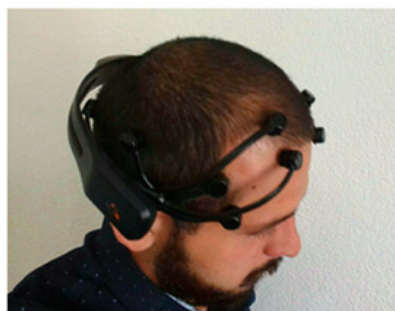
Существуют разработки [5], использующие для управления роботизированным механизмом взгляд. Этот подход удобен для тех, кому недоступно голосовое управление из-за

нарушения моторных функций, например, у полностью парализованных людей. Типы входных сигналов для управления взглядом могут быть различными. Движение взгляда может быть аналогично движению джойстика, иногда оператору достаточно сосредоточить свой взгляд на ту область пространства, куда бы он захотел переместиться. В последнем случае система сама выстраивает траекторию движения. Известны работы по созданию систем управления инвалидной коляской с помощью жестов [6], тогда в систему управления вводят блок поиска и распознавания движения (как правило, руки). Принцип работы системы управления с помощью жестов заключается в распознавании движений рук и выработке управляющей команды, заставляющей устройство двигаться в соответствии с распознанным направлением. Однако данный способ мало пригоден для людей с нарушением моторных функций.

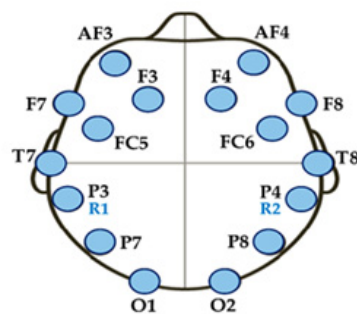
В настоящее время во всем мире активно развиваются технологии использования сигналов мозговой активности [2]. Преимуществом этих технологий является то, что зарегистрировать мозговую активность путем снятия электрических сигналов с коры головного мозга можно у любого, даже полностью парализованного пациента. Данный ЧМИ получил название нейроинтерфейс или интерфейс мозг – компьютер (ИМК). Сигналы мозговой активности человека можно зарегистрировать различными способами, такими как электроэнцефалография (регистрируется электрическая активность мозга), магнитоэнцефалография (измеряются магнитные поля, возникающие в результате активности головного мозга), электрокортикография (сигнал снимается напрямую с коры головного мозга, является инвазивным методом), оптоэлектронными способами путем исследования распределения и интенсивности кровотока в головном мозге и т.д. Чаще всего используется электроэнцефалография (ЭЭГ). ЭЭГ – метод исследования головного мозга, основанный на регистрации его электрических потенциалов электродами, расположенными непосредственно на поверхности скальпа. Принцип работы ИМК заключается в следующем: на испытуемого надевается шлем с электродами, которые подключаются к устройству, фиксирующему поступающие из мозга сигналы. При намерении совершить какое-либо действие у пользователя повышается электрическая активность соответствующих зон головного мозга. Эти сигналы регистрируются, усиливаются, оцифровываются и в виде цифровых данных поступают в компьютер, где производится вычисление признаков сигнала (паттерны), характерных для того или иного мысленного движения. В качестве примера ИМК можно привести Emotiv EPOC (рис. 1), разработка австралийской компании Emotiv Systems [7].



а)



б)



в)

Рис. 1. Интерфейс «мозг – компьютер»:

а – внешний вид устройства; б – расположение на операторе;

в – схема расположения электродов для регистрации ЭЭГ-сигналов

Вначале человек проходит тренировку – ему предъявляются различные изображения, прибор фиксирует, какие участки мозга активизируются, а программное обеспечение запоминает схему активности мозга. Следующий этап – распознавание мысленных образов: человек вообразает картинку, а компьютер на основе запомненной схемы угадывает, о чем он думает. Далее набор признаков классифицируется по типам, и компьютер вырабатывает команду, управляющую исполнительным устройством. Пользователь в режиме реального времени наблюдает за реакцией системы на свое мысленное действие. У ИМК, несмотря на ряд преимуществ, есть достаточно много недостатков. К их числу следует отнести следующие. ЭЭГ-сигналы имеют небольшую амплитуду, при этом на полезный сигнал могут накладываться шумы, амплитуда которых может существенно превышать сам ЭЭГ-сигнал. Необходимо принимать во внимание тот факт, что амплитудные характеристики ЭЭГ-сигналов могут иметь различные значения у разных людей. Также необходимо принимать во внимание тот факт, что если электроды и усилитель биопотенциалов находятся на значительном расстоянии друг от друга, то велика вероятность появления в полезном сигнале шумов, связанных с наводкой на соединительные провода. В настоящее время доля ошибочных считываний при использовании ИМК может достигать до 50 %, требуется время для распознавания сигнала, которое на сегодня не превышает единиц секунд, что неприемлемо для практического применения. Однако с ростом вычислительных возможностей аппаратной части инвалидной коляски и использованием искусственных нейронных сетей ИМК на сегодня является самой перспективной технологией в реабилитационной технике [2, 8].

Одной из основных задач, решаемых системой управления роботизированным механизмом, является обработка информации о состоянии среды функционирования. Такая обработка должна происходить в реальном масштабе времени с целью оперативного определения местоположения целевых объектов, препятствий и свободных для перемещения путей в условиях динамически изменяющейся внешней среды [9]. Высокая сложность и, как следствие, ресурсоемкость решающих данную задачу программных алгоритмов накладывает ряд повышенных требований к вычислительным ресурсам. В первую очередь, эти требования касаются производительности, которая должна быть достаточно высокой. Однако повышение производительности, как известно, ведет к увеличению массогабаритных параметров и параметров энергопотребления вычислительных устройств. Один из возможных путей решения данной задачи состоит в разработке и применении нейросетевых методов обработки информации. Их использование в системах управления роботизированными механизмами позволяет не только оперативно решать задачи автоматического принятия решений о целесообразном поведении роботов в динамически изменяющемся мире, но и эффективно реализовать бионические модели восприятия и обработки сенсорной информации об окружающей среде.

Известны примеры [9, 10] применения нейронных сетей для управления движением мобильных роботов. Робот может учиться с учителем, либо показывающим ему, когда это необходимо, как действовать в определенной ситуации (например, при наличии впереди некоторого препятствия), либо задающим последовательность действий для достижения цели (в частности, при обходе препятствий).

Бионическая система управления

В последнее время одной из актуальных областей применения роботизированных механизмов является разработка средств ухода за престарелыми и недееспособными людьми. Автомат предлагается бионическая система управления роботизированным механизмом, на примере инвалидной коляски, структурная схема системы управления которой приведена на рис. 2. В системе используются три канала связи оператора с бортовым компьютером: регистрация ЭЭГ-сигналов, управление жестами (или мимикой лица), голосовое управление (рис. 2).

Система управления состоит из двух уровней. Первый уровень – это подсистема управления собственно инвалидной коляской, включающая в себя дальнометры (датчики переднего и заднего обзора), датчик усилия, датчик наклона, управление которыми осуществляется бортовым компьютером коляски, который координирует движение коляски и осуществляет контроль за положением оператора. Наличие в коляске датчиков угла наклона, датчиков обзора переднего и заднего вида, датчиков усилия позволяет бортовому компьютеру определить положение коляски в пространстве, т.е. датчики играют роль сенсорных рецепторов, что и поз-

воляет инвалидной коляске выполнять определенную последовательность операций – движение, спуск/подъем, поворот автоматически, без дополнительных команд от оператора. Бортовой компьютер может в любой момент заблокировать движение, чтобы избежать столкновения. Сиденье пассажира установлено на подвижной платформе, его можно наклонить вперед или назад, выбрав удобное положение. Во время преодоления препятствия бортовой компьютер коляски следит за отклонением сиденья от горизонтальной плоскости с помощью датчика наклона, установленного на раме коляски. Как только сиденье отклонится от безопасного положения, бортовой компьютер подает сигнал линейному приводу, который плавно доводит сиденье до горизонтального положения. Верхний уровень системы представляют три вида ЧМИ, информация с которых поступает в контроллер оператора и далее в бортовой компьютер.

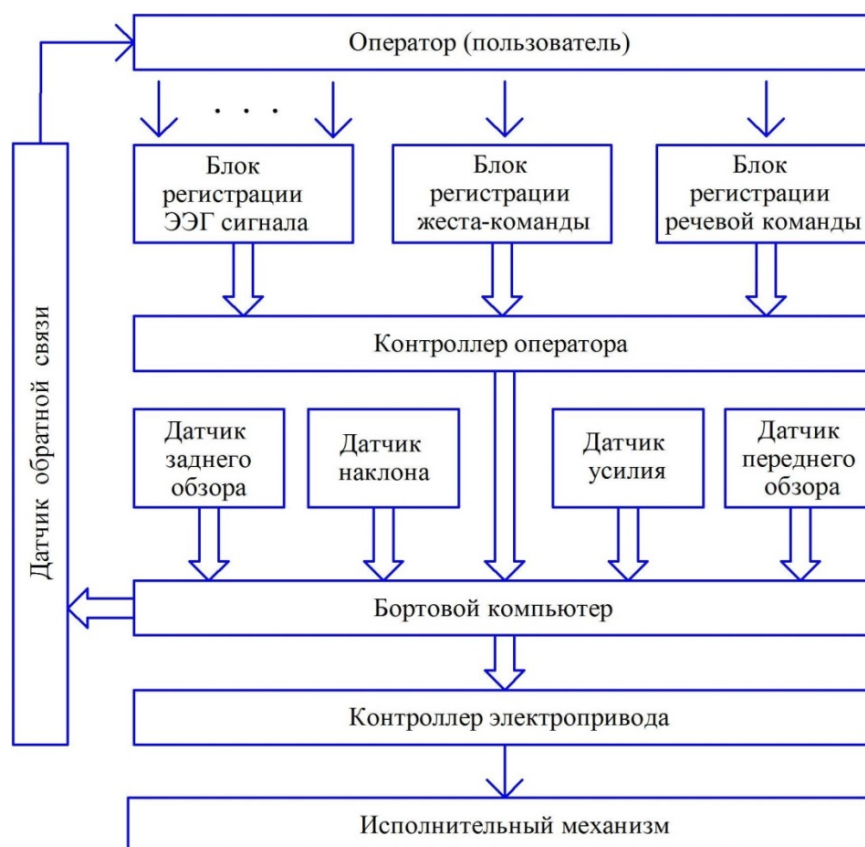


Рис. 2. Бионическая система управления роботизированным механизмом

Стандартный режим работы системы предполагает получение от оператора высокоуровневых команд, т.е. постановку целей, однако возможно и оперативное управление движением коляски напрямую с помощью активации бортового компьютера посредством датчика обратной связи. В качестве датчика обратной связи могут использоваться датчики вибротактильной коммуникации, установленные непосредственно на операторе. Кроме того, в качестве обратной связи могут использоваться голосовые сообщения от контроллера оператора, содержащие информацию о невозможности выполнить команду или просьбу уточнения команды. В структуре системы управления реализуется возможность учета особенностей заболевания конкретного пациента и разработан механизм принятия решений, основанный на анализе информации со всех каналов контроля.

Наиболее подробно алгоритм работы системы управления роботизированным механизмом представлен на рис. 3.

Система управления инвалидной коляской работает в двух режимах: в режиме обучения и в режиме управления. Для того, чтобы пациент мог управлять инвалидной коляской, должна быть проведена настройка параметров блока управления коляски под индивидуальные параметры пациента, т.е. блок управления должен пройти режим обучения. В этом режиме происходит следующее.

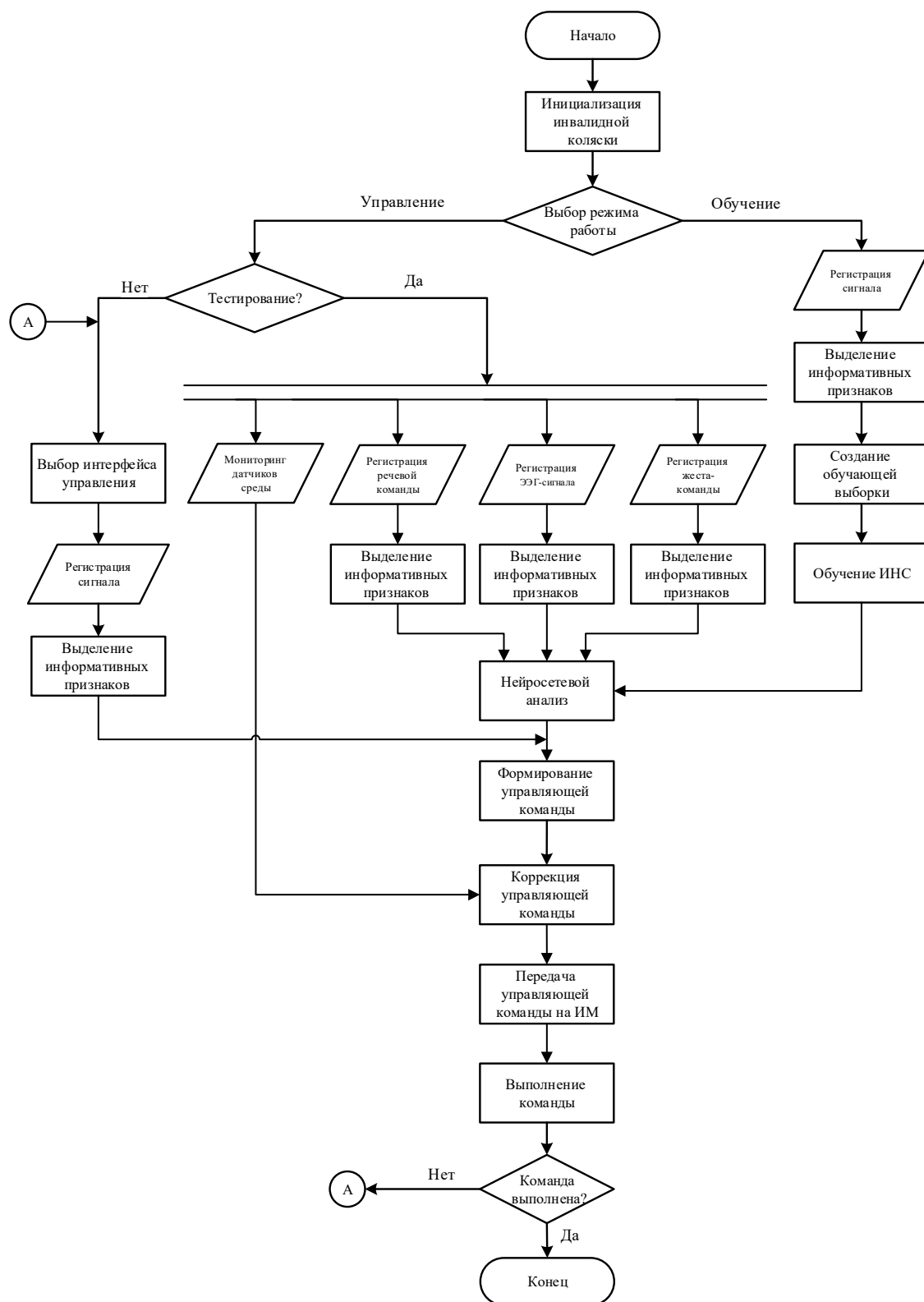


Рис. 3. Алгоритм работы бионической системы управления

При использовании инвалидом интерфейса «мозг – компьютер» производится регистрация ЭЭГ-сигналов пользователя, при этом оператор сидит спокойно и не думает о каком-либо движении, затем на экране дисплея появляется изображение для совершения определенного движения, пользователь мысленно представляет указанное движение. Система производит выделение ЭЭГ-паттернов, которые будут использованы в качестве обучающей выборки, т.е. в начале система регистрировала ЭЭГ-сигналы при состоянии покоя, затем, при появлении

на экране изображения движения, которое выступало в роли стимулирующего воздействия на нейрон для получения одиночного импульса, производилось регистрирование изменения ЭЭГ-сигнала, которое являлось ответной реакцией на раздражение и классифицировался как ЭЭГ-паттерн.

При использовании речевого интерфейса регистрация голосовой команды осуществляется с помощью микрофона. При этом оператор также видит на экране слово, которое соответствует выполнению определенной команды, и произносит это слово. Зарегистрированный сигнал подвергается фильтрации и выделения формант, по параметрам которых формируется обучающая выборка.

Работа системы видеозахвата движений аналогична вышеописанным режимам: оператор осуществляет движение рукой (или изменением мимики лица), контроллер оператора с помощью портативной видеокамеры осуществляет видеозахват движения, далее производится формирование обучающей выборки.

На основании созданной обучающей выборки производится обучение искусственной нейронной сети. После этого система проводит нейросетевой анализ, для выявления и распознавания в зарегистрированном управляющем сигнале мысленного движения. Каждому мысленному движению соответствует код, который также присвоен изображению (слову), выводимому на дисплей. При правильно распознанном движении система управления коляской переходит в тестовый режим управления. Распознанное движение, а конкретнее код, которому соответствует это движение, передается в бортовой компьютер, при этом в бортовой компьютер также поступает информация с датчиков, т.е. скорость и наклон инвалидной коляски, и расстояние до ближайшего препятствия. На основании полученной информации происходит формирование и коррекция управляющей команды, которая подается на исполнительный механизм.

Если команда не выполнена, то пользователь может выбрать конкретный интерфейс управления. Выбор интерфейса управления основывается на виде управляющего/входного сигнала. После чего алгоритм системы управления повторяется с момента регистрации конкретного управляющего сигнала до получения управляющей команды. Если команда исполнительным механизмом выполнена, то система начинает формировать следующую управляющую команду.

Результаты

Использование трех видов ЧМИ повышает точность управления и отзывчивость системы. Например, кресло движется вперед или назад, считывая сигналы коры головного мозга, а поворачивает по жесту руки. У всех трех способов управления равнозначное значение, и они связаны между собой, ни у одного из них нет приоритета. В случае, если поступает противоречивый сигнал, система сама решает, какая команда соответствует намерению пользователя. Впоследствии операционная система контроллера оператора сможет в режиме реального времени следить за психофизическим состоянием пользователя и в момент подачи команды понимать характер эмоций: позитивный, негативный или нейтральный. Если распоряжение отдано в плохом настроении, контроллер оператора понизит степень доверия сигналу, вплоть до полной его блокировки.

Таким образом, делегирование функций управления бортовому компьютеру не только позволит повысить надежность и безопасность движения, но и значительно уменьшит время на распознавание команды.

Заключение

Предлагаемые подходы к построению систем управления роботизированными механизмами могут найти применение не только при создании реабилитационной техники, но и при разработке и проектировании мобильных интеллектуальных роботов, создаваемых для работы в условиях быстро меняющейся динамичной и опасной для жизни человека среды.

Библиографический список

1. Ахутин, В. М. Бионические аспекты синтеза биотехнических систем / В. М. Ахутин. – Москва : Сов.радио, 2016. – 158 с.

2. Бодин, О. Н. Нейроинтерфейс для управления роботизированными устройствами / О. Н. Бодин, Г. А. Солодимова, А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 70–76.
3. Агашин, О. С. Методы цифровой обработки речевого сигнала в задаче распознавания изолированных слов с применением сигнальных процессов / О. С. Агашин, О. Н. Корелин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2012. – № 4. – С. 97.
4. Потапова, Р. К. Речевое управление роботом. Лингвистика и современные автоматизированные системы / Р. К. Потапова. – Москва : СИНТЕГ, 2012. – 328 с.
5. Воротников, С. А. Информационные устройства робототехнических систем : учеб. пособие / С. А. Воротников. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.
6. Нагапетян, В. Э. Бесконтактное управление роботизированной рукой посредством жестов человека / В. Э. Нагапетян, И. Л. Толмачев // Журнал вестник РУДН. Сер.: Математика, информатика, физика. – 2014. – № 2. – С. 157–163.
7. Австралийская компания Emotiv Systems. – URL: <https://www.emotiv.com>
8. Мокиенко, О. А. Воображение движения и его практическое применение / О. А. Мокиенко, Л. А. Черникова, А. А. Фролов, П. Д. Бобров // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2013. – № 63 (2). – С. 195–204.
9. Бройнль, Т. Встраиваемые робототехнические системы. Проектирование и применение мобильных роботов со встроенными системами управления / Т. Бройнль. – Москва : РГГУ, 2012. – 520 с.
10. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : Телетех, 2004. – 369 с.

References

1. Akhutin V. M. *Bionicheskie aspekty sinteza biotekhnicheskikh sistem* [Bionic aspects of the synthesis of bioengineering systems]. Moscow: Sov.radio, 2016, 158 p. [In Russian]
2. Bodin O. N., Solodimova G. A., Spirkin A. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 4 (30), pp. 70–76. [In Russian]
3. Agashin O. S., Korelin O. N. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev]. 2012, no. 4, p. 97. [In Russian]
4. Potapova R. K. *Rechivoie upravlenie robotom. Lingvistika i sovremennye avtomatizirovannye sistemy* [Speech control of the robot. Linguistics and modern automated systems]. Moscow: SINTEG, 2012, 328 p. [In Russian]
5. Vorotnikov S. A. *Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Information devices for robotic systems: tutorial]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2005, 384 p. [In Russian]
6. Nagapetyan V. E., Tolmachev I. L. *Zhurnal vestnik RUDN. Ser.: matematika, informatika, fizika* [Journal Vestnik RUDN. Ser.: mathematics, computer science, physics]. 2014, no. 2, pp. 157–163. [In Russian]
7. *Australian company Emotiv Systems* [Australian company Emotiv Systems]. Available at: <https://www.emotiv.com>
8. Mokienko O. A., Chernikova L. A., Frolov A. A., Bobrov P. D. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I. P. Pavlova* [Journal of higher nervous activity named after I. P. Pavlov]. 2013, no. 63 (2), pp. 195–204. [In Russian]
9. Broynl' T. *Vstraivaemye robototekhnicheskie sistemy. Proektirovanie i primeneniye mobil'nykh robotov so vstroennymi sistemami upravleniya* [Embedded robotic systems. Design and application of mobile robots with integrated control systems]. Moscow: RGGU, 2012, 520 p. [In Russian]
10. Bodyanskiy E. V. *Iskusstvennye neyronnye seti: arkhitektury, obuchenie, primeneniya* [Artificial neural networks: architectures, training, applications]. Kharkov: Teletekh, 2004, 369 p. [In Russian]

Спиркин Андрей Николаевич

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Spirkin.andre@yandex.ru

Spirkin Andrey Nikolaevich

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Спиркин, А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом / А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 84–91. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-10.

В. В. Антипенко, В. Н. Кульков, Е. А. Печерская, С. А. Антипенко

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЭФФЕКТА ТРАНСМУРАЛЬНОСТИ

V. V. Antipenko, V. N. Kulkov, E. A. Pecherskaya, S. A. Antipenko

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM TO DETERMINE ACHIEVING THE EFFECT OF TRANSMURALITY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Основные способы определения достижения эффекта трансмуральности биологической ткани заключаются в измерении температуры в области воздействия электродов и импеданса между электродами. Указанные способы обладают существенными недостатками, связанными с некачественным прогревом ткани. Целью работы является разработка алгоритма определения достижения эффекта трансмуральности, который позволяет достичь качественного прогрева внутренних слоев ткани и определить эффект достижения трансмуральности за более короткое время. **Материалы и методы.** В данной работе проведен ряд экспериментов, доказывающих, что эффективность воздействия на аблируемую ткань и качество полученного результата зависят от правильного выбора мощности, приложенной к обрабатываемой биологической ткани. **Результаты.** На основании проведенных экспериментов разработан алгоритм функционирования системы для определения достижения эффекта трансмуральности, способный контролировать дополнительные параметры. В том числе осуществляются контроль и регулирование скорости нагрева ткани, производится оценка объема обрабатываемой ткани, расчет необходимого количества энергии для нагрева определенного объема ткани, контроль соответствия реально израсходованного количества энергии расчетному. **Выводы.** Разработанный алгоритм позволяет получить качественный прогрев внутренних слоев ткани и определить эффект достижения трансмуральности за более короткое время, что чрезвычайно важно при проведении операций с применением искусственного кровообращения. Полученные результаты дают возможность с более высокой достоверностью идентифицировать момент и факт наступления трансмурального поражения миокарда.

A b s t r a c t. Background. The main methods for determining the achievement of the effect of transmural of biological tissue are to measure the temperature in the area of exposure to the electrodes and the impedance between the electrodes. These methods have significant drawbacks associated with poor quality heating of the fabric. The aim of this work is to develop an algorithm for determining the achievement of the effect of transmural, which allows to achieve high-quality heating of the inner layers of tissue and to determine the effect of achieving transmural in a shorter time. **Materials and methods.** In this work, a number of experiments have been carried out, proving that the effectiveness of the effect on the ablated tissue and the quality of the result obtained depend on the correct choice of power applied to the treated biological tissue. **Results.** On the basis of the experiments, an algorithm for the functioning of the system was developed to determine the achievement of the transmural effect, capable of controlling additional parameters. In particular, the control and regulation of the rate of tissue heating is carried out, the volume of the processed tissue is estimated, the required

amount of energy for heating a certain volume of tissue is calculated, and the compliance of the actually consumed amount of energy with the calculated one is monitored. **Conclusions.** The developed algorithm allows you to obtain high-quality heating of the inner layers of tissue and determine the effect of achieving transmural in a shorter time, which is extremely important when performing operations using artificial circulation. The obtained results allow to identify the moment and fact of transmural myocardial lesion with higher reliability.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трансмуральность, электрод, импеданс ткани, метод радиочастотной абляции.

Key words: transmural in, electrode, tissue impedance, radiofrequency ablation method.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти во всем мире. По данным исследователей, в Российской Федерации смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в 8 раз выше, чем в странах Европейского союза, и составляет примерно 58 % в общей структуре причин смертности. Ежегодно от заболеваний сердца в нашей стране умирает более 1,2 млн человек.

Метод радиочастотной абляции (РЧА) – это способ инвазивного лечения расстройств сердечного ритма. В настоящее время его применяют при лечении врожденных и приобретенных пороков сердца, ишемической болезни сердца, осложненной аритмиями, а также при изолированных формах аритмии, в частности, при фибрилляции предсердий. Помимо этого, РЧА необходимо применять в ряде случаев при проведении операций аортокоронарного шунтирования. По оценкам специалистов в РФ потребность применения метода РЧА составляет не менее 10 000 в год.

Суть метода заключается в разрушении участков миокарда, через которые проводится патологическая импульсная активность. Деструкция осуществляется посредством подачи в определенные участки миокарда радиочастотной энергии от устройства с помощью специального инструмента, имеющего электрические контакты. В результате деструкции прекращается аномальное распространение импульсов, возбуждающих миокард, что позволяет поддерживать правильный сердечный ритм.

В Российской Федерации применение метода РЧА в настоящее время ограничено в первую очередь по экономическим соображениям. Аппаратура и расходный инструмент в РФ не производятся, цены иностранных производителей не позволяют применять метод во всех необходимых случаях.

Устройство и расходный инструмент, производимые иностранными компаниями, обладают существенными недостатками, вызывающими резкую и обоснованную критику кардиохирургов. К числу недостатков, в частности, следует отнести недостаточно достоверное определение наличия трансмурального поражения миокарда в процессе воздействия. Данный недостаток приводит как к излишней абляции ткани миокарда, в результате которой в ряде случаев наблюдается частичное механическое разрушение ткани, требующее дополнительных хирургических манипуляций по восстановлению целостности миокарда, так и к недостаточной абляции и, как следствие, возникновению новых рецидивов нарушения ритма [1].

Вышеизложенные факты подтверждают актуальность создания устройства и расходного инструмента, свободных от вышеперечисленных недостатков. В частности, требуется разработать и внедрить более совершенные методики воздействия и определения достижения эффекта трансмуральности.

Описание методик определения эффекта достижения трансмуральности

В результате анализа современных научных подходов к определению достижения эффекта трансмуральности биологической ткани установлено, что основные из них заключаются в измерении температуры в области воздействия электродов и импеданса между электродами.

Первый подход основан на измерении температуры ткани в области воздействия электродов. Достижение определенной температуры обрабатываемой ткани предлагается считать достижением эффекта трансмуральности. Данный подход обладает рядом недостатков: усложнение конструкции инструмента, что связано с необходимостью дополнительного размещения датчиков температуры на инструменте и с погрешностью измерения, так как невоз-

можно измерить температуру во всем объеме ткани (датчики располагаются в некоторых точках). Для точного определения достижения трансмуральности необходимо обеспечить нагрев самой низкотемпературной области ткани выше необходимого порога. Поскольку априорно неизвестно, в каком участке ткани температура будет минимальной, то установление достижения трансмуральности может оказаться ошибочным.

Второй подход основан на измерении импеданса ткани в процессе воздействия и оценке параметров его изменения [5, 6]. Данный подход предполагает измерение импеданса ткани в процессе радиочастотного (РЧ) воздействия на ткань. Главным недостатком данного подхода и устройства является отсутствие контроля скорости изменения импеданса. Этот способ эффективен только при выборе оптимальной мощности генератора для объема ткани, зажатой между двумя парами электродов. В этом случае неравномерное выделение энергии в ткани компенсируется вследствие теплообмена между участками ткани с разной температурой. Если мощность генератора превышает необходимую для данного объема ткани, то происходит локальный перегрев ткани и повышение импеданса в области контакта с электродом. Импеданс ткани достигает порогового значения и выдается ложное сообщение о трансмуральности [2].

Существует способ управления устройством для абляции путем выбора значения приложенной мощности в зависимости от импеданса обрабатываемой ткани, который предусматривает следующий алгоритм:

- 1) размещение двух электродов устройства для абляции на поверхности ткани;
- 2) измерение импеданса ткани между электродами [7, 8];
- 3) подача питания на электроды на основе измеренного импеданса ткани путем:
 - 3.1) подачи на электроды постоянного сигнала, если измеренный импеданс ткани находится между первым пороговым импедансом и вторым пороговым импедансом, причем первый пороговый импеданс меньше второго порогового импеданса;
 - 3.2) подачи на электроды переменного сигнала, если измеренный импеданс ткани больше, чем второй пороговый импеданс, причем переменная мощность обратно пропорционально связана с импедансом ткани.

Существенным недостатком данного способа и устройства является то, что необходимо подать на инструмент разную постоянную мощность для разного объема ткани между двумя парами электродов. В свою очередь мощность зависит от импеданса ткани в текущий момент времени. Такие параметры, как толщина, ширина и структура, не являются постоянными. Биологический объем ткани может иметь один и тот же импеданс в зависимости от условий захвата ткани инструментом. Узкий и тонкий участок ткани и толстый, широкий могут иметь одинаковый импеданс, но мощность для абляции в каждом случае необходима разная.

В случае высокого значения мощности биологическая ткань поддается локальному перегреву и высушиванию в зоне контакта с электродом, что соответствует повышению импеданса и ложному выводу о полученной трансмуральности.

Низкое значение мощности приведет к увеличению времени абляции и, соответственно, к нежелательному прогреву ткани, расположенной близко к зоне абляции.

Однако известные на данный момент устройства и способы не решают в достаточной мере задачу контроля достижения полноты поражения (трансмуральности).

Таким образом, существует потребность введения дополнительных критериев для оценки достижения трансмуральности в процессе воздействия на биологические ткани радиочастотного биполярного электрохирургического инструмента (контроль скорости изменения импеданса и скорости изменения мощности, предварительное определение максимального уровня мощности, подсчет энергии, отданной в нагрузку и определение необходимой полной энергии, определение предела времени абляции на участке импеданса с постоянной скоростью) [3, 4].

Экспериментальные исследования

Известно, что при нагреве ткани, в зависимости от степени нагрева, ее импеданс изменяется по определенному закону. График изменения импеданса по времени в процессе нагрева ткани далее по тексту будем называть характерной кривой импеданса ткани.

Характерная кривая импеданса ткани состоит из трех основных участков:

- 1) снижение импеданса;
- 2) уровень импеданса достиг минимального значения, возможно, на протяжении некоторого времени постоянен или изменяется незначительно;
- 3) увеличение импеданса.

Задача исследования состоит в том, чтобы основываясь на данных об импедансе ткани и положении так называемой рабочей точки на характерной кривой импеданса ткани, сделать выводы о ходе процесса абляции и достижении трансмурального поражения ткани миокарда.

Задача создания трансмуральной зоны поражения миокарда заключается в необходимости за возможно более короткий период времени нагреть нужный (достаточно узкий) участок миокарда.

При анализе теоретических исследований [1–4] установлено, что после прохождения плоского участка характерной кривой импеданса ткани и достижения участка роста импеданса существует определенный порог импеданса, достижение которого может свидетельствовать о достижении трансмуральности.

Вышеуказанный порог импеданса носит индивидуальный характер и для каждой конкретной ситуации он уникален. Требуется разработать методику, позволяющую идентифицировать достижение трансмуральности для разных ситуаций, связанных с наличием разной толщины стенок миокарда.

Авторами проведены экспериментальные исследования на биологической ткани. Во время проведения эксперимента на разные участки ткани (толщиной до 10 мм) подавалась отличная друг от друга постоянная мощность.

В первом эксперименте (рис. 1) при подаче мощности 25 Вт, т.е. выше оптимальной, происходит быстрый нагрев поверхностных слоев ткани и недостаточный нагрев внутренних слоев. Общая картина импеданса участка ткани будет складываться из суммы импедансов поверхностных слоев и внутренних слоев. При этом состояние поверхностных слоев ткани будет соответствовать третьему участку характерной кривой импеданса ткани, соответствующему высокому импедансу. Состояние внутренних слоев будет соответствовать второму участку характерной кривой импеданса ткани, соответствующему низкому импедансу. В данном случае общий импеданс складывается из импеданса внутреннего и поверхностного слоя ткани и будет указывать на достижение трансмуральности при отсутствии такового.

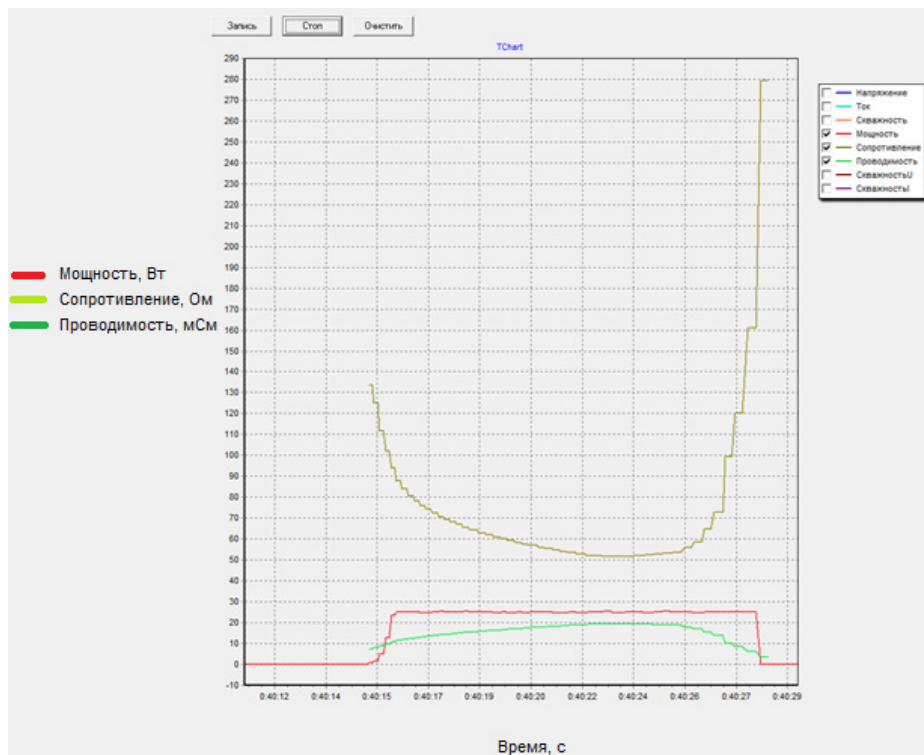


Рис. 1. График зависимости импеданса биологической ткани при РЧ воздействии мощностью 25 Вт

На графике виден лавинообразный рост импеданса, в теории соответствующий достижению трансмуральности. Время воздействия составило порядка 12 с. Скорость падения импеданса на «первом участке» составляет 8,8 % в секунду. Скорость роста импеданса на «третьем участке» составляет 66 % в секунду. При этом рис. 2 показывает, что трансмуральность не достигнута, произошел перегрев поверхностных слоев, и что внутренние слои полностью не затронуты.



Рис. 2. Иллюстрация первого эксперимента

В втором эксперименте (рис. 3), при подаче мощности 10 Вт, т.е. ниже оптимальной, прогрев ткани происходит равномерно. Однако за счет увеличенного времени воздействия и теплопроводности ткани более существенная часть выделяемой тепловой энергии затрачивается на нагрев тех участков ткани, которые непосредственно прилегают к месту воздействия. Это приводит к дополнительному увеличению времени воздействия и расширению зоны поражения. Расширение зоны поражения и увеличение времени воздействия являются крайне нежелательными эффектами. Скорость падения импеданса на «первом участке» составляет 1,6 % в секунду. Скорость роста импеданса на «третьем участке» составляет 3,2 % в секунду. Время воздействия до достижения трансмуральности составило 105 с.

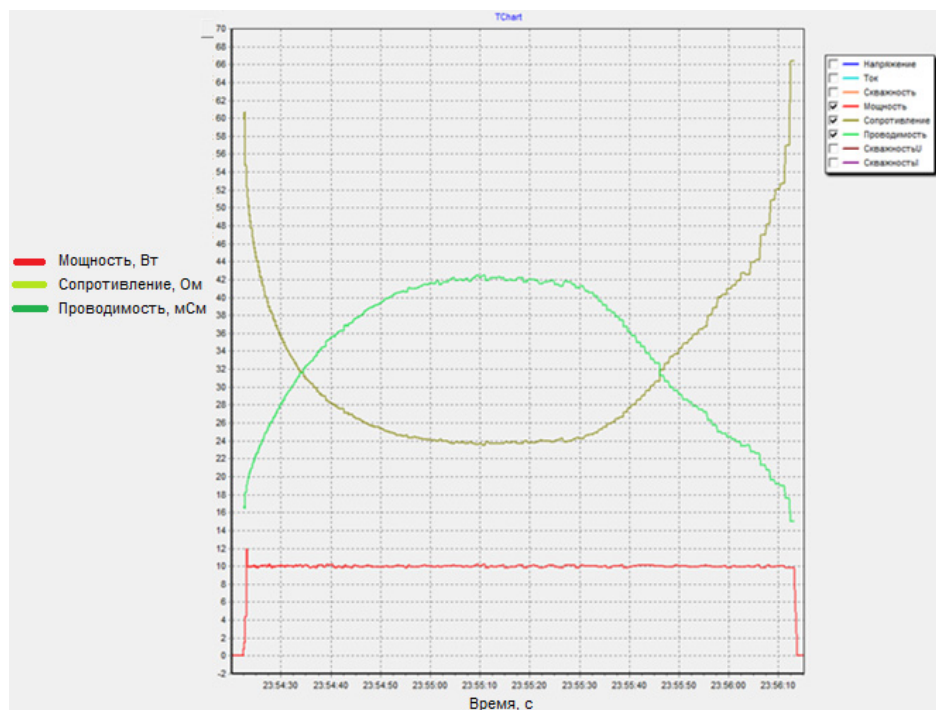


Рис. 3. График зависимости импеданса биологической ткани при РЧ воздействии мощностью 10 Вт

На рис. 4 визуально хорошо просматривается «побеление» участка ткани между контактами зажима, что свидетельствует о коагуляции ткани по всей толщине, что указывает на трансмуральное повреждение. При этом зона коагуляции значительно шире проекции зажима на ткань, с распространением в боковых направлениях частичной коагуляции, которая выглядит визуально как менее выраженное «побеление» ткани.



Рис. 4. Иллюстрация второго эксперимента

Задача поиска оптимальной мощности воздействия сводится к определению той мощности, которая обеспечит трансмуральное поражение ткани за кратчайший период времени, минимально нагревая прилегающие слои тканей.

Предыдущие эксперименты показали, что оптимальным является уровень мощности, который обеспечит падение импеданса на первом участке характерной кривой импеданса ткани со средней скоростью 5 % в секунду. На третьем участке характерной кривой импеданса ткани рост импеданса происходит со скоростью 10 % в секунду, при этом о достижении трансмуральности свидетельствует уровень импеданса, соответствующий значению

$$Z = (Z_{\text{нач}} + Z_{\text{мин}}) \cdot 0,6 \text{ Ом},$$

где $Z_{\text{нач}}$ – импеданс ткани на момент начала воздействия; $Z_{\text{мин}}$ – минимальный импеданс ткани, находящийся на участке «плато» характерной кривой импеданса ткани.

В третьем эксперименте (рис. 5), при подаче оптимальной мощности 20 Вт, скорость падения импеданса на первом участке составляет 7 % в секунду, а скорость роста импеданса на третьем участке достигает 15 % в секунду. Время воздействия до достижения трансмуральности составляет 17 с. Данный уровень мощности применительно к исследуемому образцу ткани обеспечил близкие к требуемым значениям скорости изменения импеданса на соответствующих участках характерной кривой импеданса ткани.

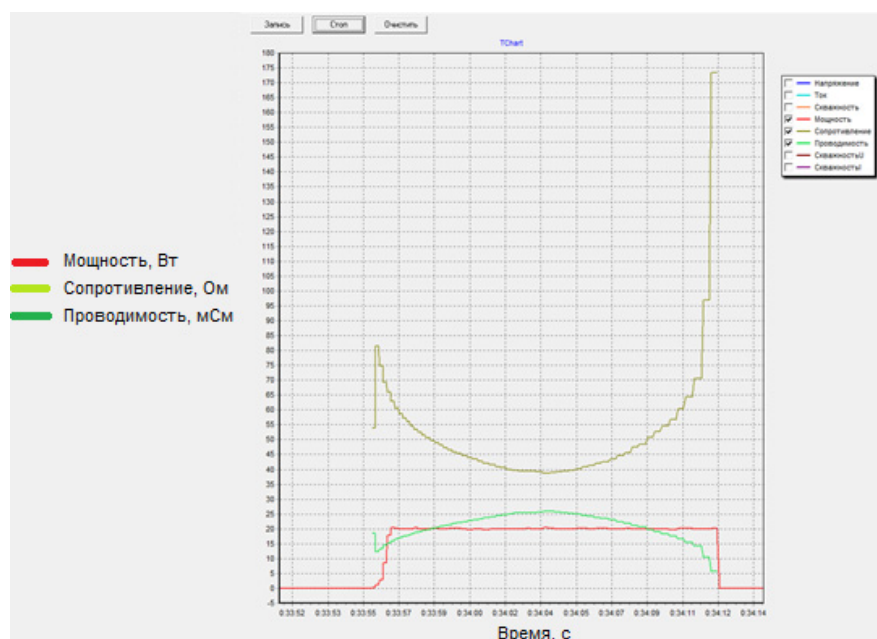


Рис. 5. График зависимости импеданса биологической ткани при РЧ воздействии мощностью 20 Вт

На рис. 6 визуально хорошо просматривается «побеление» участка ткани между контактами зажима, что свидетельствует о коагуляции ткани на всей толщине, что указывает на трансмуральное повреждение. При этом зона коагуляции практически не выходит за пределы проекции зажима на ткань, примерно одинакова по всей толщине ткани; распространения в боковых направлениях частичной коагуляции практически не наблюдается.



Рис. 6. Иллюстрация третьего эксперимента

На графике (см. рис. 5) мощность, приложенная к ткани, постоянна на протяжении всего времени воздействия. Данная ситуация носит частный характер и приведена как наглядная иллюстрация. В практических целях уровень мощности может и должен быть изменяем на протяжении всего времени воздействия в соответствии с описанными выше требованиями по поддержанию определенных скоростей изменения импеданса. Уровень мощности может изменяться плавно, ступенчато или иным образом. Ключевое значение имеет средняя скорость изменения импеданса на соответствующем участке характерной кривой импеданса ткани.

Изложенные результаты доказывают, что эффективность воздействия на аблируемую ткань и качество полученного результата явным образом зависят от правильного выбора мощности, приложенной к обрабатываемой биологической ткани. Для определения эффекта трансмуральности важно в алгоритме работы учесть возможность возникновения непрогретых внутренних слоев при перегретых поверхностных слоях обрабатываемой ткани. Также следует учесть возможность появления поверхностных непрогретых участков в связи с нарушением электрического контакта из-за механических неровностей ткани. Поэтому для достижения эффекта трансмуральности необходимо контролировать дополнительные параметры: осуществлять контроль и регулирование скорости нагрева ткани, осуществлять оценку объема обрабатываемой ткани, расчет необходимого количества энергии для нагрева расчетного объема ткани, осуществлять контроль соответствия реально израсходованного количества энергии расчетному.

Алгоритм работы системы для определения достижения эффекта трансмуральности

Предлагаемый алгоритм позволит получить более качественный прогрев внутренних слоев ткани, чем у аналогов. Принцип его работы следующий:

1. На данном этапе проводится измерение объема ткани между двумя парами электродов. На них подается невысокое напряжение, достаточное для слабого нагрева ткани. Постоянно проводится измерение импеданса ткани и мощности, приложенной к ткани. По соотношению приложенной мощности и скорости изменения импеданса делается вывод об относительном объеме ткани, зажatom между двумя парами электродов. Объем ткани необходимо знать для расчета максимальной мощности генератора, необходимой для воздействия на данный объем ткани. Кроме этого, имея данные об объеме ткани, делается расчет общего количества энергии, которую требуется затратить для нагрева данного объема ткани.

2. Следующий этап – это нагрев ткани с поддержанием заданной скорости снижения импеданса. После отработки предыдущего этапа увеличивается мощность для поддержания нужной скорости нагрева ткани, при которой скорость нагрева ткани и скорость теплообмена между соседними областями ткани уравновешены. Ведется постоянный расчет и контроль затраченной энергии.

3. После достижения максимальной для данного объема ткани мощности абляция продолжается с постоянным значением импеданса. Мощность регулируется таким образом, чтобы

импеданс поддерживался на установившемся уровне. Время воздействия находится в интервале от 5 до 10 с. За это время вследствие теплообмена объем обрабатываемой ткани равномерно прогревается.

4. После достижения некоторого минимального значения импеданс начинает возрастать. Для предотвращения перегрева ткани необходимо снижать мощность, если импеданс растет слишком быстро. В случае если воздействие проведено правильно, то момент начала роста импеданса свидетельствует о достижении трансмуральности. В этот момент сравниваются данные о затраченной на воздействие энергии с расчетными данными о количестве необходимой энергии, полученными в п.1. Если энергии затрачено существенно меньше, то выдается сообщение о риске отсутствия трансмуральности и необходимости повторения процедуры. Если после начала роста импеданса количество реально затраченной энергии соответствует расчетному, согласно п. 1, то это говорит о том, что достигнута трансмуральность.

Предлагаемый алгоритм предназначен для нагрева биологических тканей с целью деструкции определенного участка ткани без нарушения целостности органа.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет получить более качественный прогрев внутренних слоев ткани и определить эффект достижения трансмуральности за более короткое время, что чрезвычайно важно при проведении операций с применением искусственного кровообращения. Предложенный способ позволяет идентифицировать с более высокой достоверностью момент и факт наступления трансмурального поражения миокарда. В совокупности достигнутые результаты способствуют сокращению времени проведения кардиохирургических операций и повышению процента излеченных аритмий как непосредственно после проведения операции, так и в отдаленных периодах.

Библиографический список

1. Радиочастотная абляция сердца как метод хирургического лечения аритмий / И. В. Опалинская, Н. П. Васильева, В. Ю. Кашин, М. Е. Протасов, А. Г. Ямбатов // *Acta medica Eurasica*. – 2018. – № 1. – С. 36–41.
2. Патент RU2016150580 Способ неразрушающей деструкции миокарда предсердий при лечении наджелудочковых аритмий и устройство для его осуществления / Евтушенко А. В., Евтушенко В. В. – Заявл. 21.12.2016 ; опубл. 22.06.2018.
3. Патент RU2665627 Биполярный электрохирургический инструмент для деструкции миокарда предсердий при лечении наджелудочковых аритмий / Евтушенко А. В., Евтушенко В. В., Спесивцев С. А., Киселев Н. В., Силиванов В. В., Голеньевский А. С. – Заявл. 21.12.2016 ; опубл. 03.09.2018.
4. Патент RU2691845C1 Способ абляции биологических тканей и устройство для его осуществления / Кульков В. Н., Борзилов А. Г. – № 2019104851 ; заявл. 20.02.2019 ; опубл. 18.06.2019.
5. Грачев, А. Ю. Аппаратно-программный комплекс для автоматизированных измерений биоимпеданса / А. Ю. Грачев, О. В. Карпанин, Е. А. Печерская // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2017. – № 1 (21). – С. 96–108.
6. Воробьева, Е. Ю. Факторы, влияющие на точность биоимпедансного анализа / Е. Ю. Воробьева, К. Ю. Крайнова, Е. А. Печерская, А. М. Бибарсова // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. науч. ст. VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2019. – С. 178–179.
7. Антипенко, В. В. Основы биоимпедансного анализа для мониторинга клинического состояния заболеваний / В. В. Антипенко, Е. А. Печерская // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. ст. по материалам VII Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2020. – С. 221–224.
8. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases / V. V. Antipenko, E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, D. V. Artamonov, K. Yu. Spitsina, A. V. Pecherskiy // *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – Krasnoyarsk, Russia, 2020. – P. 52075.

References

1. Opalinskaya I. V., Vasil'eva N. P., Kashin V. Yu., Protasov M. E., Yambatov A. G. *Acta medica Eurasica* [Journal of medical Eurasica]. 2018, no. 1. P. 36–41.
2. Patent RU2016150580 *Sposob nerazrushayushchey destruktzii miokarda predserdiy pri lechenii nadzheledochkovykh aritmiy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Patent RU2016150580 Method for non de-

- structive destruction of atrial myocardium in the treatment of supraventricular arrhythmias and a device for its implementation]. Evtushenko A. V., Evtushenko V. V.; appl. 21.12.2016; publ. 22.06.2018. [In Russian]
3. Patent RU2665627 *Bipolyarnyy elektrokhirurgicheskiy instrument dlya destruktssii miokarda pred-serdiy pri lechenii nadzheludochkovykh aritmiy* [Patent RU2665627 Bipolar electrosurgical instrument for destruction of atrial myocardium in the treatment of supraventricular arrhythmias]. Evtushenko A. V., Evtushenko V. V., Spisivtsev S. A., Kiselev N. V., Silivanov V. V., Golenevskiy A. S.; appl. 21.12.2016; publ. 03.09.2018. [In Russian]
 4. Patent RU2691845C1 *Sposob ablyatsii biologicheskikh tkaney i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Patent RU2691845C1 Method of ablation of biological tissues and device for its implementation]. Kul'kov V. N., Borzilov A. G. No. 2019104851; appl. 20.02.2019; publ. 18.06.2019. [In Russian]
 5. Grachev A. Yu., Karpanin O. V., Pecherskaya E. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in Economics, technology, nature, and society]. 2017, no. 1 (21), pp. 96–108. [In Russian]
 6. Vorob'eva E. Yu., Kraynova K. Yu., Pecherskaya E. A., Bibarsova A. M. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles VI all-Russian inter-university scientific-practical conf.]. Penza, 2019, pp. 178–179. [In Russian]
 7. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. st. po materialam VII Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of articles based on the materials of the VII all-Russian inter-university scientific-practical Conf.]. Penza, 2020, pp. 221–224. [In Russian]
 8. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Artamonov D. V., Spitsina K. Yu., Pecherskiy A. V. *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Krasnoyarsk, Russia, 2020, p. 52075.

Антипенко Владимир Викторович

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

Antipenko Vladimir Viktorovich

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

Кульков Владимир Николаевич

директор ООО «Анико»
(Россия, г. Пенза, ул. Центральная, стр. 1)
E-mail: kulkov_v@mail.ru

Kulkov Vladimir Nikolaevich

director of Aniko LLC
(build. 1 Tsentral'naya street, Penza, Russia)

Печерская Екатерина Анатольевна

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Антипенко Светлана Анатольевна

инженер,
ПО «Электроприбор»
(Россия, г. Пенза, проспект Победы, 69)
E-mail: zarsveta5@gmail.com

Antipenko Svetlana Anatolevna

engineer,
PIC «Electropribor»
(69 Pobedy avenue, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Антипенко, В. В. Разработка алгоритма функционирования системы для определения достижения эффекта трансуральности / В. В. Антипенко, В. Н. Кульков, Е. А. Печерская, С. А. Антипенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 92–100. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-11.