

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Шерстнев В. В., Белик Д. С., Безбородова О. Е., Бодин О. Н.**
 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА
 ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ
 И ПРОВЕДЕНИЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ 5
- Козырев Г. И., Лавров Р. О., Усиков В. Д.**
 ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
 СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
 АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
 ОБСЛУЖИВАНИЯ ОРУЖИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ 16
- Курносков Р. Ю., Чернышова Т. И.**
 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
 ПРОЦЕДУРЫ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
 В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
 ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ 25
- Безбородова О. Е., Убиенных А. Г., Шерстнев В. В., Бодин О. Н.**
 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
 И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ 33
- Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е.**
 НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦИФРОВОГО КОДА
 ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ В АВТОНОМНЫХ
 ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ 42

Самохина К. С.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
С УВЕЛИЧЕННЫМ ПЕРИОДОМ ОДНОЗНАЧНОСТИ

55

Коротков А. А.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ СИГНАЛА
С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ
МОДУЛЯЦИЕЙ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

60

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Антипенко В. В.,

Баранов В. А., Вареник Ю. А., Александров В. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ И СВОЙСТВ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ,
СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА

69

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

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

Антипенко С. А., Александров В. С., Мельников О. А.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ БИОИМПЕДАНСА

78

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Sherstnev V. V., Belik D. S., Bezborodova O. E., Bodin O. N.***
IMPROVEMENT OF MONITORING OF TERRITORIAL
TECHNOSPHERE AND CARRYING OUT
OF SEARCH AND RESCUE WORKS 5
- Kozyrev G. I., Lavrov R. O., Usikov V. D.***
CONSTRUCTION OF AN INTELLIGENT MEASURING SYSTEM
FOR MONITORING THE METROLOGICAL RELIABILITY
OF AN AUTOMATED METROLOGICAL SERVICE COMPLEX
FOR WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT 16
- Kurnosov R. Yu., Chernyshova T. I.***
METROLOGICAL ANALYSIS OF THE MEASUREMENT
PROCEDURE OF ANALOG-DIGITAL CONVERSION
IN INFORMATION-MEASURING SYSTEMS
IN THE EVALUATION OF THEIR METROLOGICAL RELIABILITY 25
- Bezborodova O. E., Ubiennykh A. G., Sherstnev V. V., Bodin O. N.***
EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF IMPROVEMENT
OF INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEMS 33
- Trofimov V. Yu., Shakhmeyster L. E.***
NONLINEAR DIGITAL CODE CONVERTERS IN TIME INTERVAL
IN AUTONOMOUS INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS 42
- Samohina K. S.***
INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
BASED ON LASER OPTOELECTRONIC DEVICES
WITH AN EXTENDED PERIOD OF UNAMBIGUITY 55

Korotkov A. A.

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATING ANALOG-DIGITAL
CONVERTER WITH OVERSAMPLING WITH INTERMEDIATE
WIDTH-PULSE MODULATION IN THE COMPOSITION
OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

60

INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Antipenko V. V.,

Baranov V. A., Varenik Yu. A., Alexandrov V. S.

MODELING THE RELATIONSHIP BETWEEN
TECHNOLOGICAL MODES AND PROPERTIES
OF AN OXIDE COATING SYNTHESIZED BY SPRAY PYROLYSIS

69

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

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

Antipenko S. A., Alexandrov V. S., Mel'nikov O. A.

METROLOGICAL ASPECTS OF THE AUTOMATED METHOD
FOR MEASURING BIOIMPEDANCE

78

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 614.8.01

DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-1

В. В. Шерстнев, Д. С. Белик, О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ И ПРОВЕДЕНИЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

V. V. Sherstnev, D. S. Belik, O. E. Bezborodova, O. N. Bodin

IMPROVEMENT OF MONITORING OF TERRITORIAL TECHNOSPHERE AND CARRYING OUT OF SEARCH AND RESCUE WORKS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Усложнение технических систем, применяемых в производстве, ведет к увеличению количества техногенных аварий и катастроф, следствием которых является разрушение зданий и сооружений, а также большое количество человеческих жертв. Техническая база проведения экологического мониторинга и поисково-спасательных работ создавалась в 90-х гг. XX в. и на сегодняшний день устарела. **Материалы и методы.** Используются методы математического и имитационного моделирования при создании аппаратно-программного комплекса нового поколения. Применено имитационное моделирование для анализа структурных схем интеллектуальных систем мониторинга и контроля. **Результаты.** Обосновано использование беспилотных воздушных судов для мониторинга территориальной техносферы для обеспечения техносферной безопасности в нормальном режиме и чрезвычайных ситуациях. Разработанный алгоритм использования беспилотного воздушного судна обеспечивает оперативность и своевременность сбора и представления информации при мониторинге территориальной техносферы и минимизации уровней поражающих факторов в зоне чрезвычайной ситуации. **Выводы.** Предлагаемый аппаратно-программный комплекс обеспечения экологического благополучия человека благодаря использованию специально оборудованных беспилотных воздушных судов позволит лицам, принимающим решения, получать достоверную оперативную измерительную информацию и формировать с использованием подсистемы поддержки принятия решений эффективные управляющие воздействия.

A b s t r a c t. *Background.* The complexity of technical systems used in production leads to an increase in the number of man-made accidents and catastrophes, which result in the destruction of buildings and structures, as well as a large number of human victims. The technical base for environmental monitoring and search and rescue operations was created in the 90s of the 20th century and is now outdated. **Materials and methods.** Methods of mathematical and simulation modeling were used to create a new generation of hardware and software complex. Simulation modeling is applied to analyze the structural schemes of intelligent monitoring and control systems. **Results.** The use of unmanned aircraft for monitoring the territorial techno-

sphere to ensure technosphere safety in normal mode and in emergency situations is justified. The developed algorithm for using an unmanned aircraft ensures the efficiency and timeliness of collecting and presenting information when monitoring the territorial technosphere and minimizing the levels of damaging factors in the emergency zone. **Conclusions.** The proposed hardware and software complex for ensuring human environmental well-being, thanks to the use of specially equipped UAVs, will allow the LPR to obtain reliable operational measurement information and form effective control actions using the decision support subsystem.

К л ю ч е в ы е с л о в а: экологическое благополучие человека, поисково-спасательные работы, беспилотное воздушное судно, датчик.

К e y w o r d s: human environmental well-being, search and rescue, unmanned aircraft, sensor.

Актуальность

Проблема экологической безопасности в РФ является очевидной. Окружающая среда в городах и на прилегающих к ним территориях, где проживает 74 % населения страны, подвергается существенному негативному воздействию, источниками которого являются промышленность, энергетика, транспорт и коммунальные объекты.

В соответствии со «Стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [1] проблемы экологической безопасности связывают с глобальными, внутренними и внешними угрозами. Воздействию этих угроз подвержены биосфера и жизненно важные интересы человека. Проявляются эти угрозы в форме техногенных аварий, природных катастроф, изменения климата, роста потребления природных ресурсов при сокращении их запасов и пр.

Для предотвращения реализации этих угроз необходимо совершенствование системы мониторинга территориальной техносферы (ТТ) и повышение технического потенциала и оснащенности сил, участвующих в мероприятиях по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера.

Таким образом, необходимость совершенствования систем мониторинга ТТ и способов проведения поисково-спасательных работ (ПСР) является актуальной и все достижения науки должны применяться для обеспечения безопасности ТТ в нормальном режиме и в ЧС.

Постановка проблемы

При проведении мониторинга ТТ важным является получение оперативной и достоверной информации о постоянно изменяющемся состоянии источников загрязняющих веществ (ЗВ). Отличительной особенностью существующих систем мониторинга ТТ является их многочисленность и сосредоточенность стационарно установленных датчиков вокруг объектов ТТ, являющихся источниками загрязнения окружающей среды [2, 3]. Распространение ЗВ на остальной территории постоянно не контролируется.

Кроме этого, все системы мониторинга ТТ являются локальными, так как они создавались без учета возможности связаться с другими аналогичными системами для анализа и сравнения и могут использовать только «свою» информацию, что не позволяет в полном объеме оценить ситуацию в исследуемом районе. Сфера действия мобильных датчиков, расположенных на автомобилях [4], ограничена районами безопасного нахождения персонала, управляющего ими. Что так же влияет на полноту и достоверность представляемой информации.

Техническая база проведения поисково-спасательных работ, создавалась в 90-х гг. XX в. и на сегодняшний день устарела. Это видно из анализа проведенного авторами в [5]. По результатам анализа можно сделать вывод о том, что все традиционные методы имеют недостатки и ограничения в использовании, связанные, прежде всего, с погодными условиями и временем суток, из-за которых можно упустить много важных деталей при проведении ПСР. Погодные условия – наиболее значимый недостаток, потому что почти все традиционные методы теряют свои достоинства в плохую погоду, что приводит к пагубным последствиям.

Следующий важный недостаток – это время проведения ПСР. Большинство ЧС требуют от членов поисково-спасательной команды (ПСК) быстрые и точные действия, поэтому время, которое требуется для того, чтобы определиться с планом действий имеет большое значение.

Концепция «Умный город», получившая распространение и реализуемая в отдельных регионах РФ, направлена на объединение в составе единого комплекса программно-технических решений, реализованного с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, ведомственных информационных систем различного назначения для обеспечения комплексной безопасности и экологического благополучия человека (ЭБЧ).

Необходимость совершенствования комплекса программно-технических решений «Умный город» обусловлена обеспечением:

- эффективного управления деятельностью экстренных и оперативных служб;
- ЭБЧ, целями которого являются снижение выбросов, сбросов загрязняющих веществ, минимизация образования отходов, развитие предприятий по использованию отходов в качестве вторичных материальных и/или энергетических ресурсов;
- городского видеонаблюдения;
- эффективного управления транспортными потоками;
- системы городского информирования;
- информационно-картографическое обеспечение.

Результаты

Предлагаемый аппаратно-программный комплекс (АПК) предназначен для обеспечения ЭБЧ и работы в составе комплекса программно-технических решений «Умный город» и может выполнять:

- автоматизированное управление подсистемами контроля, анализа и управления ТТ в нормальной и ЧС;
- оперативное информирование лиц, принимающих решения (ЛПР), о текущем состоянии дел на объектах ТТ;
- поддержку принятия решений и осуществления экстренных мер по недопущению возникновения ЧС (нормализации состояния) и/или проведения ПСР в ЧС.

Предлагаемый АПК обеспечения ЭБЧ разработан с учетом использования информационно-коммуникационных технологий и построен по трехуровневой схеме информационного взаимодействия:

I уровень – сбор и обработка первичной информации о состоянии ТТ и человека в ее составе;

II уровень – оценка полученной информации и принятие на ее основе обоснованных решений;

III уровень – реализация принятых решений.

Структурная схема АПК обеспечения ЭБЧ приведена на рис. 1 [4].

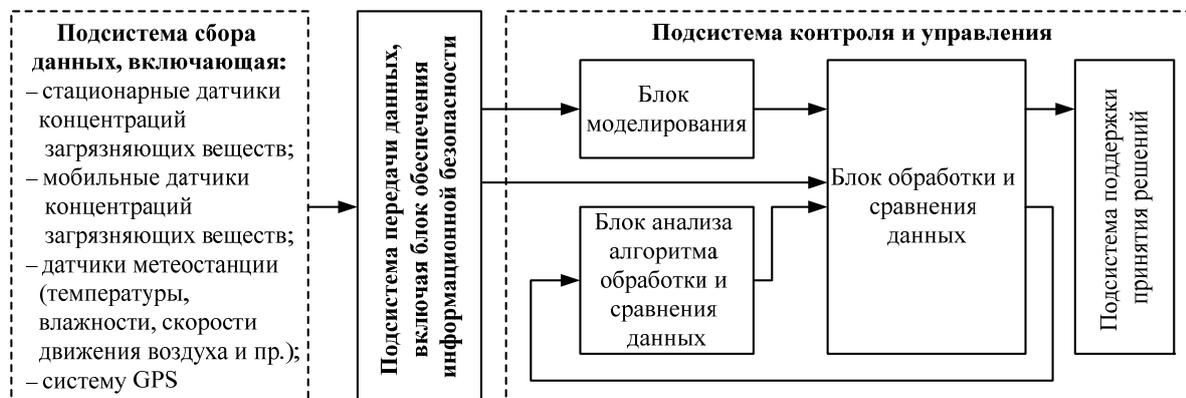


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса обеспечения экологического благополучия человека

АПК обеспечения ЭБЧ предназначен для использования как в нормальном режиме работы техногенных объектов, так и в условиях ЧС. При нормальном (безаварийном) режиме работы проводится постоянный мониторинг состояния ТТ с использованием стационарных и мобильных датчиков подсистемы сбора данных. Стационарные датчики располагают на границах санитарно-защитных зон объектов ТТ, на участках источников выбросов и сбросов, т.е. там, где идет постоянное техногенное воздействие на окружающую среду. Мобильные датчики установлены на специально оборудованных беспилотных воздушных судах (БВС), которые в режиме патрулирования контролируют «проблемные» в данный момент участки ТТ: загруженные транспортом перекрестки, промышленные микрорайоны города.

К выбору и установке датчиков на БВС предъявляют серьезные требования, так как от них зависит достоверность, точность и оперативность получения результатов анализа. Оснащение такими датчиками БВС позволяет обеспечить сбор информации от объектов различной степени сложности и опасности с максимальным снижением риска для человека и повышает их ценность как средства дистанционного аналитического контроля. В работе [6] отмечается, что с учетом полезной нагрузки для использования в качестве носителя пригодны БВС, масса которых составляет от 0,2 до 2 кг.

При выборе для установки на БВС газоаналитических систем необходимо учитывать:

- массу основных блоков анализатора;
- массу аккумуляторной батареи или массу модуля сопряжения с источником питания БВС;
- потребляемую мощность анализатора и его влияние на время полета БВС;
- размещение системы отбора проб;
- средства связи;
- мощность и тип применяемых микропроцессоров.

Для решения задачи по определению концентрации ЗВ в воздухе предложен адсорбционно-кинетический метод обнаружения, идентификации и количественного определения с помощью полупроводниковых газочувствительных элементов, изготовленных на основе диоксида олова, обогащенного сурьмой и легированного металлами-катализаторами *Pd*, *Mn* и *Ag* и включенных в многоканальную мультисенсорную систему.

Полупроводниковые датчики, применяемые для определения ЗВ, состоят из газочувствительного слоя, подложки-диэлектрика и нагревательного элемента. Электрические соединения осуществляются через контактные площадки, изготовленные из золотосодержащей проводящей пасты, соединения выполнены *Au*-проводом диаметром 37 мкм и длиной 2 – 3 мм. На рис. 2 представлены наиболее распространенные газоанализаторы [7].

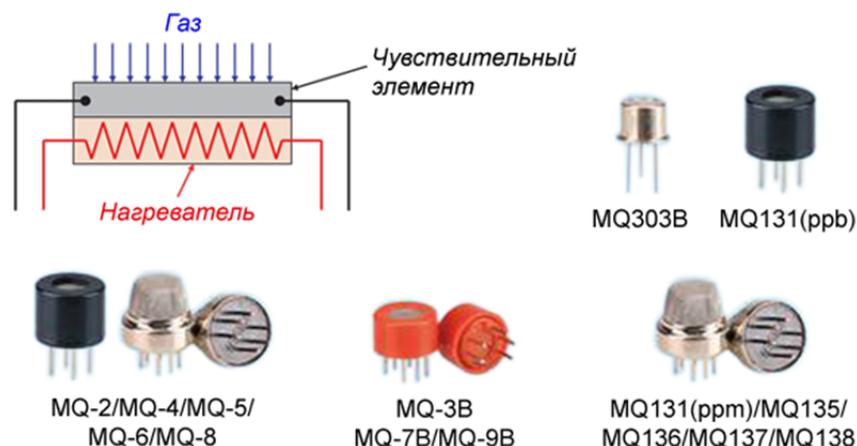


Рис. 2. Полупроводниковые газоанализаторы [7]

На сегодняшний день компания Winsen производит широкий спектр полупроводниковых газоанализаторов общего назначения, с помощью которых можно определять концентрацию большого количества газов.

В табл. 1 приведены характеристики датчиков некоторых газов [7].

Таблица 1

Характеристики датчиков некоторых газов

Наименование	MQ-2 Smoke Sensor	MQ-4 Methane Gas Sensor/ LNG Detection Gas Sensor	MQ-5 LPG Detection Sensor	MQ-6 Propane LPG Flammable Gas Sensor	MQ-8 Hydrogen Sensor
Газ	легковоспламеняющийся газ, дым	метан	сжиженный газ, метан	сжиженный газ	водород
Диапазон измерений, ppm	300...10000	300...10000	300...10000	300...10000	100...1000
Напряжение контура, В	≤ 24				
Напряжение подогревателя, В	5 ± 0,1				
Мощность подогревателя, мВт	≤ 950		≤ 900		
Чувствительность	Rs (воздух)/Rs (2000 ppm C ₃ H ₈) ≥ 5	Rs (воздух)/Rs (5000 ppm CH ₄) ≥ 5	Rs (воздух)/Rs (2000 ppm C ₃ H ₈) ≥ 5	Rs (воздух)/Rs (2000 ppm C ₃ H ₈) ≥ 5	Rs (воздух)/Rs (1000 ppm H ₂) ≥ 5
Время прогрева, ч	не менее 48				

Принцип действия полупроводниковых адсорбционных датчиков основан на измерении изменения электропроводности газочувствительного слоя при адсорбции на его поверхность молекул из газовой фазы. При адсорбции молекул на поверхность газочувствительного слоя нарушается равновесное значение тока в зоне проводимости и происходит либо увеличение концентраций носителей заряда (в случае хемосорбции газа-донора), либо снижение их концентрации (в случае хемосорбции газа-акцептора). Изменения концентрации носителей определяют аналитический отклик датчика, который зависит от химического состава аналита и его количества – концентрации.

Электронная схема газоанализатора включает микропроцессор, который обеспечивает нагрев газочувствительного слоя, измерение и обработку первичной информации, расчеты по заданному алгоритму, передачу информации по интерфейсам RS485, USB, I2C, SPI, RS232, сетям Ethernet, WiFi и радиоканалу. На рис. 3 показаны основная плата газоанализатора и возможные интерфейсные решения.

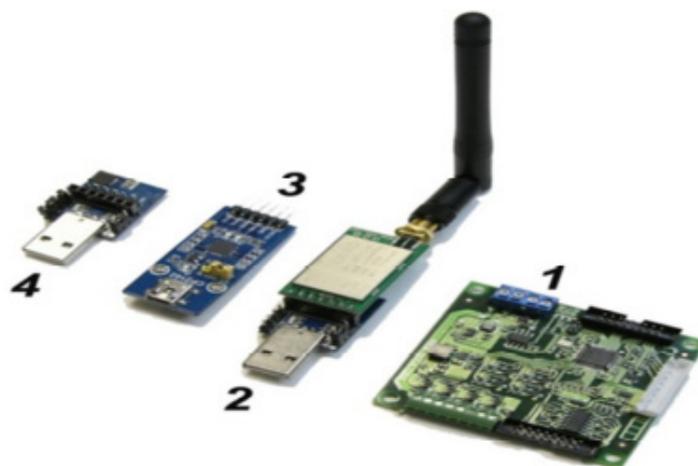


Рис. 3. Общий вид полупроводникового газоанализатора:
1 – плата анализатора; 2 – сопряжение с оператором по радиоканалу;
3 – сопряжение с ПК по RS485; 4 – интерфейс USB-2.0 [6]

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

В соответствии с работой [8] при измерениях с необходимостью коррекции погрешности измеренную величину можно представить следующим образом:

$$\lambda_j^* = \lambda_j^{**} - \Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*,$$

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

$$\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* = \Delta_{\text{кор}} \lambda_j^* + \delta_{\text{кор}} \lambda_j^*,$$

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

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

и получаем значение погрешности без коррекции

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

с коррекцией

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

Воспользовавшись предложенным в работе [8] представлением процедуры адаптивной коррекции погрешности $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* \leq \Delta_{\text{п}}$ ($\Delta_{\text{п}}$ – пороговый уровень $\Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^*$, определяющий границу целесообразности применения коррекции), получаем $\lambda_j^* = L\gamma_j \vee \Delta_{\text{кор}}^* \lambda_j^* > \Delta_{\text{п}}$ и $\lambda_j^* = R_{\text{кор}} L\gamma_j$.

В научной и справочной литературе предлагаются различные подходы к коррекции погрешностей измерений [8]. Наиболее эффективным, с нашей точки зрения, является подход, заключающийся в разработке алгоритмических методов коррекции по математической модели – концепция интеллектуального датчика (ИД) [9]. ИД помимо функции измерения и преобразования параметра выполняет функции самодиагностики, защиты и блокировки, контроля состояния узлов исполнительного механизма и пр. Именно поэтому приборы, выполняющие новые дополнительные функции, принято называть интеллектуальными.

В настоящее время благодаря наличию однокристалльных микроконтроллеров с малым энергопотреблением, встроенными прецизионными аналого-цифровыми преобразователями и энергонезависимой памятью данных, ведущие фирмы перешли от аналоговых методов коррекции погрешности к цифровым. ИД имеет цифровой выход и может обеспечивать передачу

информации о метрологической исправности через интерфейс. При этом обладая вычислительными возможностями, он позволяет осуществлять: автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия влияющих величин и/или старения компонентов, самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике, самообучение. ИД создают техническую основу для установления двух значений межповерочных (межкалибровочных) интервалов (при эксплуатации с использованием функции метрологического самоконтроля и без нее). Таким образом, постоянную коррекцию погрешности $\Delta_{кор}^* \lambda_j^*$ осуществляет ИД.

Все детектируемые данные (концентрации ЗВ, метеорологические данные, координаты мест проведения измерений) в режиме реального времени по различным сетям передачи данных поступают в блок моделирования, где с помощью специального программно-технического комплекса строятся карты полей распространения ЗВ.

Цель моделирования состоит в воспроизведении поведения источников ЗВ на основе накопления поступающих данных, а также анализа комплексного взаимодействия между ними.

Моделирование позволяет имитировать поведение источников ЗВ, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны. При этом используется компьютерное 3D-моделирование, позволяющее наглядно показать распространение ЗВ по исследуемой территории на карте, разделив ее на участки с различными значениями ЗВ (рис. 4).

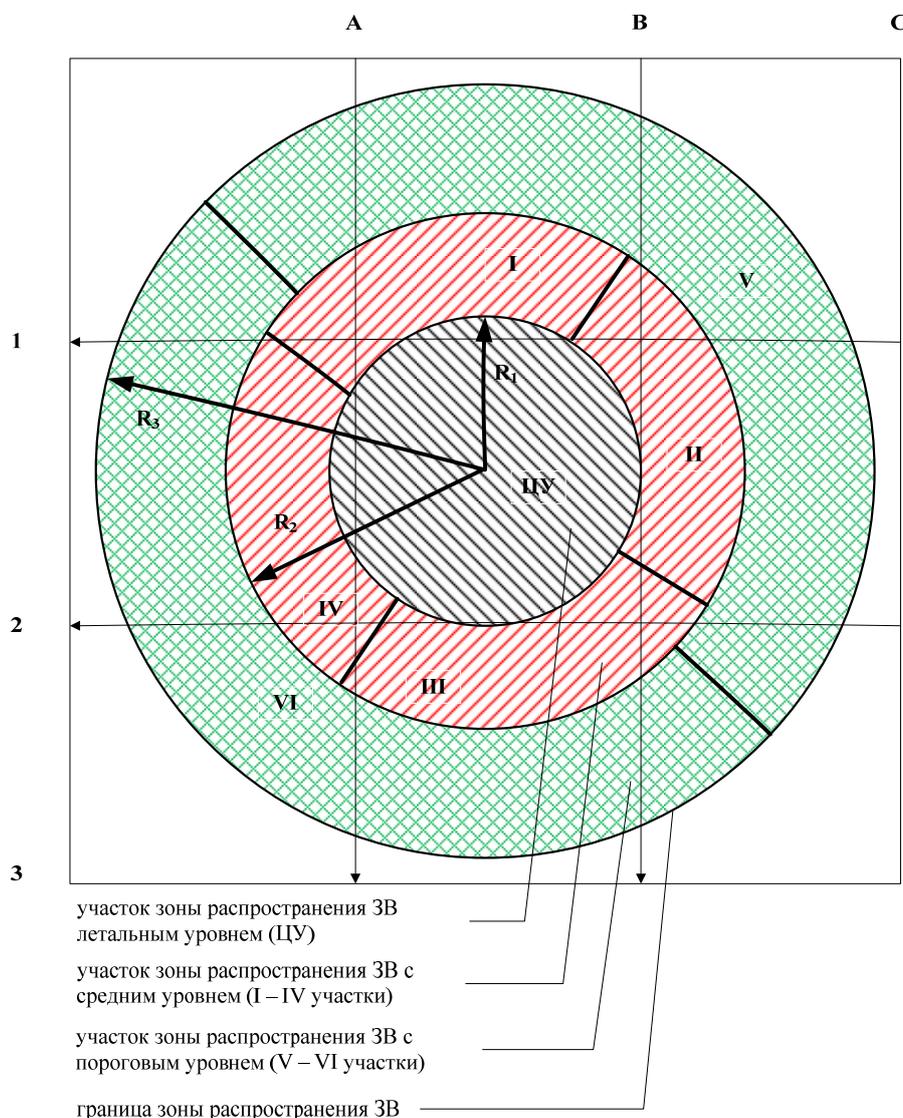


Рис. 4. Деление зоны распространения загрязняющих веществ на участки в зависимости от значений концентрации загрязняющих веществ

Деление зоны распространения ЗВ на участки осуществляется установлением границ на основе отношения измеренных значений концентраций ЗВ к предельно допустимым значениям (ПДЗ).

Каждая зона выделяется отдельной границей, устанавливаемой на определенном уровне. Граница участка зоны распространения ЗВ с летальным уровнем устанавливается в пределах диапазона значений, когда

$$C_{\text{факт}} \gg n\text{ПДЗ}.$$

Граница участка зоны распространения ЗВ со средним уровнем устанавливается в пределах диапазона значений, когда

$$\text{ПДЗ} < C_{\text{факт}} \leq n\text{ПДЗ}.$$

Граница участка зоны распространения ЗВ с пороговым уровнем устанавливается на уровне

$$C_{\text{факт}} = \text{ПДЗ}.$$

Граница участка зоны распространения ЗВ устанавливается на уровне

$$C_{\text{факт}} < \text{ПДЗ}.$$

При пересечении фактическим значением фактора опасности каждой из сформированных границ на монитор ЛПР приходит сообщение в форме фактического значения фактора опасности диапазона, в котором находится это значение и цветовой индикации.

Кроме того, эта же информация поступает в подсистему поддержки принятия решений и по итогам ее работы на монитор добавляется информация о необходимости осуществления корректирующих воздействий и предлагаются варианты этих воздействий с учетом уровня фактора опасности и специфики региона.

Если на монитор ЛПР приходит сообщение о выходе одного или нескольких значений фактора опасности за пределы диапазона ПДЗ, это свидетельствует о возникновении в регионе ЧС. И тогда на участок территории, где зафиксировано превышение, отправляют мобильный телемедицинский комплекс, оснащенный многофункциональной гетерогенной группой БВС [10].

На основе этих данных ЛПР осуществляет руководство ПСР, отправляя в зону ЧС необходимое количество спасателей и медиков и подготавливая медицинские организации к приему пострадавших.

Алгоритм осуществления этих действий приведен на рис. 5.

В этой работе задействовано не только БВС, а также АПК обеспечения ЭБЧ, оператор которого управляет БВС и принимает решения.

Минимизация концентраций ЗВ в зоне ЧС неразрывно связана с проведением мониторинга и опирается на данные измерений, полученные и детектируемые оператору БВС, оборудованными контрольно-измерительными приборами. Так как именно это БВС фиксирует параметры источников ЗВ и их координаты. На основе этих данных делается вывод об эффективности мероприятий по минимизации концентраций ЗВ.

При получении информации от датчиков, установленных стационарно, о превышении фактических значений ПДЗ в эту зону отправляют БВС, оснащенное контрольно-измерительными приборами. По результатам мониторинга обнаруживают источник ЗВ и наносят на карту местности поле распространения ЗВ и отправляют к источнику ЗВ БВС, оснащенный манипулятором и материалами для исключения и/или минимизации действия ЗВ.

По окончании этой работы БВС, оснащенное контрольно-измерительными приборами, проводит повторные замеры, и если цель достигнута, оба БВС возвращаются на базу. Если источник ЗВ активен, оператор отправляет в зону ЧС специально оборудованную команду.

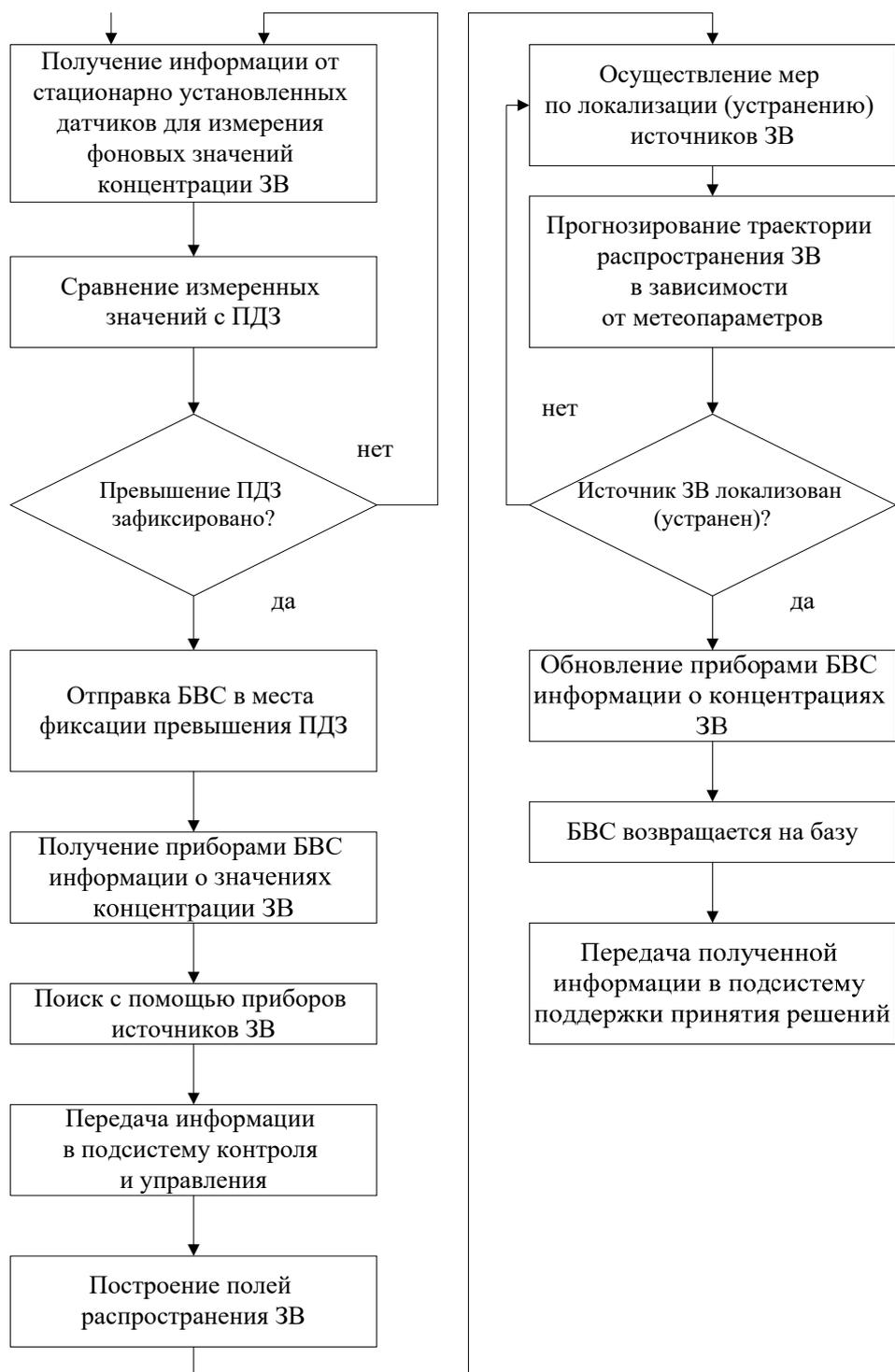


Рис. 5. Алгоритм использования беспилотного воздушного судна для мониторинга территориальной техносферы и минимизации концентрации загрязняющих веществ в зоне чрезвычайной ситуации

Заключение

Таким образом, разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечения экологического благополучия человека, благодаря использованию специально оборудованных БВС позволит лицам, принимающим решения, получать достоверную оперативную измерительную информацию и формировать с использованием подсистемы поддержки принятия решений эффективные управляющие воздействия.

За счет совместного использования БВС и ИД предлагаемый АПК обеспечения ЭБЧ может оказать интеллектуальную поддержку при решении большого количества задач контроля и управления качеством ТТ, так как способен:

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

Библиографический список

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : [утв. Указом Президента Российской Федерации г. № 176 от 19 апреля 2017].
2. Bezborodova, O. E. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology / O. E. Bezborodova, O. N. Bodin, V. G. Polosin // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – DOI 10.1109/fareastcon.2018.8602540.
3. Юхно, А. И. Исследование алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей системы контроля качества питьевой воды / А. И. Юхно // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 5–11. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-1.
4. Пат. 2549222 Рос. Федерация: МПК G01 W1/00. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона / Бодин О. Н. и др.; патентообладатели и заявители Бодин О. Н., Казаков В. А. – № 2013122314/28; заявл. 20.11.2014; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
5. Белик, Д. С. Анализ современных программно-аппаратных средств для проведения поисково-спасательных работ / Д. С. Белик, В. В. Шерстнев, О. Е. Безбородова // Актуальные проблемы науки : сб. науч. ст. XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 236 с.
6. Белозерцев, А. И. Развернутые газоаналитические приборные комплексы для обнаружения компонент ракетных топлив в окружающей среде (обзор) / А. И. Белозерцев, О. В. Черемисина, С. З. Эль-Салим, В. В. Манойлов // Научное приборостроение. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 91–102. – URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/full2/Art12.pdf>
7. Русу, А. Перевести дыхание: датчики Winsen для контроля качества воздуха / А. Русу // Новости электроники. – 2017. – № 8.
8. Цветков, Э. И. Metrology. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. Дополнительные главы / Э. И. Цветков. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 144 с.
9. ГОСТ Р 8.673–2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
10. Пат. 2694528 Российская Федерация № 2018139491. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Рахматуллин Ф. К., Герасимов А. И. и др. ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20. – 31 с.

References

1. *Strategiya ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda: [utv. Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii g. № 176 ot 19 aprelya 2017]* [Strategy of environmental safety of the Russian Federation for the period up to 2025: [approved by the government of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation No. 176 of April 19, 2017]]. [In Russian]
2. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. DOI 10.1109/fareastcon.2018.8602540.
3. Yukhno A. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 4 (30), pp. 5–11. DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-1. [In Russian]
4. Pat. 2549222 Russian Federation: MPK G01 W1/00. *Sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukha promyshlennogo regiona* [Pat. 2549222 ROS. Federation: IPC G01 W1/00. Environmental monitoring system for air in the industrial region]. Bodin O. N. et al.; patentobladateli i zayaviteli Bodin O. N., Kazakov V. A. № 2013122314/28; appl. 20.11.2014; publ. 20.04.2015, bull. № 11. [In Russian]
5. Belik D. S., Sherstnev V. V., Bezborodova O. E. *Aktual'nye problemy nauki: sb. nauch. st. XVI Mezhdunar. nauch.-prakt.konf.* [Actual problems of science: collection of scientific articles XVI international. scientific-practical conf.]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 236 p. [In Russian]
6. Belozertsev A. I., Cheremisina O. V., El'-Salim S. Z., Manoylov V. V. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrument engineering]. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 91–102. Available at: <http://213.170.69.26/mag/2017/full2/Art12.pdf> [In Russian]

7. Rusu A. *Novosti elektroniki* [Electronics news]. 2017, no. 8. [In Russian]
8. Tsvetkov E. I. *Metrology. Metrologiya. Modeli. Metrologicheskiy analiz. Metrologicheskiy sintez. Dopolnitel'nye glavy* [Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis. Additional chapter]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2016, 144 p. [In Russian]
9. GOST R 8.673–2009 *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Osnovnye terminy i opredeleniya* [GOST R 8.673-2009 national standard of the Russian Federation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions]. [In Russian]
10. Pat. 2694528 Russian Federation № 2018139491. *Sposob provedeniya poiskovo-spasatel'nykh robot* [Pat. 2694528 Russian Federation No. 2018139491. Method of conducting search and rescue operations]. Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E., Rakhmatullof F. K., Gerasimov A. I. i dr.; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. № 20, 31 p. [In Russian]

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)

Белик Денис Сергеевич

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

Belik Denis Sergeevich

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

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 measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Шерстнев, В. В. Совершенствование мониторинга территориальной техносферы и проведения поисково-спасательных работ / В. В. Шерстнев, Д. С. Белик, О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин // Изменение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 5–15. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-1.

Г. И. Козырев, Р. О. Лавров, В. Д. Усиков

**ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ
НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ**

G. I. Kozyrev, R. O. Lavrov, V. D. Usikov

**CONSTRUCTION OF AN INTELLIGENT MEASURING SYSTEM
FOR MONITORING THE METROLOGICAL RELIABILITY
OF AN AUTOMATED METROLOGICAL SERVICE COMPLEX
FOR WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения метрологической надежности автоматизированных комплексов метрологического обслуживания вооружения и военной техники с помощью интеллектуальной измерительной системы контроля дрейфа метрологических характеристик в заданном диапазоне при воздействии дестабилизирующих факторов. Целью работы является разработка интеллектуальной измерительной системы, которая позволит корректировать выходные значения измеряемых параметров автоматизированного комплекса метрологического обслуживания в условиях воздействия дестабилизирующих факторов вплоть до предельных значений условий эксплуатации. **Результаты.** Рассмотрен подход к построению интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания с учетом особенностей его функционирования. Представлена структура интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания. Предложен способ построения интеллектуальных датчиков для устойчивого функционирования интеллектуальной измерительной системы при воздействии дестабилизирующих факторов. **Выводы.** Использование интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности позволит обеспечить выполнение автоматизированным комплексом метрологического обслуживания измерительной задачи в условиях воздействия различного рода дестабилизирующих факторов.

A b s t r a c t. Background. The relevance of this work is due to the need to increase the metrological reliability of automated systems for metrological service of weapons, military equipment of the Space Forces, using the means of an intelligent measuring system for monitoring the drift of metrological characteristics in a given range when exposed to destabilizing factors. The aim of the work is to develop an intelligent measuring system that will allow correcting the output values of the measuring parameters of an automated metrological service complex under the influence of destabilizing factors up to the limiting values of operating conditions. **Results.** An approach to the construction of an intelligent measuring system for monitoring the metrological reliability of an automated metrological service complex is considered,

taking into account the peculiarities of its functioning. The structure of an intelligent measuring system for monitoring metrological reliability of an automated metrological service complex is presented. A method for constructing intelligent sensors for the stable functioning of an intelligent measuring system under the influence of destabilizing factors is proposed. **Conclusions.** The use of an intelligent measuring system for monitoring metrological reliability will ensure that an automated metrological service complex performs a measuring task under the influence of various destabilizing factors.

К л ю ч е в ы е с л о в а: метрологическая надежность, автоматизированные комплексы метрологического обслуживания, дестабилизирующие факторы, интеллектуальная измерительная система, погрешность.

К e y w o r d s: metrological reliability, automated metrological service complexes, destabilizing factors, intelligent measuring system, error.

Введение

Автоматизированные комплексы метрологического обслуживания (АКМО) вооружения и военной техники, как правило, эксплуатируются в значительном удалении от основных метрологических подразделений, что затрудняет поверку и обслуживание средств измерений (СИ), входящих в их состав. Поэтому одним из важнейших требований, предъявляемых к АКМО, является автономность проводимых работ.

Для обеспечения автономности функционирования АКМО и повышения вероятности выявления метрологических отказов в процессе их эксплуатации предлагается оборудовать АКМО интеллектуальной измерительной системой контроля (ИИСК) метрологической надежности, включающей в себя базу знаний дрейфа метрологических характеристик АКМО в зависимости от воздействия различного рода дестабилизирующих факторов (ДФ). Для обеспечения требуемой точности и достоверности получаемых данных при построении ИИСК целесообразно применить интеллектуальные датчики с минимальной структурной избыточностью. Это позволит разработать систему контроля дрейфа метрологических характеристик СИ, входящих в АКМО, в реальном масштабе времени.

Определение коэффициентов метрологической надежности измерительных систем

Одним из основных показателей надежности восстанавливаемых военно-технических систем является коэффициент готовности K_T , под которым понимается вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени [1, 2].

При рассмотрении измерительной системы необходимо учитывать скрытый характер метрологических отказов, которые не проявляются до наступления очередной поверки. Поэтому в метрологической практике применяются показатели метрологической надежности, такие как вероятность метрологической исправности СИ $P_{\text{МИ}}(t)$ и коэффициент метрологической исправности СИ $K_{\text{МИ}}(t)$ [3].

Величина $P_{\text{МИ}}(t)$, под которой понимается вероятность того, что в произвольный момент времени t СИ является метрологически исправным, вычисляется с помощью выражения [3]

$$P_{\text{МИ}}(t) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \varphi_t(\xi) d\xi = \Phi[G(t, \Delta)] - \Phi[G(t, -\Delta)], \quad (1)$$

где Δ – предел допускаемых значений метрологических характеристик; ξ – значение метрологической характеристики; $\varphi_t(\xi)$ – плотность распределения метрологической характеристики ξ , значения которой носят случайный характер; $\Phi[\bullet] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\bullet} e^{-0.5z^2} dz$ – интегральная функция нормированного нормального распределения; $G(t, \Delta)$ – функция дрейфа метрологических характеристик; t – длительность эксплуатации СИ.

Коэффициент метрологической исправности СИ $K_{\text{МИ}}(t)$ как отношение математического ожидания времени пребывания (наработки) СИ в метрологически исправном состоянии за некоторый интервал времени (за некоторую наработку) t к длительности этого интервала τ (к значению этой наработки) вычисляется с помощью следующего выражения [3]:

$$K_{\text{МИ}}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P_{\text{МИ}}(\tau) d\tau = \frac{1}{t} \int_0^t [\Phi(G(\tau, \Delta)) - \Phi(G(\tau, -\Delta))] d\tau. \quad (2)$$

В зависимости от рассматриваемого периода времени эти коэффициенты могут характеризовать метрологическую надежность до первой периодической поверки или калибровки либо между периодическими поверками или калибровками, т.е. без учета или с учетом эффекта периодического восстановления метрологической исправности СИ.

При рассмотрении АКМО, состоящего из n СИ, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

$$K_{\text{МИ}}^* \geq \frac{K_{\Gamma}^*}{\prod_{i=1}^{n-1} K_{\Gamma_i}^*},$$

где $K_{\text{МИ}}^*$ – коэффициент метрологической исправности комплекса; K_{Γ}^* – коэффициент готовности комплекса; $K_{\Gamma_i}^*$ – коэффициент готовности i -го СИ:

$$P^* \geq \frac{P^*(t)}{\prod_{i=1}^{n-1} P_i(t)},$$

где P^* – нормируемое значение вероятности выполнения измерительной задачи; $P^*(t)$ – вероятность безотказной работы комплекса; $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го СИ, входящего в комплекс.

Необходимо учесть, что погрешность измерений включает в себя не только основную погрешность СИ, но и другие составляющие (методическую погрешность измерений, дополнительные погрешности СИ и т.д.), и, следовательно, измерительная задача может быть выполнена и неисправным СИ [3]. Тогда нормируемое значение вероятности выполнения измерительной задачи будет равняться

$$P^* = K_{\text{МИ}} P_{\text{И}} + (1 - K_{\text{МИ}}) P_{\text{Н}},$$

где $P_{\text{И}}$, $P_{\text{Н}}$ – условные вероятности выполнения измерительной задачи при условии, что СИ метрологически исправно или неисправно соответственно.

Рассмотрим подход к построению интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности АКМО, повышающей вероятность выполнения измерительной задачи за счет автоматической коррекции погрешности измерений, возникающей в результате воздействия ДФ.

Построение интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности

На современном этапе развития индустрии появляются современные методы повышения метрологической надежности за счет износостойких материалов, совершенствования элементной базы, применения встроенных в датчиково-преобразующую аппаратуру микропроцессоров, а также разработки интеллектуальных измерительных систем (ИИС). В работе [4] под ИИС понимают адаптивную измерительную систему с функцией метрологического самоконтроля, которая может быть построена на основе:

- интеллектуальных датчиков;
- информационно-избыточных датчиков, подключенных к устройству обработки сигналов;

- пространственно разнесенных датчиков одной и той же величины, из которых один имеет более высокую точность и формирует принятое опорное значение;
- пространственно разнесенных, близких по точности датчиков одной и той же величины, формирующих принятое опорное значение на основе среднеарифметического значения выходных сигналов;
- датчиков, измеряющих различные величины, связь между которыми в технологическом процессе известна с требуемой точностью.

При этом ИИС может обеспечивать:

- автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия ДФ или старения;
- в ряде случаев самовосстановление при возникновении единичного дефекта;
- самообучение с целью оптимизации параметров и алгоритмов работы.

Концептуальная модель проектирования интеллектуальной измерительной системы контроля (ИИСК) метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания представлена на рис. 1. Она содержит информацию о задачах и стратегиях проектирования, рисках, видах обеспечения ИИСК в зависимости от предметной области, измерительной и информационной ситуации.

В концептуальной модели предусмотрены следующие проблемы, которые обуславливают риски при проектировании:

- сложность ИИСК, результаты проектирования которой можно оценить на этапе получения определяемых параметров на основе анализа их точности;
- дополнительные затраты на коррекцию проекта – проектирования ИИСК в случае неудовлетворительных результатов;
- конфликтная ситуация: творчество и дисциплина в коллективе, реализующем проектирование ИИСК [5].



Рис. 1. Концептуальная модель проектирования ИИСК

Структура ИИСК метрологической надежности АКМО (рис. 2) включает в себя следующие элементы: интеллектуальные датчики (ИД), учитывающие ДФ, как внешние (температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность, уровень радиоактивного фона, уровень электромагнитного поля и т.п.), так и внутренние (время эксплуатации СИ, температура печатной платы СИ и т.п.); аналого-цифровой преобразователь (АЦП); персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ); базу знаний (БЗ) дрейфа метрологических ха-

рактических, основанную на экспертной системе, базе данных технических характеристик СИ, базе данных статистических отказов СИ и т.д., над актуализацией БЗ работает группа экспертов (Э) и инженеров по знаниям (ИЗ); блок нечеткого логического вывода (БНЛВ); блок корректировки (БК) выходного сигнала с учетом воздействий ДФ; блок принятия решения (БПР); пользовательский интерфейс (ПИ), самого пользователя (П). При построении ИИСК необходимо обеспечить максимальный уровень клиаративности пользователя (его способности к понимаемому восприятию, переработке и усвоению информации) с целью повышения вероятности выполнения метрологической задачи.

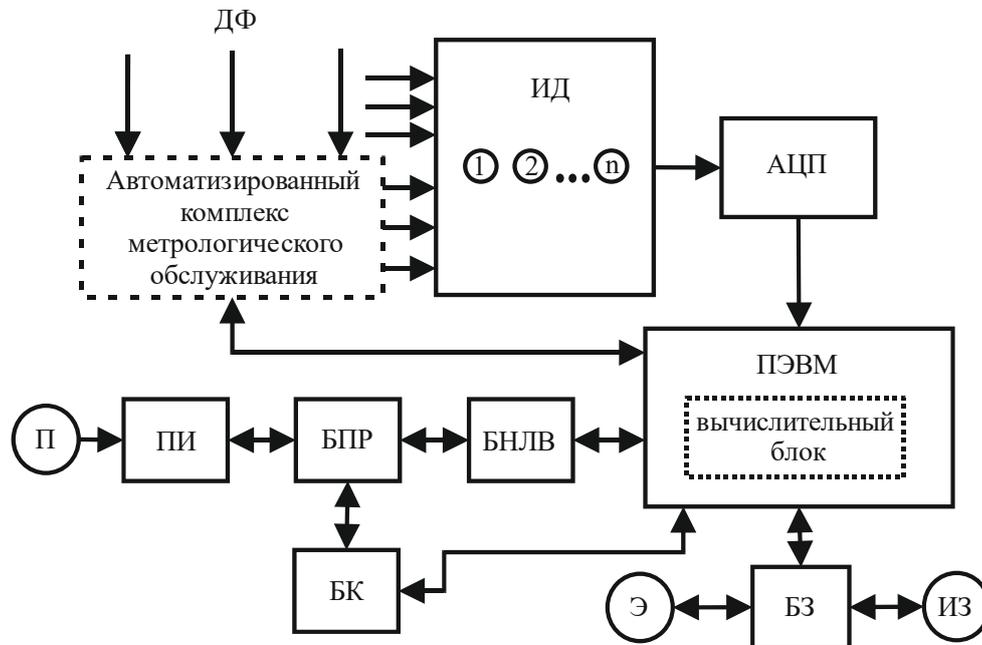


Рис. 2. Структура ИИСК метрологической надежности АКМО

Анализ современных образцов ИИСК, в структуру которых входят первичные преобразователи (аналоговые датчики), АЦП и вычислительная машина (микроЭВМ или ПЭВМ), показывает, что [6]:

1. Инструментальная погрешность аналого-цифрового преобразования в худшем случае не превышает погрешности квантования (для 12-разрядного АЦП это составит не более 0,005 %) [7]. Эта погрешность неизменна во времени и может быть учтена в программном обеспечении расчетов результатов измерений. Температурная погрешность канала аппаратной обработки измерительной информации может быть снижена до весьма малых величин термостатированием либо программной автокоррекцией. В последних разработках ИИСК предусмотрена возможность определения индивидуальных функций влияния температуры на различные узлы системы: дрейф нуля усилителей постоянного тока, сопротивление коммутаторов, коэффициенты передачи различных структурных элементов. Коррекция производится автоматически. Аналогично снижают и частотную погрешность [8].

2. Погрешности расчетов с помощью ЭВМ сводятся практически к погрешности округления и могут быть пренебрежимо малы.

3. Слабым звеном в этой цепи являются первичные преобразователи, погрешности которых в зависимости от типа датчика лежат в диапазоне от десятых долей до единиц и более процентов [9]. Кроме того, многие датчики нестабильны во времени, стареют, имеют гистерезис, подвержены влиянию внешних возмущающих факторов, имеют разброс параметров в партии, требуют индивидуальной калибровки и т.п.

Таким образом, погрешности измерений в современных ИИСК определяются практически погрешностями первичных преобразователей (датчиков) и именно проблемы с датчиками обычно приводят к метрологическим отказам ИИСК.

Очевидно, что минимизация погрешностей первичного преобразования может быть достигнута путем совершенствования принципов и технологий изготовления как самих датчи-

ков, так и за счет оригинальных схемотехнических решений построения каналов первичной обработки измерительной информации.

На рис. 3 представлена обобщенная структурная схема, иллюстрирующая минимальный набор необходимых функциональных блоков любого интеллектуального датчика (ИД) [10]. Аналоговые сигналы, поступающие с первичных преобразователей, усиливаются и преобразуются в цифровую форму. На основании этих сигналов и сохраненных в постоянном запоминающем устройстве данных калибровки микроконтроллер корректирует полученные от первичного преобразователя значения измеряемой (или связанной с ней) величины и переводит их в требуемые единицы измерения. Таким образом компенсируется погрешность, вызванная влиянием температуры, дрейфом нуля и т.п. Кроме того, микроконтроллер контролирует состояние элементов первичного преобразователя и оценивает достоверность результата измерения. Обработанная цифровая информация передается посредством цифрового интерфейса и реализованных коммуникационных протоколов пользователю, который, в свою очередь, имеет возможность настраивать параметры датчика (пределы измерения и т. п.) и запрашивать дополнительную информацию о состоянии датчика и результатах измерений.

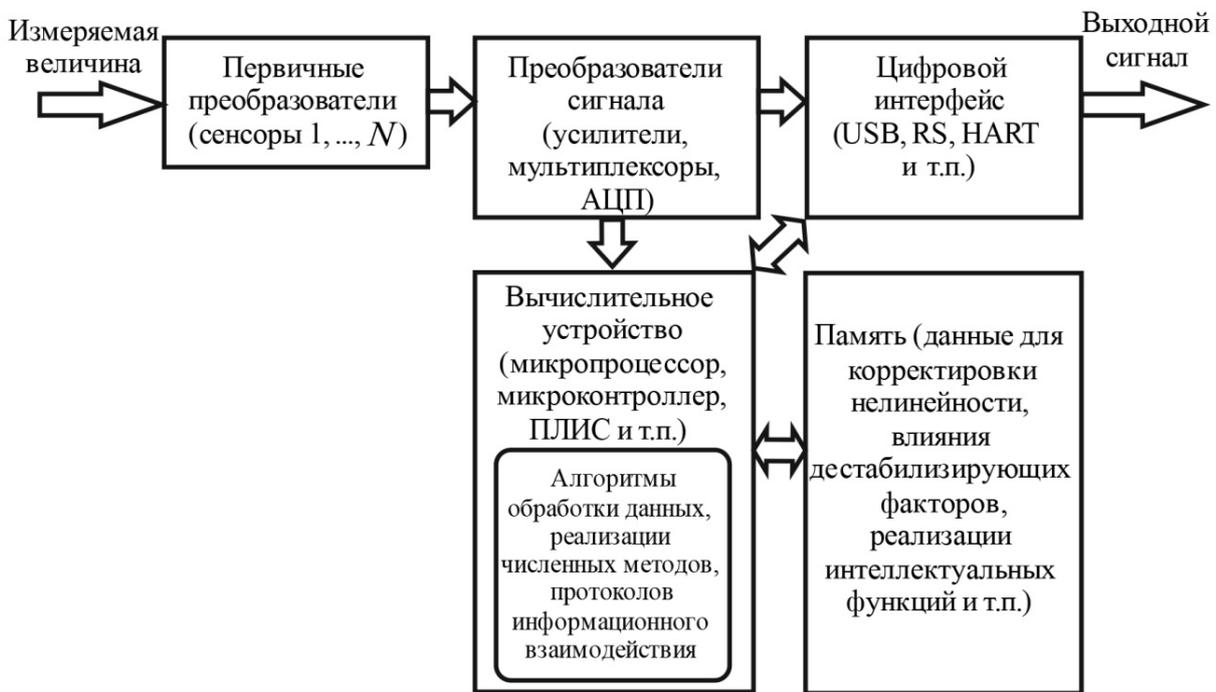


Рис. 3. Структурная схема интеллектуального датчика

Для обеспечения точности и достоверности получаемой измерительной информации от измерительных датчиков ИИСК метрологической надежности АКМО предлагается использовать в составе ИИСК интеллектуальные датчики, желательно с минимальной структурной избыточностью. На рис. 4 представлена схема интеллектуального минимально-избыточного датчика при воздействии на него неизвестных ДФ $\xi(t)$ и выходного шума $\mu(t)$.

Здесь статическая характеристика основного канала структурно-избыточного датчика (СИД) описывается с помощью линейного полиномиального выражения

$$y_1(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t), \quad (3)$$

где параметры $a_0(\xi)$ и $a_1(\xi)$ являются нестабильными и зависят от влияния неизвестных ДФ $\xi(t)$.

При использовании в дополнительном канале предварительного функционального преобразования степени m статическая характеристика данного канала будет выглядеть следующим образом [11]:

$$y_2(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x^m(t). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) при наблюдаемых выходных сигналах $y_1(t)$ и $y_2(t)$ представляют собой систему из двух уравнений с тремя неизвестными $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ и $x(t)$. Для ее решения необходимо иметь еще одно уравнение. Учитывая зашумленность реальных сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ при воздействии на них шума $\mu(t)$, третье уравнение (уравнение связи) представим в виде регрессионной зависимости между сигналами $y_2(t)$ и $y_1(t)$:

$$y_2(t) = b_0 + b_1 y_1(t) + \dots + b_m y_1^m(t), \quad (5)$$

где коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_m находятся с помощью обработки результатов временных отсчетов

$$[y_2(t_i), y_1(t_i)], i = 1, 2, \dots, N, N > m + 1, \quad (6)$$

по методу наименьших квадратов (МНК).

По найденным коэффициентам b_0, b_1, \dots, b_m определяются искомые параметры $a_0(\xi)$ и $a_1(\xi)$ [11].

Условием идентифицируемости параметров $a_0(\xi)$ и $a_1(\xi)$ при неизвестном входном сигнале $x(t)$ является неравенство нулю определителя информационной матрицы Фишера МНК – оценок коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_m в выражении (5).

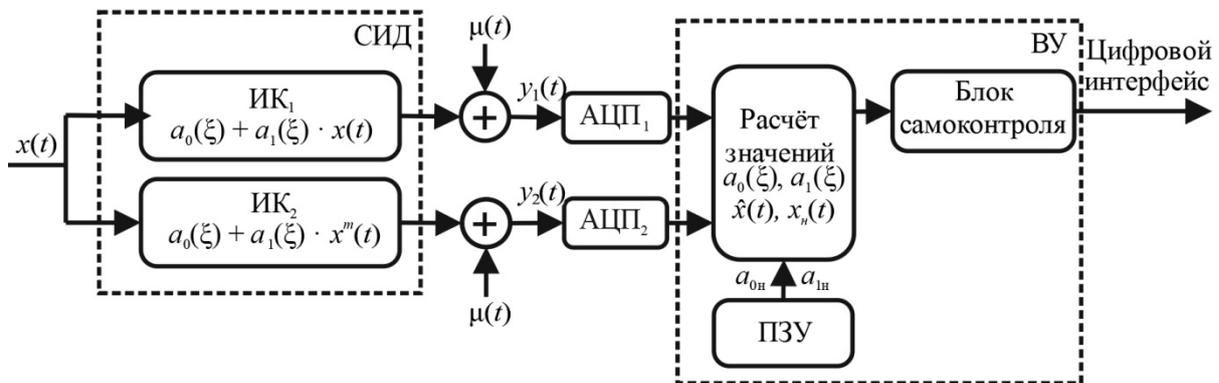


Рис. 4. Схема интеллектуального минимально-избыточного датчика: ИК – измерительный канал, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

В процессе метрологического самоконтроля в блоке самоконтроля ИД могут вычисляться и сравниваться с заданными допусками как абсолютная $\Delta_n(t) = x_n(t) - \hat{x}(t)$ или среднеквадратическая σ_x погрешности измерения входного сигнала $x(t)$, так и допустимые значения дрейфа нуля $\Delta a_0(\xi) = a_0(\xi) - a_{0н}$ и дрейфа коэффициента чувствительности $\Delta a_1(\xi) = a_1(\xi) - a_{1н}$. Кроме того, может оцениваться и сравниваться с допустимыми пределами величина остаточной погрешности расчета $\hat{x}(t)$.

Здесь величины $a_{0н}$ и $a_{1н}$ означают номинальные значения параметров статической линейной характеристики СИД, полученные при его калибровке, $x_n(t)$ – значение входного сигнала $x(t)$, рассчитанное с помощью коэффициентов $a_{0н}$ и $a_{1н}$, т.е. без введения структурной избыточности, $\hat{x}(t)$ – более точное значение входного сигнала $x(t)$, рассчитанное с помощью параметров $a_0(\xi)$ и $a_1(\xi)$ с учетом введения структурной избыточности и предварительного нахождения коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_m .

Применение интеллектуальных минимально-избыточных датчиков при построении ИИСК метрологической надежности АКМО позволит существенно снизить стоимость системы с обеспечением необходимой точности и достоверности получаемых данных. При этом интеллектуальные датчики должны оставаться метрологически исправными при воздействии на них дестабилизирующих факторов до показателей предельных условий эксплуатации АКМО [12].

Заключение

Рассмотренный подход к построению интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания позволяет обеспечить выполнение измерительной задачи в условиях воздействия на АКМО различного рода дестабилизирующих факторов. При этом ИИС остается устойчивой к воздействию дестабилизирующих факторов за счет применения интеллектуальных датчиков с минимальной структурной избыточностью. Применение интеллектуальных датчиков с предложенной структурой позволяет охватить максимальное количество дестабилизирующих факторов воздействия как внешних, так и внутренних, за счет их миниатюризации и простоты построения. Это, несомненно, повысит уровень метрологической надежности АКМО и снизит вероятность появления ошибок второго рода.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2016–06–21. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 23 с.
2. Фридман, А. Э. Теория метрологической надежности : дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.15 : защищена 13.01.1995. – Санкт-Петербург, 1995. – 416 с.
3. ГОСТ 8.825–2013. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Введ. 2013–09–06. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 9 с.
4. Селиванова, З. М. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, А. А. Самохвалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273–282.
5. Коробов, В. М. Повышение метрологической надежности информационно-измерительных систем / В. М. Коробов // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Экономика. Право. Управление. – 2013. – № 3. – С. 189–195.
6. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация, сертификация : учеб. пособие / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – Москва : Логос, 2003. – 536 с.
7. Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Раннев. – Москва : Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
8. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин : учеб. пособие / А. О. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров, В. Н. Котов, О. Н. Негоденко. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
9. Козырев, Г. И. Методы идентификации средств телеизмерений в условиях воздействия неопределенных дестабилизирующих факторов / Г. И. Козырев. – Санкт-Петербург : ВКА, 1996. – 90с.
10. Белозубов, Е. М. Метрологический самоконтроль интеллектуальных датчиков измерительных и управляющих систем / Е. М. Белозубов, В. А. Васильев, П. С. Чернов // Измерительная техника. – 2018. – № 7. – С. 11–17.
11. Козырев, Г. И. Метод текущей идентификации измерительных систем на основе предварительного функционального преобразования / Г. И. Козырев, С. В. Шкляр, А. В. Назаров // Автоматика и вычислительная техника. – 2000. – № 6. – С. 22–28.
12. Кравцов, А. Н. Метрология : учебник для студентов вузов / А. Н. Кравцов, А. Н. Дорохов, Р. О. Лавров. – Санкт-Петербург : ВКА, 2019. – 315 с.

References

1. GOST 27.002–2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya. Vved. 2016–06–21* [GOST 27.002–2015. Reliability in technology. Terms and definitions. – Enter. 2016–06–21]. Moscow: Standartinform, 2016, 23 p. [In Russian]
2. Fridman A. E. *Teoriya metrologicheskoy nadezhnosti: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.11.15: zashchishchena 13.01.1995* [The theory of metrological reliability of diss. ... d-ra tekhn. date: 05.11.15]. Saint-Petersburg, 1995, 416 p. [In Russian]
3. GOST 8.825–2013. *Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Vved. 2013–09–06* [GOST 8.825–2013. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Enter. 2013–09–06]. Moscow: Standartinform, 2014, 9 p. [In Russian]
4. Selivanova Z. M., Samokhvalov A. A. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2010, vol. 16, no. 2, pp. 273–282. [In Russian]
5. Korobov V. M. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Pravo. Upravlenie* [Bulletin of Pskov state University. Ser.: Economics. Right. Management]. 2013, no. 3, pp. 189–195. [In Russian]

6. Sergeev A. G., Latyshev M. V., Teregerya V. V. *Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya: ucheb. posobie* [Metrology, standardization, certification: textbook]. Moscow: Logos, 2003, 536 p. [In Russian]
7. Rannev G. G. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy* [Measuring information systems: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2010, 336 p. [In Russian]
8. Ageev A. O., Mamikonova V. M., Petrov V. V., Kotov V. N., Negodenko O. N. *Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin: ucheb. posobie* [Microelectronic converters of non-electric quantities: textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 153 p. [In Russian]
9. Kozyrev G. I. *Metody identifikatsii sredstv teleizmereniy v usloviyakh vozdeystviya neopredelennykh destabiliziruyushchikh faktorov* [Methods for identifying means of tele-measurement under the influence of uncertain destabilizing factors]. Saint-Petersburg: VKA, 1996, 90 p. [In Russian]
10. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Chernov P. S. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2018, no. 7, pp. 11–17. [In Russian]
11. Kozyrev G. I., Shklyar S. V., Nazarov A. V. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika* [Automation and computer technology]. 2000, no. 6, pp. 22–28. [In Russian]
12. Kravtsov A. N., Dorokhov A. N., Lavrov R. O. *Metrologiya: uchebnik dlya studentov vuzov* [Metrology : textbook for university students]. Saint-Petersburg: VKA, 2019, 315 p. [In Russian]

Козырев Геннадий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

Kozyrev Gennadiy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of telemetric systems,
integrated processing and information protection,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Лавров Роман Олегович

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры
метрологического обеспечения вооружения,
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 9432923@mail.ru

Lavrov Roman Olegovich

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

Усиков Валентин Дмитриевич

адъюнкт,
кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: usikov_1989@list.ru

Usikov Valentin Dmitrievich

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

Образец цитирования:

Козырев, Г. И. Построение интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания вооружения и военной техники / Г. И. Козырев, Р. О. Лавров, В. Д. Усиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 16–24. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-2.

Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE MEASUREMENT PROCEDURE OF ANALOG-DIGITAL CONVERSION IN INFORMATION-MEASURING SYSTEMS IN THE EVALUATION OF THEIR METROLOGICAL RELIABILITY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является блок аналого-цифрового преобразователя в структуре информационно-измерительных систем. Предметом исследования является метрологическая надежность блока аналого-цифрового преобразователя в структуре информационно-измерительных систем. Целью работы является получение математического описания метрологической характеристики аналого-цифрового преобразователя на этапе его проектирования для прогнозирования метрологической надежности рассматриваемого блока. **Материалы и методы.** Рассмотрены два подхода к оценке МН АЦП: первый – с применением метода аналитико-вероятностного прогнозирования и второй – с применением метода метрологического анализа, основанного на использовании априорных знаний в виде уравнений измерений и математических моделей объектов, условий и средств измерений. **Результаты.** Использование метода аналитико-вероятностного прогнозирования позволило получить математическую модель основной погрешности одного из ведущих модулей в структуре блока АЦП. Построенная математическая модель позволит рассчитать показатели МН рассматриваемого модуля и в дальнейшем дать вероятностную оценку МН проектируемого блока в целом. Полученное математическое описание погрешности блока с применением уравнений измерений позволяет провести метрологический анализ и расчет основной погрешности исследуемого блока в различные моменты времени предстоящей эксплуатации и в перспективе также оценить показатели МН исследуемого блока. **Выводы.** Построение математических моделей исследуемых метрологических характеристик и проведение метрологического анализа с получением требуемых расчетных соотношений позволяет решить задачу оценки метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных систем.

A b s t r a c t. Background. The object of research is the block of the analog-to-digital Converter block in the structure of information and measurement systems. The subject of the study is the metrological reliability of the analog-to-digital Converter block in the structure of information and measurement systems. The purpose of this work is to obtain a mathematical description of the evaluation of the metrological characteristics of an analog-to-digital Converter at the design stage in order to predict the metrological reliability of the block under consideration. Methods. Two approaches to the estimation of ADC MN are considered: the first one us-

ing the method of analytical-probabilistic forecasting and the second one using the method of metrological analysis based on the use of a priori knowledge in the form of measurement equations and mathematical models of objects, conditions and measuring instruments. **Materials and methods.** Two approaches to the estimation of ADC MN are considered: the first one using the method of analytical-probabilistic forecasting and the second one using the method of metrological analysis based on the use of a priori knowledge in the form of measurement equations and mathematical models of objects, conditions and measuring instruments. **Results.** Using the analytical-probabilistic forecasting method, it was possible to obtain a mathematical model of the basic error of one of the leading modules in the ADC block structure. The constructed mathematical model will allow us to calculate the MN indicators of the module under consideration and in the future give a probabilistic assessment of the MN of the designed block as a whole. The obtained mathematical description of the block error with the use of measurement equations allows for metrological analysis and calculation of the total error of the block under study at various times of the upcoming operation and, in the future, also to evaluate the MN indicators of the block under study. **Conclusions.** Construction of mathematical models of the studied metrological characteristics and carrying out metrological analysis with obtaining the required calculation ratios allows us to solve the problem of evaluating the metrological reliability of the analog-to-digital conversion unit in the structure of information and measurement systems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: аналого-цифровой блок, метрологическая надежность, метрологический ресурс, метрологический анализ, информационно-измерительная система.

К e y w o r d s: analog-digital unit, metrological reliability, metrological resource, metrological analysis, information and measurement system.

Введение

Важнейшим показателем качества средств измерений, и в том числе информационно-измерительных систем (ИИС), является метрологическая надежность (МН), характеризующаяся способностью измерительных средств сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм при эксплуатации, техническом обслуживании и хранении.

Как известно, метрологическая надежность блоков, составляющих измерительный канал (ИК) информационно-измерительных систем, в конечном итоге однозначно определяет МН ИИС в целом. В современной структуре измерительного канала информационно-измерительных систем важное место занимает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который характеризуется высокой точностью, сложностью и важностью выполняемых функций [1]. Вопрос оценки показателей метрологической надежности данного блока является весьма важным для оценки МН ИИС в целом. Показателем метрологической надежности аналого-цифрового преобразователя в структуре информационно-измерительных систем является вероятность сохранения метрологической исправности в произвольный момент времени эксплуатации метрологический ресурс (МР), определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска [2, 9].

Определение указанных показателей метрологической надежности упомянутого выше блока и информационно-измерительных систем в целом на стадии их проектирования однозначно предполагает проведение метрологического анализа (МА), основанного на формировании аналитического описания исследуемых метрологических характеристик [4–7]. Как правило, в качестве исследуемых МХ, позволяющих определить искомый показатель МН аналогового блока (АБ), выступают относительная и абсолютная погрешности проектируемого блока [8]. Поэтому метрологический анализ направлен на определение требуемых математических соотношений для расчета погрешности рассматриваемого аналогового блока в процессе предстоящей эксплуатации. Очевидно, основным путем оценки метрологической надежности аналоговых блоков в рассматриваемых условиях является математическое моде-

лирование измерительной процедуры аналого-цифрового преобразователя, составляющей функциональную основу рассматриваемого блока. Расчет показателей метрологической надежности аналогового блока информационно-измерительных систем предполагает применение метрологического анализа на основе математического моделирования при реализации метода аналитико-вероятностного прогнозирования МН [9, 10]. Указанный метод основан на последовательном математическом моделировании выходной характеристики проектируемого блока, нормируемой метрологической характеристики, а также моделировании нестационарного случайного процесса изменения во времени исследуемой метрологической характеристики.

Материал и методика

Рассмотрим подход к оценке МН АЦП с применением метода аналитико-вероятностного прогнозирования. Структура АЦП представлена на рис. 1. Анализ представленной схемы АЦП, проведенный в работе [1], показал, что МН всего блока будет определяться МН аналоговых модулей, составляющих ИК: входной высокочастотной цепи, буферного усилителя и преобразователя напряжение-частота. Проведенные в работе [1] исследования показали, что основным модулем, имеющим доминирующее влияние на МН АЦП в целом, является модуль преобразования.

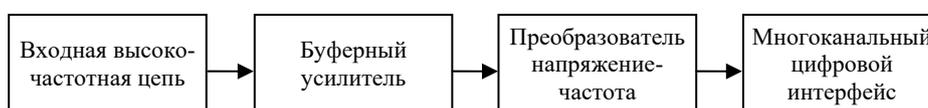


Рис. 1. Структура АЦП

Использование метода аналитико-вероятностного прогнозирования для оценки МР этого модуля предполагает:

- последовательное осуществление математического моделирования рассматриваемого модуля на основе анализа его структурной схемы;
- математическое моделирование основной относительной погрешности δ представляющей исследуемую МХ для данного блока;
- статистическое моделирование исследуемой МХ в различных временных сечениях области предстоящей эксплуатации модуля;
- построение ММ изменения во времени исследуемой МХ определяемой функцией временного изменения математического ожидания МХ $m_\delta(t)$ и функциями $\Psi_{\pm\sigma}(t)$, которые с учетом нормального закона распределения МХ и правилу «трех сигм» с доверительной вероятностью $P = 0,997$ характеризуют изменение границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения

$$\begin{cases} m_\delta(t); \\ \Psi_{\pm}(t) = m_\delta(t) \pm c\sigma_\delta(t), \end{cases} \quad (1)$$

где c – постоянный коэффициент, выбираемый в зависимости от заданного уровня доверительной вероятности; $\sigma_\delta(t)$ – среднеквадратическое отклонение МХ в произвольные моменты времени эксплуатации.

Математическая модель вида (1) позволяет рассчитать требуемые показатели МН: вероятность сохранения метрологической исправности и метрологический ресурс.

Построим математическую модель функционирования модуля преобразователя на основе анализа его структурной схемы, представленной на рис. 2, с применением методов расчетов электрических цепей. Работа представленного преобразователя напряжение-частота основана на принципе баланса зарядов. Ток $I_{вх}$, который пропорционален входному напряжению, поступает на резистор R_1 , при этом заряжая конденсатор C . По мере заряда конденсатора напряжение с выхода операционного усилителя возрастает. Пройдя через ноль по входу операционного усилителя, происходит срабатывание компаратора K и при этом формируется одиночный импульс с определенной длительностью t_{OS} , и в период прохождения импульса замыкается

ключ S . За данный промежуток времени ток $(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})$ проходит через конденсатор. Остаточное значение заряда, накопившегося в конденсаторе, за время прохождения импульса будет определяться $(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})t_{\text{OS}}$, когда ключ разомкнут конденсатор C накапливает энергию и возвращается к исходному значению. Впоследствии снова срабатывает компаратор в соответствии с описанным выше циклом. Таким образом, накопленный заряд в конденсаторе равен полученному заряду на каждом этапе:

$$(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})t_{\text{OS}} = I_{\text{вх}} \left(\frac{1}{f_{\text{вых}}} - t_{\text{OS}} \right), \quad (2)$$

где $f_{\text{вых}}$ – выходная частота; $I_{\text{оп}}$ – источник опорного тока.

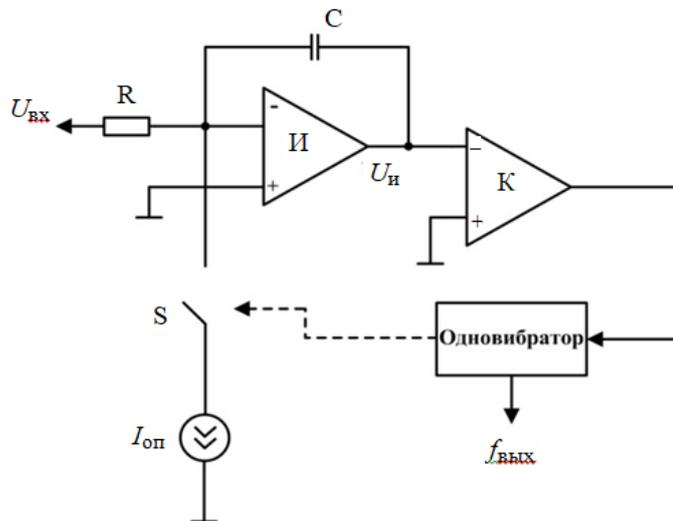


Рис. 2. Структура преобразователя напряжение-частота

Для исследования МР преобразователя вначале получим зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения.

Входной ток $I_{\text{вх}}$ пропорционален входному напряжению

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_1. \quad (3)$$

Произведем преобразования выражения (2) и с учетом $I_{\text{вх}}$ получим

$$f_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{OS}}}. \quad (4)$$

С учетом (3) уравнение (4) примет вид

$$f_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{OS}}}. \quad (5)$$

Параметры источника опорного тока определяются резистивными элементами R_6 , R_7 и задают рабочую точку для транзистора. Выражение, которое описывает работу данного источника, можно представить в виде выражения

$$I_{\text{оп}} = \frac{2U_{\text{п}} \frac{R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}}{R_8}, \quad (6)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания схемы (в данном случае ± 15 В); $U_{\text{БЭ}}$ – напряжение падения на $(p-n)$ -переходе транзистора VT2 ($\approx 0,7$ В).

Длительность импульса одновибратора в основном определяется постоянной времени цепочки C_3R_3

$$t_{OS} = C_3R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OYmax}} \right) \right], \quad (7)$$

где U_{VD1} – напряжение падения на открытом диоде ($\approx 0,7$ В); U_{OYmax} – максимальное выходное напряжение ОУ.

С учетом (6) и (7) преобразуем выражение (5) и запишем зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения:

$$f_{вых} = \frac{U_{вх}}{R_1 \frac{U_{п} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}}{R_8}} \frac{1}{C_3R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OYmax}} \right) \right]}. \quad (8)$$

Нормируемая МХ исследуемого преобразователя вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{f_{вых.изм} - f_{вых.расч}}{f_{вых.расч}}, \quad (9)$$

где $f_{вых.изм}$, $f_{вых.расч}$ – измеренное и рассчитанное значения выходной частоты.

Условие сохранения метрологической исправности записывается в виде

$$|\delta(t)| < |\delta_{доп.}| \quad (10)$$

Зависимость напряжения от частоты имеет линейный характер. С учетом этого выражение для определения коэффициента преобразования можно записать в виде

$$K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{п} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}}{R_8}} \frac{1}{C_3R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OYmax}} \right) \right]}. \quad (11)$$

Окончательно математическая модель нормируемой МХ модуля преобразования имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta = \frac{K_{pном} - K_p(t)}{K_{pном}}; \\ K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{п} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}}{R_8}} \frac{1}{C_3R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OYmax}} \right) \right]}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Полученная математическая модель основной относительной погрешности проектируемого модуля в дальнейшем используется для формирования базы данных по изменению во времени исследуемой МХ в процессе предстоящей эксплуатации с применением процедуры статистического моделирования согласно работе [1]. Результатом рассматриваемой процедуры будет являться математическая модель изменения во времени МХ вида (1), которая позволяет оценить требуемые показатели МН рассматриваемого модуля преобразования на этапе его проектирования. Учитывая доминирующую роль этого модуля в структуре АЦП, в дальнейшем по значениям полученных показателей МН можно оценить МН АЦП в целом.

Другим подходом к решению задачи оценки МН проектируемых АЦП в структуре ИИС является применение метрологического анализа, основанного на использовании априорных

знаний в виде уравнений измерений и математических моделей объектов, условий и средств измерений [3]. Проведение МА дает возможность сформировать формализованное описание процедуры аналого-цифрового преобразования, исходя из функционального назначения рассматриваемого блока и определения этапов соответствующих последовательных преобразований в нем. Здесь используется существующий в математической метрологии принцип получения формализованного описания процедуры измерений путем проведения исследований измерений от простых к сложным.

Рассмотрим описание процедуры аналого-цифрового преобразования. Уравнение измерений для этой процедуры имеет вид

$$u_j^* = R_{\text{сч}} R_{\text{м}} R_{\text{к}} R_{\text{д}} u_j^*(t), \quad (13)$$

где $R_{\text{д}}$, $R_{\text{к}}$, $R_{\text{сч}}$, $R_{\text{м}}$ – операторы дискретизации, квантования, считывания и масштабирования соответственно; u_j – результат измерения входного сигнала u_j .

Аналого-цифровое преобразование можно рассматривать как измерительную процедуру, содержащую необходимый минимум измерительных преобразований: масштабирование, дискретизацию и квантование. Тогда уравнение измерений примет вид

$$u_j^* = R_{\text{м}} R_{\text{к}} R_{\text{д}} u_j^*(t). \quad (14)$$

С учетом аппарата математической метрологии [3], основанного на использовании разложения абсолютной погрешности измерения на компоненты основных элементарных преобразований в АЦП, можно получить оценку полной погрешности с учетом указанных трех основных компонент.

Абсолютная погрешность из-за отличия реализуемого коэффициента масштабирования (нормализации) a_j от номинального $a_{\text{н}}$ ($\Delta a_j = a_j - a_{\text{н}}$):

$$\Delta_a u_j^* = a_j u_j / a_{\text{н}} - u_j = \Delta a_j u_j / a_{\text{н}}, \quad (15)$$

где a_j и $a_{\text{н}}$ – реализуемый и номинальный коэффициенты масштабирования (нормализации); u_j – истинное значение измеряемой величины; α , $\Delta t_{\text{д}}$ – параметры дискретизации и q – рядность квантования.

Абсолютная погрешность из-за отличия дискретизации от гипотетической:

$$\Delta_{\text{д}} u_j^* = a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_{\text{д}}}) / a_{\text{н}} - a_j u_j / a_{\text{н}} = -e^{-\alpha \Delta t_{\text{д}}} a_j u_j / a_{\text{н}}. \quad (16)$$

Абсолютная погрешность из-за отличия идеального равномерного квантования от гипотетического:

$$\Delta_{\text{к}} u_j^* = E \left[a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_{\text{д}}}) / \Delta_{\text{к}}^{\text{н}} u + 1/2 \right] \Delta_{\text{к}}^{\text{н}} u / a_{\text{н}} - a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_{\text{д}}}) / a_{\text{н}}, \quad (17)$$

где $\Delta_{\text{к}}^{\text{н}}$ – идеальный интервал квантования.

Таким образом, на основании выражений (15)–(17) аналитическое описание, определяющее абсолютную погрешность процедуры аналого-цифрового преобразования, имеет вид

$$\Delta u_j^* = \Delta_a u_j^* + \Delta_{\text{д}} u_j^* + \Delta_{\text{к}} u_j^*. \quad (18)$$

Результаты

Полученные с применением выбранных подходов априорные знания используются для формализованного представления исследуемой МХ. Выражение (18) представляет математическое описание, позволяющее провести расчет абсолютной погрешности исследуемого блока в различные моменты времени предстоящей эксплуатации и в конечном итоге аналогично выражению (12) провести оценку выбранных показателей МН исследуемого блока на этапе его проектирования.

Заклучение

Таким образом, построение математических моделей исследуемых метрологических характеристик, проведение метрологического анализа с получением требуемых расчетных соотношений в конечном итоге позволяет решить задачу оценки метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных систем.

Библиографический список

1. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносков, М. А. Каменская, // Вестник Тамбовского государственного технологического университета. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 180–189. – DOI 10.17277/vestnik.2019.02.pp.180-189.
2. Екимов, А. В. Надежность средств измерительной техники / А. В. Екимов, М. И. Ревяков. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
3. Коровайцев, А. А. Информационно-энтропийный подход к оценке метрологического ресурса средств измерений / А. А. Коровайцев, М. И. Ломакин, А. В. Сухов // Измерительная техника. – 2014. – № 6. – С. 14–18.
4. Селиванова, З. М. Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4. – С. 13–19.
5. Чернышова, Т. И. Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносков // Вестник Тамбовского государственного технологического университета – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 589–594.
6. Чернышова, Т. И. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий : монография / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – Санкт-Петербург : Экспертные решения, 2016 – 384 с.
7. Голиков, Д. О. Микроволновый метод и измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Д. О. Голиков, А. В. Чернышов, М. В. Жарикова // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – Вып. II. – С. 230–234.
8. Чернышов, В. Н. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, Д. О. Голиков // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 11. – С. 34–41.
9. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
10. Шевчук, В. П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем / В. П. Шевчук. – Москва : Физматлит, 2013. – 320 с.

References

1. Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu., Kamenskaya M. A. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technological University]. 2019, vol. 25, no. 2, pp. 180–189. DOI 10.17277/vestnik.2019.02.pp.180-189. [In Russian]
2. Ekimov A. V., Revyakov M. I. *Nadezhnost' sredstv izmeritel'noy tekhniki* [The reliability of measuring instruments]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 208 p. [In Russian]
3. Korovaytsev A. A., Lomakin M. I., Sukhov A. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2014, no. 6, pp. 14–18. [In Russian]
4. Selivanova Z. M., Khoan T. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4, pp. 13–19. [In Russian]
5. Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technological University]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 589–594. [In Russian]
6. Chernyshova T. I., Chernyshov V. N. *Metody i informatsionno-izmeritel'nye sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy: monografiya* [Methods and information-measuring systems for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products: monograph]. Saint-Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2016, 384 p. [In Russian]
7. Golikov D. O., Chernyshov A. V., Zharikova M. V. *Problemy tekhnogennoy bezopasnosti i ustoychivogo razvitiya: sb. nauch. st. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Problems of technogenic safety and

sustainable development: collection of scientific articles of young scientists, postgraduates and students]. Tambov: Izd-vo GOU VPO «TGTU», 2011, iss. II, pp. 230–234. [In Russian]

8. Chernyshov V. N., Chernyshov A. V., Golikov D. O. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2010, no. 11, pp. 34–41. [In Russian]
9. Tsvetkov E. I. *Metrologiya. Modeli ob"ektov, protsedur i sredstv izmereniy. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models of objects, procedures, and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2014, 293 p. [In Russian]
10. Shevchuk V. P. *Modelirovanie metrologicheskikh kharakteristik intellektual'nykh izmeritel'nykh priborov i sistem* [Modeling of metrological characteristics of intelligent measuring devices and systems]. Moscow: Fizmatlit, 2013, 320 p. [In Russian]

Курнос Роман Юрьевич

старший преподаватель,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: romankurnosov@yandex.ru

Kurnosov Roman Yur'evich

senior lecturer,
sub-department of design of radio-electronic
and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Чернышова Татьяна Ивановна

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: dekan_chti@mail.ru

Chernyshova Tat'yana Ivanovna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design of radio-electronic
and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Образец цитирования:

Курнос, Р. Ю. Метрологический анализ измерительной процедуры аналого-цифрового преобразования в информационно-измерительных системах при оценке их метрологической надежности / Р. Ю. Курнос, Т. И. Чернышова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 25–32. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-3.

О. Е. Безбородова, А. Г. Убиенных, В. В. Шерстнев, О. Н. Бодин

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

О. Е. Bezborodova, A. G. Ubiennykh, V. V. Sherstnev, O. N. Bodin

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF IMPROVEMENT OF INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Оценка результатов совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем является важной задачей для специалистов. Учитывая, что такие системы могут быть построены на основе различных подходов и принципов, эта оценка необходима для сравнения и выбора лучшего из предлагаемых вариантов. На эту тему существует большое количество научных работ, но единого подхода пока нет. Анализ существующих источников приводит к выводу, что задача оценки результатов совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем с точки зрения перспективы их использования является весьма актуальной. В статье предлагается метод, основанный на использовании взаимосвязи понятий «результативность» и «эффективность». **Материалы и методы.** В работе использованы качественный и количественный анализ результатов совершенствования систем, метод весовых коэффициентов. **Результаты.** Проведен анализ существующих методов оценки результатов совершенствования систем, большое внимание уделено выбору показателей и параметров для оценки, их взаимосвязи. Обоснован перечень показателей и параметров их характеризующих, предложена шкала оценки показателей. Предложен алгоритм оценки эффективности результатов научно-исследовательских работ. Приведены примеры оценки совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем. **Выводы.** Предложенный метод позволяет провести оценку результатов совершенствования систем, которая может использоваться для определения целесообразности их дальнейшего использования.

A b s t r a c t. Background. Evaluating the results of improving information-measuring and control systems is an important task for specialists. Given that such systems can be built on the basis of different approaches and principles, this assessment is necessary to compare and choose the best of the proposed options. There is a large number of scientific papers on this topic, but there is no unified approach yet. Analysis of existing sources leads to the conclusion that the task of evaluating the results of improving information-measuring and control systems from the perspective of their use is very relevant. The article proposes a method based on the use of the relationship between the concepts of "effectiveness" and "efficiency". **Materials and methods.** The paper uses qualitative and quantitative analysis of the results of improving systems, the method of weight coefficients. **Results.** The article analyzes the existing methods for evaluating the results of improving systems. much attention is paid to the choice of indicators and parameters for evaluation, their relationship. The list of indicators and parameters that characterize them is justified, and a scale for evaluating indicators is proposed. An algorithm for evaluating the effectiveness of research results is proposed. Examples of evaluating the im-

provement of information-measuring and control systems are given. **Conclusions.** The proposed method allows us to evaluate the results of improving systems, which can be used to determine the feasibility of their further use.

К л ю ч е в ы е с л о в а: эффективность, результативность, ресурсы, усовершенствование, система.

К e y w o r d s: efficiency, effectiveness, resources, improvement, system.

Актуальность

Вопросы экономного использования ресурсов и совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем (далее – систем) должны решаться с учетом выполнения одновременно требований надежности, экономичности, масштабируемости и конфигурируемости. Применяемые при построении системы решения должны отвечать требованиям информационной безопасности и иметь запас для расширения функциональности системы и ее перспективного развития.

Известно, что наука является наиболее эффективной сферой капиталовложений. В мировой практике принято считать, что прибыль от капиталовложений в науку составляет 100–200 %, что намного выше прибыли во многих отраслях промышленности [1]. Учитывая важную роль, которую играют научно-технические достижения в социально-экономическом развитии общества, подавляющее большинство ведущих мировых государств разрабатывают национальные программы создания прорывных научно-технических технологий. В России такой программой является Дорожная карта поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ «Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии "Новые производственные технологии"» [2], согласно которой востребованы решения в области: «мобильных цифровых устройств, оснащенных модулями беспроводной связи для получения и передачи данных; программного обеспечения для получения, обработки и передачи информации, получаемой как от датчиков, встроенных в устройство, так и от сторонних источников, компоненты системы эксплуатируются в доверенной среде, устойчивы к отказам и попыткам несанкционированного доступа».

Наиболее используемыми параметрами для оценки результатов научных исследований являются «эффективность» и «результативность». Как синонимы их используют для оценки «новизны» предлагаемых решений. Развитие этой методологии в теоретическом плане рассмотрено в исследовании А. В. Бондаренко «О сущности понятий «результативность» и «эффективность» в экономике» [3], а в работе [4] рассмотрено с учетом специфики области применения. В настоящее время методология использования этих понятий совершенствуется в системе стандартов менеджмента качества [5, 6].

Анализ существующих источников показывает, что задача оценки результатов совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем с точки зрения перспективы их использования является весьма актуальной.

Постановка проблемы

Оценка эффективности усовершенствования системы связана с определением величины результативности, т.е. степени достижения запланированных результатов и осуществления действий, направленных на их достижение. Эффективность используется для оценки, контроля и регулирования соответствующей деятельности. Она является наглядным показателем превосходства предлагаемого варианта системы по отношению к прототипу.

Однако в известных источниках не предлагаются методики оценки эффективности как системы в целом, так и отдельных показателей. Поэтому вопросы, связанные с проблемой адекватной и объективной оценки, а также последующего анализа эффективности, приобретают вид задачи как теоретической, так и практической значимости, и каждый исследователь сталкивается с необходимостью выбора своего способа определения эффективности. Это происходит потому, что для определения величины результативности есть достоверные методики, а для оценки эффективности таких методик нет [7]. Авторами предлагается определять эффективность усовершенствования системы, используя методику определения результативности.

Эффективность всей системы складывается из повышения эффективности отдельных показателей. Показатели характеризуются параметрами, которые должны быть определены как числовые величины, характеризующие функционирование самой системы.

Таким образом, для установленных показателей и параметров необходимо определить методику их вычисления (формулу расчета).

Количественные значения выбранных показателей результативности определяют исходя из методики, установленной для нахождения каждого показателя.

Показатели результативности и эффективности усовершенствованной системы можно классифицировать по природе происхождения: технические, технологические, экономические, организационно-управленческие, административные и пр. При этом каждый из них будет характеризоваться одним или несколькими параметрами. Например, быстродействие относится к техническим показателям и характеризуется параметром «количество операций за единицу времени».

При составлении перечня показателей необходимо отдать предпочтение тем из них, которые характеризуются параметрами, подлежащими количественному определению, что облегчает сравнение результатов, полученных для прототипа и усовершенствованной системы. Примеры выбора показателей и характеризующих их параметров в зависимости от функций систем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели и параметры для оценки эффективности усовершенствования системы

Функции системы	Анализируемый показатель	Характеризующий параметр
Измерение	Точность	Погрешность
		Неопределенность результата измерения
Контроль	Механические	Масса (вес), длина, ширина, высота, толщина и пр.
	Гидродинамические	Давление и пр.
	Акустические	Уровни шума, вибрации и пр.
	Оптические	Яркость, освещенность и пр.
	Электрические	Напряжение, сила тока, сопротивление, проводимость, емкость, индуктивность и пр.
	Химические	Концентрация примесей и пр.
Оценка	Интервальные оценки	Доверительная вероятность, уровень значимости, доверительный интервал, доверительные границы
Работа системы	Быстродействие	Количество операций за единицу времени
	Коэффициент полезного действия	Энергопотребление, ресурсопотребление, материалоемкость и пр.
	Надежность	Вероятность безотказной работы, наработка на отказ
	Неопределенность внешней обстановки	Вероятность события
	Оперативность управления	Время принятия решения

Таким образом, показатели и параметры, выбранные для оценки эффективности системы, должны иметь количественные значения, которые могут быть определены по известным методикам и которыми можно было бы воспользоваться на практике для сравнения различных вариантов систем. Эти параметры должны отвечать следующим требованиям: быть функцией всех важнейших характеристик системы, отражать качество выполнения системой поставленных функций и задач, иметь простой физический смысл.

Теоретическое обоснование

Для подтверждения практической значимости совершенствования информационно-измерительных и управленческих систем (далее системы) авторами предлагается использовать методику, основанную на стандартах системы менеджмента качества, оперирующую понятиями «результативность», «эффективность» и «используемые ресурсы».

Согласно ГОСТу [5]:

– результативность (effectiveness) R – это степень соответствия достигнутого результата R_{ϕ} плановым показателям $R_{пл}$:

$$R = \frac{R_{\phi}}{R_{пл}}, \quad (1)$$

– эффективность (efficiency) E_f – это соотношение между достигнутым результатом R_{ϕ} и использованными ресурсами $P_{исп}$:

$$E_f = \frac{R_{\phi}}{P_{исп}}. \quad (2)$$

В соответствии с ГОСТом [6] ресурс (resource) $P_{исп}$ – это средства, используемые в производственном процессе. Ресурсы – это необходимые и достаточные возможности для достижения целей любой деятельности (научные исследования, бизнес, управление и пр.). При этом деятельность, основанная на использовании ресурсов, должна быть эффективной, т.е. затраты ресурсов должны обеспечивать максимальный прирост возможностей для расширения деятельности.

Перечень используемых ресурсов зависит от вида деятельности и включает, но не исчерпывается, следующие группы: материальные, нематериальные, кадровые, информационные, производственно-технические, финансовые, коммерческие, организационно-управленческие, временные, административные и пр.

Оценка результативности системы проводится с целью определения соответствия значений усовершенствованных показателей R_{ϕ} планируемыми значениями показателей $R_{пл}$ [8, 9].

В качестве планового показателя результативности $R_{пл}$ предпочтительнее брать результативность прототипа или ближайшего аналога рассматриваемой системы, рассчитанную по той же методике, что и R_{ϕ} .

Достигнутый результат R_{ϕ} складывается из значений достигнутых результатов по отдельным усовершенствованным показателям $R_i^{пок}$:

$$R_{\phi} = \sum_{i=1}^n R_i^{пок} \cdot B, \quad (3)$$

где B – весовой коэффициент усовершенствованного показателя [10]; n – число усовершенствованных показателей.

Результат усовершенствования по каждому показателю, характеризующему систему, рассчитывают по формуле

$$R_i^{пок} = \begin{cases} \frac{X_i}{Y_i} 100 \% , & \text{при } X_i \rightarrow \max, \\ \frac{Y_i}{X_i} 100 \% , & \text{при } X_i \rightarrow \min, \end{cases} \quad (4)$$

где X_i – фактическое значение параметра усовершенствованного показателя; Y_i – плановое значение параметра усовершенствованного показателя.

Если для разрабатываемой системы прототип или ближайший аналог отсутствует, то результат усовершенствования по каждому показателю определяется по формуле

$$R_i^{пок} = \begin{cases} (1 - X_i) 100 \% , & \text{при } X_i \rightarrow \max, \\ \frac{1}{X_i} 100 \% , & \text{при } X_i \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

В случае если $R_{\phi} > R_{пл}$, то усовершенствование считается результативным.

Для определения эффективности усовершенствования системы необходимо провести расчет по формуле (2) для усовершенствованного варианта системы и для аналога или прототипа. Учитывая, что в знаменателе этой формулы стоит параметр, количество использованных ресурсов $P_{исп}$ можно отметить следующее. При $R_{\phi} = const$, если $P_{исп}^{np} > P_{исп}^{yc}$, то эффективность системы уменьшится, если $P_{исп}^{np} < P_{исп}^{yc}$, то эффективность системы увеличится, а при $P_{исп}^{np} = P_{исп}^{yc}$ все будет зависеть от соотношения R_{ϕ}^{np} и R_{ϕ}^{yc} . Чем больше будет R_{ϕ}^{yc} , тем больше будет эффективность E_f применения усовершенствованной системы. Таким образом, при условии равенства затрат ресурсов $P_{исп}$ более эффективным является вариант с большим значением R_{ϕ} .

Сравнивая значения, полученные по формуле (3) для прототипа и усовершенствованной системы, определяем наиболее эффективный вариант. Если $R_{\phi}^{np} \geq R_{\phi}^{yc}$, то усовершенствованная система не является эффективнее прототипа и нуждается в доработке. Если $R_{\phi}^{np} \ll R_{\phi}^{yc}$, то усовершенствованная система эффективнее прототипа.

При оценке эффективности усовершенствования системы необходимо, во-первых, правильно сформулировать задачу, которую система должна выполнять, и, во-вторых, цель усовершенствования. Следовательно, усовершенствование системы связано с выбором показателя и характеризующих его параметров для оценки эффективности.

Алгоритм оценки эффективности усовершенствования системы приведен на рис. 1.

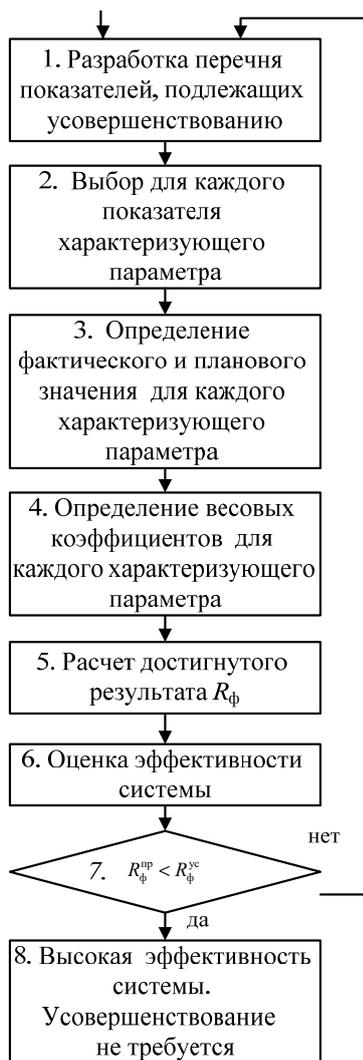


Рис. 1. Алгоритм оценки эффективности усовершенствования системы

Необходимость оценки эффективности системы обусловила разработку перечня показателей и параметров, их характеризующих, подлежащих усовершенствованию и которыми можно воспользоваться на практике для сравнения различных вариантов систем.

В процессе оценки усовершенствования для каждого параметра определяют фактическое и плановое значение. Фактическое значение получают как результат усовершенствования, а плановое значение параметра характеризует прототип, который хотели бы превзойти.

Для каждого характеризующего параметра определяют весовые коэффициенты, которые одинаковы для фактических и плановых параметров.

Используя собранные данные, проводят расчет достигнутого результата в ходе усовершенствования, оценивают полученную в ходе усовершенствования эффективность системы и делают вывод о возможности использования усовершенствованного варианта системы.

Результаты

Пример 1. По предлагаемой методике оценим эффективность использования в ходе поисково-спасательных работ (ПСР) гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (БВС), входящих в состав боевого расчета спасателей [11, 12], оснащенного мобильным телемедицинским комплексом (МТМК). В качестве прототипа будем использовать традиционный способ проведения ПСР, проводимых боевым расчетом спасателей, оснащенных МТМК [12].

В медицине катастроф существует понятие «золотой час» – это время, в течение которого оказанная медицинская помощь на месте либо оперативная доставка пострадавшего в медицинскую организацию гарантирует ему максимальные шансы выжить и наименьший риск осложнений после травм. Человеческий организм, попадая в экстремальную ситуацию, реагирует моментально включением компенсаторных и защитных механизмов, причем на максимальном уровне, для того чтобы поддержать жизнедеятельность приблизительно в течение часа. Потом начинает уменьшаться кровенаполнение главных органов: сердца и мозга, при этом шансы врачей спасти пострадавшего резко уменьшаются. Поэтому показателем, подлежащим усовершенствованию (минимизации), является время проведения ПСР. Для проведения ПСР наименования, показатели и параметры заданий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные и результаты оценки эффективности использования в ходе ПСР гетерогенной группы БВС

Задания	Показатель	Параметр	Для прототипа					Для усовершенствованной системы				
			$X_i^{пр}$ [13]	$Y_i^{пр}$ [13]	$R_i^{пок}$	$B_i^{пр}$ [10]	$R_{\phi}^{пр}$	$X_i^{ус}$ [12]	$Y_i^{ус}$ [12]	$R_i^{пок}$	$B_i^{ус}$ [10]	$R_{\phi}^{ус}$
Разведка в зоне ЧС	Обнаружение источников поражающих факторов	Время, мин $X_i \rightarrow \min$	1600	1600	1	0,35	0,35	$k \cdot 15$	120	8	0,35	2,8
Поиск пострадавших	Обнаружение пострадавшего, определение его координат, отправка информации оператору МТМК	Время, мин $X_i \rightarrow \min$	1600	60	1	0,4	0,4	$n \cdot 10$	60	6	0,4	2,4
Помощь пострадавшему	Оценка функционального состояния, оказание экстренной медицинской помощи	Время, мин $X_i \rightarrow \min$	60	60	1	0,15	0,15	$n \cdot 30$	60	2	0,15	0,3
Эвакуация пострадавшего из зоны ЧС	Доставка в медицинскую организацию	Время, мин $X_i \rightarrow \min$	60	60	1	0,1	0,1	30	60	2	0,1	0,2
Эффективность, E_f		отн. ед.	1 – исходная					5,7 – повышенная				

Примечания: k – количество источников поражающих факторов, в отношении которых возможно проведение восстановительных мероприятий с использованием БВС; n – количество пострадавших, в отношении которых возможно проведение поддерживающих, медицинских и эвакуационных мероприятий с использованием БВС.

Результаты расчета показывают, что эффективность использования в ходе ПСР гетерогенной группы БВС, входящих в состав боевого расчета спасателей, оснащенного МТМК, по времени в 5,7 раза выше, чем использование традиционного способа проведения ПСР, проводимых боевым расчетом спасателей, оснащенных МТМК.

Пример 2. По предлагаемой методике оценим эффективность усовершенствования медицинской информационной системы медицинской организации (МИС МО) в результате подключения ее локальной вычислительной сети к единой государственной информационной системе здравоохранения (ЕГИСЗ). За счет этого МИС МО получит следующие преимущества:

– доступ к информационным базам данных медицинской информации, размещенной в ЕГИСЗ;

– автоматическое формирование электронных медицинских карт (ЭМК) пациентов, содержащие последние по времени данные о пациенте, что позволит уменьшить вероятность врачебных ошибок;

– моделирование функционального состояния организма пациента.

В табл. 3 приведены задания, показатели и параметры для определения эффективности МИС МО, подключенной к ЕГИСЗ.

Эффективность лечения пациентов при подключении МИС МО к ЕГИСЗ значительно увеличилась. Это произошло за счет уменьшения вероятности ошибки при внедрении автоматизации процесса сбора, анализа и обработки медицинских данных.

Таблица 3

Исходные данные и результаты оценки эффективности усовершенствования МИС МО

Задания	Показатель	Параметр	Для прототипа					Для усовершенствованной системы				
			X_i^{np} [14]	Y_i^{np} [14]	$R_i^{пок}$	B_i^{np} [10]	R_{ϕ}^{np}	X_i^{yc} [14]	Y_i^{yc} [14]	$R_i^{пок}$	B_i^{yc} [10]	R_{ϕ}^{yc}
Лечение пациента	Заполнение ЭМК пациента	Вероятность ошибки $X_i \rightarrow \min$	0,13	0	7,69	0,2	1,54	$1 \cdot 10^{-6}$	0	$1 \cdot 10^6$	0,2	$0,2 \cdot 10^6$
	Обновление данных о новых лекарствах и процедурах	Вероятность ошибки $X_i \rightarrow \min$	0,15	0	6,67	0,3	2	$1 \cdot 10^{-6}$	0	$1 \cdot 10^6$	0,3	$0,3 \cdot 10^6$
	Моделирование функционального состояния организма пациента	Вероятность ошибки $X_i \rightarrow \min$	0,35	0	2,88	0,5	1,44	$1 \cdot 10^{-6}$	0	$1 \cdot 10^6$	0,5	$0,5 \cdot 10^6$
Эффективность, E_f		отн. ед.	4,98 – исходная					$1 \cdot 10^6$ – повышенная				

Заключение

Для решения проблем, связанных с определением, отношением и совместным использованием категорий «результативность» и «эффективность», авторами предложена оценка эффективности совершенствования систем, применимая к системам различного назначения. При описании алгоритма оценки была установлена связь между «результативностью» и «эффективностью» через показатели и характеризующие их параметры. Полученные результаты позволяют оценить эффективность через показатели результативности, что продемонстрировано на примерах информационно-измерительных и управляющих систем при проведении поисково-спасательных работ и в области медицины.

Библиографический список

1. *Титов, В. А.* Эффективность капиталовложений в развитие российской экономики / В. А. Титов // Транспортное дело России. – 2010. – № 1. – С. 39–41.
2. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии». – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=335568&dst=100001&date=19.07.2020#0123722126231961> (дата обращения: 19.07.2020).
3. *Бондаренко, А. В.* О сущности понятий результативность и эффективность в экономике / А. В. Бондаренко. – URL: http://www.rusnauka.com/16_NPRT_2012/Economics/10_111530.doc.htm (дата обращения: 20.06.2020).
4. *Щербакова, А. А.* Информационно-измерительная система контроля концентраций компонентов топлива в аварийных ситуациях / А. А. Щербакова, Б. В. Чувькин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 10–15. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-2.
5. ГОСТ Р ИСО 9000–2015 Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
6. ГОСТ Р 58534–2019 Национальный стандарт Российской Федерации. Экологический менеджмент. Эффективность использования ресурсов. Часть 1. Основные принципы и стратегии.
7. *Райченко, А. В.* Проблемы оценки эффективности управления / А. В. Райченко // Вестник университета. – 2014. – № 2. – С. 204–207.
8. *Искандерова, Р. Р.* Методика оценки результативности СМК предприятия / Р. Р. Искандерова // Молодой ученый. – 2015. – № 5 (85). – С. 278–280. – URL: <https://moluch.ru/archive/85/15905/> (дата обращения: 14.07.2020).
9. *Машичев, А. С.* Оценка результативности и рисков процессов / А. С. Машичев, С. А. Трошин // Молодой ученый. – 2019. – № 50 (288). – С. 357–361. – URL: <https://moluch.ru/archive/288/65192/> (дата обращения: 14.07.2020).
10. *Саати, Т.* Принятие решений : метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 314 с.
11. Пат. 2694528 Российская Федерация № 2018139491. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е. и др. ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20. – 31 с.
12. *Шерстнев, В. В.* Планирование проведения поисково-спасательных работ с применением беспилотных воздушных судов / В. В. Шерстнев, О. Н. Бодин, О. Е. Безбородова // Science and technology innovations : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (8 октября 2019 г.). – Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2019. – С. 45–53.
13. Применение сетевых моделей при планировании аварийно-спасательных и других неотложных работ / Р. Г. Ахтямов, А. Н. Елизарьев, И. В. Вдовина, Ю. М. Планида, Э. С. Хаертдинова // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2012. – № 2. – С. 29–34.
14. *Белов, П. Г.* Моделирование опасных процессов в техносфере / П. Г. Белов. – Москва, 1999. – 124 с.

References

1. Titov V. A. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business in Russia]. 2010, no. 1, pp. 39–41. [In Russian]
2. *Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoy» tsifrovoy tekhnologii «Novye proizvodstvennyye tekhnologii»* [Roadmap for the development of "end-to-end "digital technology" New production technologies]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=335568&dst=100001&date=19.07.2020#0123722126231961> (accessed Jul. 19, 2020). [In Russian]
3. Bondarenko A. V. *O sushchnosti ponyatiy rezul'tativnost' i effektivnost' v ekonomike* [On the essence of the concepts of efficiency and effectiveness in the economy]. Available at: http://www.rusnauka.com/16_NPRT_2012/Economics/10_111530.doc.htm (accessed Jun. 20, 2020). [In Russian]
4. Shcherbakova A. A., Chuvykin B. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 10–15. DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-2. [In Russian]
5. GOST R ISO 9000–2015 *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'* [GOST R ISO 9000-2015 national standard of the Russian Federation. Quality management system. Main provisions and vocabulary]. [In Russian]
6. GOST R 58534–2019 *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Ekologicheskiy menedzhment. Effektivnost' ispol'zovaniya resursov. Chast' 1. Osnovnye printsipy i strategii* [GOST R 58534-2019 national standard of the Russian Federation. Environmental management. Resource efficiency. Part 1. Basic principles and strategies]. [In Russian]
7. Raychenko A. V. *Vestnik universiteta* [Bulletin of the University]. 2014, no. 2, pp. 204–207. [In Russian]
8. Iskanderova R. R. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2015, no. 5 (85), pp. 278–280. Available at: <https://moluch.ru/archive/85/15905/> (accessed Jul. 14, 2020). [In Russian]

9. Mashichev A. S., Troshin S. A. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2019, no. 50 (288), pp. 357–361. Available at: <https://moluch.ru/archive/288/65192/> (accessed Jul. 14, 2020). [In Russian]
10. Saati T. *Prinyatie resheniy: metod analiza ierarkhiy* [Decision making : the analytic hierarchy process]; transl. from Engl. by R. G. Vachnadze. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 314 p. [In Russian]
11. Pat. 2694528 Russian Federation № 2018139491. *Sposob provedeniya poiskovo-spatatel'nykh rabot* [Method of conducting search and rescue operations]. Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E. et al.; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. № 20, 31 p. [In Russian]
12. Sherstnev V. V., Bodin O. N., Bezborodova O. E. *Science and technology innovations: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (8 oktyabrya 2019 g.)* [Science and technology innovations: collection of articles of the International scientific and practical conference (October 8, 2019)]. Petrozavodsk: MTsNP «Novaya nauka», 2019, pp. 45–53. [In Russian]
13. Akhtyamov R. G., Elizar'ev A. N., Vdovina I. V., Planida Yu. M., Khaertdinova E. S. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection]. 2012, no. 2, pp. 29–34. [In Russian]
14. Belov P. G. *Modelirovanie opasnykh protsessov v tekhnosfere* [Modeling of dangerous processes in the technosphere]. Moscow, 1999, 124 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)

Убиенных Анатолий Геннадьевич

старший преподаватель,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: utolg@mail.ru

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

senior lecturer,
sub-department of information
and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, 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)

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 measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

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. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-4.

В. Ю. Трофимов, А. Е. Шахмейстер

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦИФРОВОГО КОДА ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

V. Yu. Trofimov, L. E. Shakhmeyster

NONLINEAR DIGITAL CODE CONVERTERS IN TIME INTERVAL IN AUTONOMOUS INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Преобразователи цифровой код – временной интервал используются в дистанционно управляемых автономных информационных и управляющих системах для отсчета времени дистанционного действия, замедления, самоликвидации. Быстрота изменения обстановки, в которой функционирует система, требует сокращения времени ввода в нее данных задания, в частности времени дистанционного действия. Сокращение времени ввода данных увеличением скорости передачи информации ограничено полосой пропускания линии связи. В этой связи возникает задача поиска новых путей сокращения времени ввода данных. **Материалы и методы.** Рассмотрены непрерывные и дискретные модели нелинейного преобразования с возможностью их реализации вычислительными средствами автономных информационных и управляющих систем. **Результаты.** Предложено для сокращения времени и длины кода введение данных осуществлять с дискретностью, значение которой относительно устанавливаемого времени действия является постоянной величиной. Показано, что постоянное значение относительной дискретности ввода данных обеспечивается нелинейным преобразованием код – временной интервал. Для непрерывной модели преобразования – это экспоненциальная функция, для дискретной – показательная. Проанализирована возможность упрощения реализации нелинейного преобразования путем замены экспоненциальной и показательных функций их представлениями рядом Тейлора с ограниченным числом элементов, а также интерполирующими или аппроксимирующими полиномами различных порядков. Обеспечение высокой точности преобразования достигается использованием кусочно-линейного или кусочно-квадратичного преобразования. **Выводы.** Использование нелинейного преобразования цифровой код во временной интервал позволяет уменьшить длину двоичного цифровой код и сократить время ввода данных задания. В приведенном примере длина цифровой код при использовании нелинейного преобразования уменьшается с 16 до 12 бит.

A b s t r a c t. Background. Digital code – time interval converters are used in remote-controlled Autonomous information and control systems for counting the time of remote action, deceleration, and self-elimination. The rapid change in the environment in which the system operates requires a reduction in the time it takes to enter task data, in particular, the time of remote action. Reducing data entry time by increasing the data transfer rate is limited by the bandwidth of the communication line. This raises the challenge of finding new ways to reduce data entry time. **Materials and methods.** Continuous and discrete models of nonlinear transformation with the possibility of their implementation by computing means of Autonomous in-

formation and control systems are considered. **Results.** It is proposed to reduce the time and length of the code to introduce data with a discreteness, the value of which is a constant relative to the set time of action. It is shown that a constant value of the relative discreteness of data input is provided by nonlinear code – time interval pre-formation. For a continuous transformation model, this is an exponential function; for a discrete model, it is an exponential function. The possibility of simplifying the implementation of a nonlinear transformation by replacing exponential and exponential functions with their representations of the Taylor series with a limited number of elements, as well as interpolating or approximating polynomials of different orders, is analyzed. Ensuring high conversion accuracy is achieved by using piecewise linear or piecewise quadratic conversion. **Conclusions.** Using non-linear conversion of the digital code to the time interval allows you to reduce the length of the binary digital code and reduce the time for entering the task data. In the example above, the length of the digital code was reduced from 16 to 12 bits when using a non-linear transformation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цифровой код, временной интервал, нелинейный преобразователь.

К e y w o r d s: digital code, time interval, nonlinear converter.

В дистанционно управляемых автономных информационных и управляющих системах информация о требуемом функционировании может вводиться с помощью прибора управления цифровым кодом с дальнейшим его преобразованием во временной интервал [1]. Указанное преобразование используется в дистанционно управляемых автономных информационных и управляющих системах для отсчета времени дистанционного действия, замедления, самоликвидации. Быстрота изменения обстановки, в которой используются указанные системы, увеличение объема обмениваемой непосредственно перед применением с внешним прибором управления информации вызывают необходимость уменьшения времени передачи данных. Решение задачи известными методами, связанными с увеличением скорости передачи данных, ограничено полосой пропускания используемых линий связи и снижением помехозащищенности линии связи на высоких скоростях. В этой связи возникает задача по поиску других путей уменьшения времени ввода необходимых данных, в частности, путем сокращения длины передаваемого цифрового кода. Это может быть реализовано за счет исключения излишней передаваемой информации.

Одним из параметров, вводимым в систему непосредственно перед использованием, является время действия T_{yd} , которое может подаваться в виде цифрового кода, с использованием его дальнейшего линейного преобразования [2]:

$$T_{yd} = T_{yd \min} + h_{yTd} K,$$

где $T_{yd \min}$ – минимальное устанавливаемое время действия; K – код, вводимый при установке, численное значение которого соответствует устанавливаемому времени действия, h_{yTd} – дискретность ввода времени действия.

Дискретность $h_{yTd} = \text{const}$ и соответствует изменению времени действия при изменении цифрового значения кода K на единицу.

Перейдем к относительным единицам

$$t_0 = 1 + K \frac{h_{yTd}}{T_{yd \min}},$$

$$K = (t_0 - 1) \frac{T_{yd \min}}{h_{yTd}},$$

$$T_{yd \max} = T_{yd \min} + h_{yTd} K_{\max},$$

где t_0 – относительное значение устанавливаемых во взрыватель времен, $t_0 = \frac{T_{yd}}{T_{yd \min}}$; $T_{yd \max}$ – максимальное устанавливаемое время действия; K_{\max} – максимальное значение кода K :

$$t_{0 \max} = 1 + K_{\max} \frac{h_{yTd}}{T_{yd \min}},$$

где $t_{0 \max} = \frac{T_{yd \max}}{T_{yd \min}}$ – максимальное значение t_0 , $T_{yd \min} > 0$,

$$K_{\max} = (t_{0 \max} - 1) \frac{T_{yd \min}}{h_{yTd}}.$$

Так как K может меняться от 0 до K_{\max} , т.е. число различных значений K равно $K_{\max} + 1$, количество l_y вводимой информации и необходимая для этого разрядность n двоичного кода определяются выражениями [3]:

$$l_y = \log_2(K_{\max} + 1), \quad n = \text{ceil}(l_y), \quad (1)$$

где ceil – округление числа до большего целого.

При $t_{0 \max} = 60$, $\frac{T_{yd \min}}{h_{yTd}} = 10^3$, с учетом выражения для K_{\max} , по формуле (1) имеем

$$l_y = \log_2[(60 - 1) \cdot 10^3 + 1] = 15,8, \quad n = 16 \text{ бит.}$$

При использовании постоянного значения дискретности ввода данных, при малых T_{yd} составляющая относительной погрешности отсчета времени действия, обусловленная дискретностью их ввода, может оказаться достаточно большой, а при больших T_{yd} неоправданно малой. Одним из путей устранения этого недостатка является ввод данных о требуемом времени действия с относительной дискретностью ε , значение которой относительно вводимого времени действия T_{yd} является величиной постоянной,

$$\varepsilon = \frac{h_{yTd}}{T_{yd}} = \text{const.} \quad (2)$$

Иными словами, ε соответствует относительному увеличению устанавливаемого времени действия, соответствующему увеличению вводимого кода K на единицу.

Делая допущение о непрерывности переменных T_{yd} и K (в дальнейшем будет проведен анализ без указанного допущения), можем записать

$$\frac{dT_{yd}}{dK} = \varepsilon T_{yd},$$

откуда при минимальном значении K , равном 0,

$$\int_{T_{yd \min}}^{T_{yd}} \frac{dT_{yd}}{T_{yd}} = \varepsilon \int_0^K dK.$$

Используя ранее принятое обозначение $t_0 = \frac{T_{yd}}{T_{yd \min}}$, имеем [4]

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \ln t_0, \quad K_{\max} = \frac{1}{\varepsilon} \ln t_{0 \max}.$$

С учетом того, что K – целое число, получаем

$$K = \text{round}\left(\frac{1}{\varepsilon} \ln t_0\right), \quad K_{\max} = \text{round}\left(\frac{1}{\varepsilon} \ln t_{0\max}\right), \quad (3)$$

где $\text{round}(\dots)$ – округление до ближайшего целого;

$$t_0 = e^{\varepsilon K}, \quad t_{0\max} = e^{\varepsilon K_{\max}}. \quad (4)$$

Таким образом, при использовании непрерывной модели преобразования цифровой код – временной интервал постоянное значение относительной дискретности ввода данных обеспечивается реализацией нелинейного экспоненциального преобразования (4).

Количество вводимой информации и разрядности n двоичного кода K определяются выражениями (1).

Реализация вычислительными средствами внешнего прибора управления выражения (3) затруднений не вызывает, поскольку, как правило, их мощностей достаточно для вычисления логарифмических функций, а вот реализация электронным блоком информационной системы-выражения (4) может потребовать достаточно большого времени из-за отсутствия встроенных необходимых функций в используемых для построения электронных блоков автономных систем соответствующих вычислительных возможностей, в частности, при использовании 8-разрядных маловыводных PIC-микроконтроллеров [5].

В этой связи возникает задача по замене выражения (4) и связанного с ним выражения (3) на более простые с точки зрения практической реализации, обеспечивающие с той или иной погрешностью условия, определяемые выражением (2), без внесения дополнительной погрешности, вызванной использованием приближенных выражений.

В качестве приближенных выражений (4) можно использовать полином, представляющий собой разложение в ряд Тейлора, а также интерполяцию или аппроксимацию полиномом различных степеней. Далее приведены некоторые возможные замены [6]:

$$t_{\text{ТР}} = 1 + \sum_{i=1}^{i=P} \frac{1}{i!} (\varepsilon K)^i, \quad (5)$$

где $t_{\text{ТР}}$ – замена выражения (4) первыми членами его разложения в степенной ряд Тейлора i -ой степени (индекс P),

$$t_{\text{ИР}}, \quad t_{\text{АП}} = \sum_{i=0}^{i=P} u(i+1) (\varepsilon K)^{P-i}, \quad (6)$$

где $t_{\text{ИР}}, t_{\text{АП}}$ – интерполяционный (индекс I) или аппроксимирующий полином (индекс A) P -й степени (индекс P); $u(\dots)$ – элемент вектора коэффициентов полинома.

Ряд Тейлора при небольших степенях P хорошо совпадает с заменяемой им экспонентой лишь при небольших значениях εK . Интерполяционные полиномы обеспечивают точное совпадение с интерполируемой функцией в нескольких точках, число которых определяется степенью полинома. Аппроксимация полиномом обеспечивает наименьшее значение суммы квадратов отклонений исходной функции и аппроксимирующего полинома.

Коэффициенты интерполирующего полинома могут определяться с использованием функции *inv* программы MATLAB, а коэффициенты аппроксимирующего полинома функции *polyfit* – той же программы [7].

Критерием выбора заменяющей выражение (4) функции является:

- обеспечение выполнения условия, определяемого выражением (2),
- совпадение значений, вычисленных по формуле (4) и приближенных к ней полиномов (5, 6) при $K = 0$ и максимальном значении K ,
- малое отличие фактического значения коэффициента ε от его выбранного номинального значения.

Графики зависимости предельных значений ε , получаемых при реализации выражений (5), (6), от максимального значения кода K , приведены на рис. 1. Рисунок 1,а соответствует значениям $K_{\max} = 4095$, рис. 1,б – $K_{\max} = 1023$.

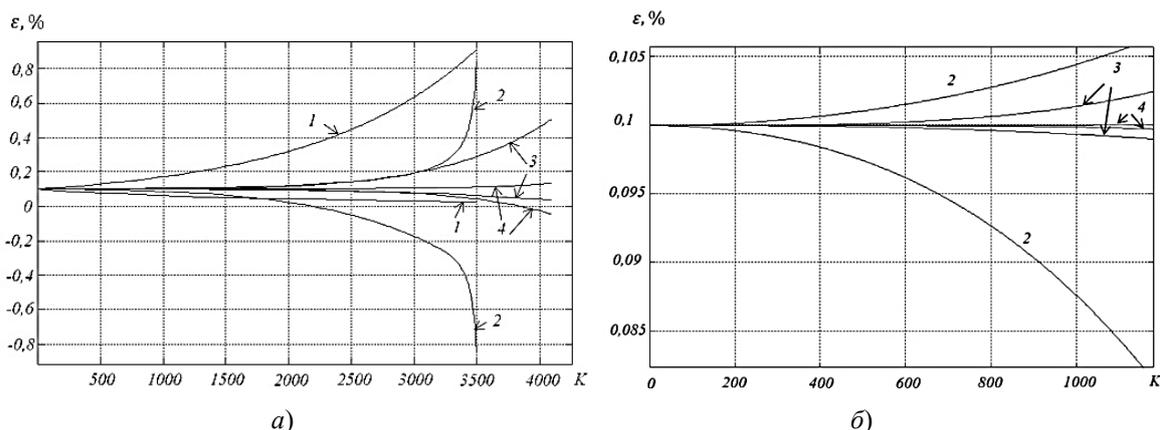


Рис. 1. Зависимости предельных значений ε от значений кода K при использовании интерполяции полиномами различных степеней: а – для K до 4095; б – для K до 1023; 1–4 – итерполяции полиномами 1–4-й степени соответственно

Предельные значения ε для различных приближенных к формуле (4) полиномов (5), (6) и $K_{\max} + 1 = 2^5 \div 2^{12}$ приведены в табл.1.

Значения ε на графиках рис.1 и в табл. 1 приведены в процентах. Номинальное значение $\varepsilon = 0,1 \%$.

Таблица 1

Предельные значения $\varepsilon(\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})$, в процентах

Упрощение	Разрядность K							
	5	6	7	8	9	10	11	12
Ряд Тейлора	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
3-го порядка	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,098	0,090	0,069
Линейная интерполяция	0,102	0,103	0,107	0,114	0,130	0,174	0,328	1,421
	0,099	0,097	0,094	0,089	0,078	0,062	0,043	0,024
Квадратичная интерполяция	0,100	0,100	0,100	0,100	0,101	0,105	0,124	1,350
	0,100	0,100	0,100	0,099	0,097	0,087	0,019	-0,045
Кубическая интерполяция	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,102	0,119	0,505
	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,099	0,095	0,036
Интерполяция полиномом 4-й степени	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,101	0,129
	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,097	-0,025
Кубическая аппроксимация	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,102	0,125	0,659
	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,099	0,095	0,043

Из данных табл. 1 и рис. 1 предварительно можно заключить, что по отклонению значения ε от номинального упрощенные выражения (5), (6) дают удовлетворительный результат для:

- линейной интерполяции $t_{и1}$ – при разрядности кода K не более 5;
- квадратичной интерполяции $t_{и2}$ – при разрядности кода K не более 9;
- кубических интерполяции $t_{и3}$, аппроксимации $t_{А3}$ и ряда Тейлора $t_{Т3}$ при разрядности кода K не более 10;
- интерполяции полиномом 4-го порядка $t_{и4}$ при разрядности кода K не более 11.

При $K = 0$ значения $t_{Т3}$ выражения (5) совпадают со значениями t_0 выражения (4) для любой разрядности K . При максимальных значениях $K = 2^n - 1$ расхождение ряда Тейлора от t_0 начинаются с разрядности кода K $n = 10$. Аппроксимация $t_{А3}$ полиномом 3-го порядка дает расхождение при $n = 11$, причем расхождение присутствует как при $K = 0$, так и при $K = 2^n - 1$.

Поскольку при построении интерполяционных полиномов можно обеспечить их совпадение с зависимостью (4) в нескольких точках, включая точки $K = 0$ и $K = 2^n - 1$, недостатки, связанные с несовпадением приближенных и точных выражений при предельных значениях кода K , присущие ряду Тейлора и аппроксимирующему полиному, в интерполяционных полиномах могут отсутствовать.

По результатам анализа можно рекомендовать замену экспоненциального преобразования (4) интерполяционными полиномами (6) 1-го порядка $t_{и1}$ с разрядностью кода K не более 5 и второго порядка $t_{и2}$ при разрядности K , не превышающей 10.

Для увеличения допустимой разрядности вводимого кода K можно разбить весь интервал кодов на несколько отдельных диапазонов. Тогда для любого диапазона

$$K = K2 \cdot 2^{n_1} + K1,$$

где $K1$ – код внутри диапазона, $K1 = 0 : 2^{n_1} - 1$; $K2$ – код номера диапазона, $K2 = 0 : 2^{n_2} - 1$; n_1, n_2 – разрядности кодов $K1, K2$ соответственно.

Используя выражение (4), имеем

$$t_0 = e^{\varepsilon(K2 \cdot 2^{n_1} + K1)} = (e^{\varepsilon 2^{n_1}})^{K2} e^{\varepsilon K1},$$

$$t_0 = t_{01k}^{K2} t_{01}, \quad (7)$$

$$t_{01} = e^{\varepsilon K1}, \quad (8)$$

$$t_{01k} = e^{\varepsilon 2^{n_1}}, \quad (9)$$

где t_{01} – относительное значение устанавливаемого времени внутри диапазона; t_{01k} – значение переполнения относительного времени внутри диапазона, при $K1 = 2^{n_1}$.

Значение t_{01k} может быть определено при выборе равных в относительных единицах диапазонов из выражения (7):

$$t_{0 \max} = t_{01k}^{K2 \max} t_{01 \max}, \quad t_{01 \max} = t_{01k} (1 - \varepsilon), \quad \varepsilon \ll 1, \quad t_{01 \max} \approx t_{01k}, \quad t_{01k} \approx t_{0 \max}^{\frac{1}{2^{n_2}}}.$$

На рис. 2 приведены зависимости t_{01k} от $t_{0 \max}$ для различных n_2 .

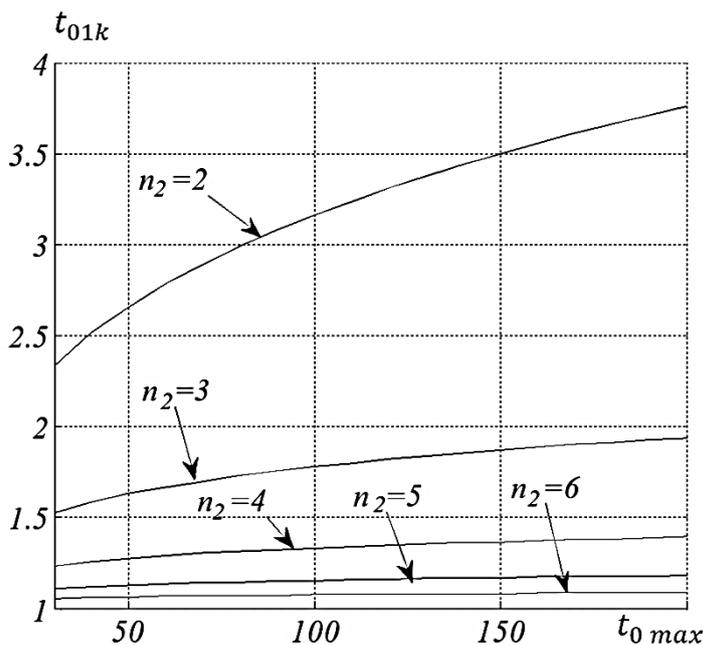


Рис. 2. Зависимость t_{01k} от $t_{0 \max}$ для различных n_2

В табл. 3 приведены t_{01k} для $t_{0\max} = 30 \div 180$ и $n_2 = 2 \dots 6$.

Таблица 3

Относительные переполнения t_{01k} диапазона при различных максимальных $t_{0\max}$

$t_{0\max}$	n_2					$t_{0\max}$	n_2				
	2	3	4	5	6		2	3	4	5	6
30	2,34	1,53	1,24	1,11	1,05	120	3,31	1,82	1,35	1,16	1,08
60	2,78	1,67	1,29	1,14	1,07	150	3,50	1,87	1,37	1,17	1,08
90	3,08	1,76	1,32	1,15	1,07	180	3,66	1,91	1,38	1,18	1,08

Приведенные формулы (5)–(13) могут использоваться для выбора числа необходимых диапазонов, на которые необходимо разбить весь интервал устанавливаемых времен.

Перейдем к определению длины кода $K1$ установки требуемого времени внутри диапазона. Устанавливаемое время внутри диапазона определяется выражением (8). Замену выражения (8) можно осуществить, используя либо линейную, либо квадратичную интерполяцию по выражению (6), получая при этом формулу (7) в виде

$$t_0 = t_{01k}^{K^2} t_{\text{ИР}} \quad (10)$$

Рассмотрим возможности кусочно-линейной интерполяции $t_{\text{ИЛ}}$.

Совпадение значения $t_{\text{ИЛ}}$ с t_{01} должно осуществляться при $K1=0$ и $K1=2^{n_1}$, для которых $t_{\text{ИЛ}}=t_{01}=1$ и $t_{\text{ИЛ}}=t_{01k}$ соответственно.

Значения ε и разрядность n_1 кода $K1$, связанные между собой и с t_{01k} , определяются из выражения (9)

$$n_1 = \text{ceil}[\log_2(\frac{1}{\varepsilon} \ln t_{01k})], \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2^{n_1}} \ln t_{01k}. \quad (12)$$

На рис. 3, а, б приведены зависимости n_1 от t_{01k} для различных номинальных значений ε и зависимости ε от t_{01k} для различных n_1 при использовании кусочно-линейной интерполяции, определенные по формулам (11)–(12).

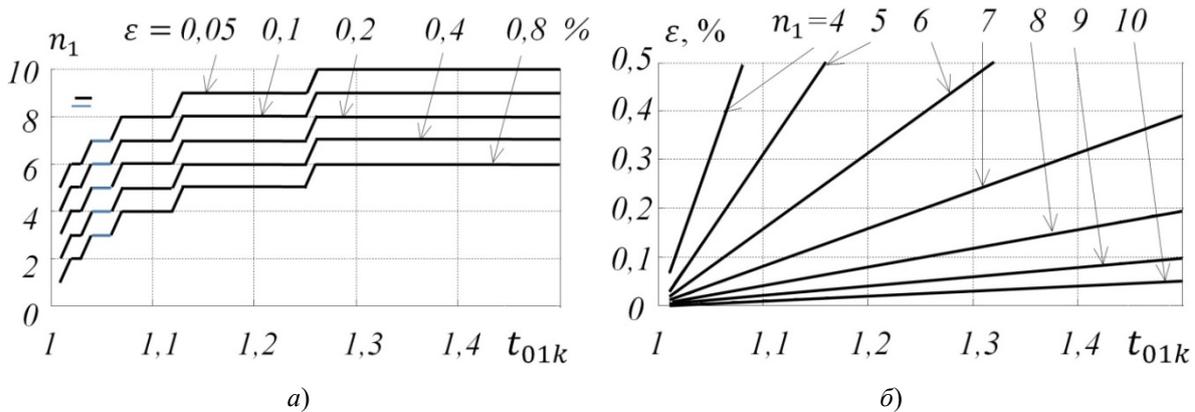


Рис. 3. Зависимости n_1 и ε от t_{01k} при кусочно-линейной интерполяции:

а – зависимости n_1 от t_{01k} для различных номинальных значений ε ;

б – зависимости ε от t_{01k} для различных n_1

Из приведенных данных следует, что при использовании кусочно-линейной интерполяции малые значения ε могут быть получены только при малых t_{01k} и больших разрядностей кода $K2$.

Значение ε внутри диапазона не является величиной постоянной. Из формулы (6) для $t_{И1}$ (для полинома 1-го порядка $u(1) = \frac{t_{01k}-1}{2^{n_1}}$, $u(2)=1$) можно получить абсолютную величину приращения t_{01} при изменении значения кода $K1$ на единицу, численно равную коэффициенту $u(1)$ полинома, разделив которую на t_{01} , получим значение ε .

Максимальное значение ε соответствует $t_{01} = 1$, а минимальное соответствует $t_{01} = t_{01k}$,

$$\varepsilon = \frac{t_{01k}-1}{2^{n_1}} \frac{1}{t_{01}}, \quad \varepsilon_{\max} = \frac{t_{01k}-1}{2^{n_1}}, \quad \varepsilon_{\min} = \frac{\varepsilon_{\max}}{t_{01k}}. \quad (13)$$

Рассмотрим пример: $t_{0\max} = 60$, $\varepsilon \approx 0,1\%$. По формуле (13) и табл. 3 определяем, что относительно малые значения t_{01k} могут обеспечиваться при $n_2 = 4, 5$ или 6 , для которых $t_{01k} = 1,29, 1,14$ или $1,07$ соответственно. Из данных рис. 3 следует, что при заданных условиях и указанных t_{01k} разрядность $n_1 = 9, 8$ и 7 для $n_2 = 4, 5$ или 6 соответственно. Общая разрядность $n = n_1 + n_2 = 13$, что значительно меньше использования линейного преобразования и реализации установки времени действия с фиксированным значением абсолютной дискретности. Так, в рассмотренном ранее примере разрядность кода, определенная по формулам (1), $n = 16$.

Отметим, что минимальное число разрядов, определенное по формулам (3), (1), при $t_{0\max} = 60$ и $\varepsilon = 0,001$, равно $n = 12$.

Снизить при кусочно-линейной интерполяции нелинейного преобразования общее число разрядов n до минимального 12 можно, увеличив допустимое значение ε .

В табл. 4 приведены вычисленные по формулам (13) значения ε_{\min} , ε_{\max} для $t_{0\max} = 60$ и $n = 12$ при различных сочетаниях n_1, n_2 .

Таблица 4

Значения ε_{\max} и ε_{\min} в процентах при кусочно-линейной интерполяции для $t_{0\max} = 60$, $n = 12$ и номинальном значении $\varepsilon = 0,1\%$

n_2	4	5	6	7
n_1	8	7	6	5
$\varepsilon_{\max}, \%$	0,114	0,107	0,103	0,102
$\varepsilon_{\min}, \%$	0,088	0,094	0,097	0,098

Получили, что при $n_2 = 5...7$, вполне можно ограничиться 12-разрядным кодом K при колебаниях, в зависимости от n_2 , значения ε в пределах $\pm(2...7)\%$. Таким образом, при указанных допустимых колебаниях ε кусочно-линейная интерполяция позволяет обеспечить минимально возможную разрядность кода K .

Перейдем к рассмотрению интерполяции выражения (8) для диапазона полиномом 2-й степени. Начальные условия:

$$t_{И2}(K1=0) = 1, \quad t_{И2}(K1=2^{n_1}) = t_{01k}, \quad t_{И2}(K1=m) = e^{\varepsilon m},$$

где m – значение $K1$ в третьей точке, соответствующей минимальному отклонению ε от номинального значения внутри диапазона.

В табл. 5 приведены значения m и предельные относительные значения ε_{\min} и ε_{\max} при номинальном $\varepsilon_{\text{ном}} = 0,1\%$ для $n_1 = 2...12$.

Таблица 5

Оптимальные вторые точки квадратичной интерполяции
и предельные значения ε для $n_1 = 2 \dots 12$

n_1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m	2	2	6	14	30	60	115	207	325	366	184
$\varepsilon_{\max, \%}$	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,101	0,104	0,118	0,186
$\varepsilon_{\min, \%}$	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,099	0,098	0,092	0,047

На рис. 4 приведены $\delta_{\varepsilon \min, \max}$ – предельные относительные отклонения ε , от его номинального значения при использовании линейной и квадратичной интерполяций.

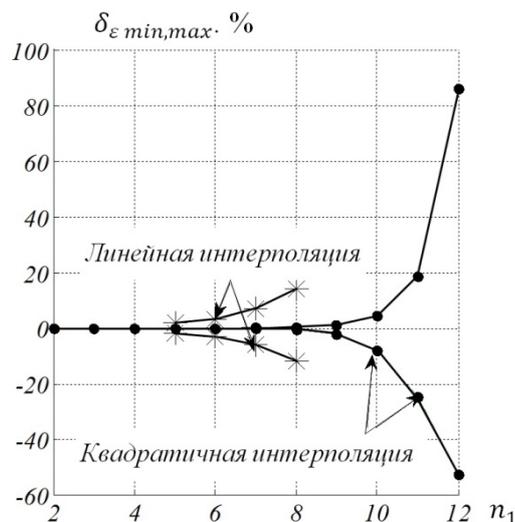


Рис. 4. Предельные относительные отклонения ε от номинального значения (0,1 %) для различной разрядности кода $K1$

Как видно из табл. 5 и рис. 4, кусочно-квадратичная интерполяция дает значительно меньшие отклонения ε от номинального значения по сравнению с кусочно-линейной интерполяцией и может использоваться для разрядности кода $K1 n_1 = 10$ включительно.

Уменьшить в приведенном ранее примере разрядность кода K при использовании кусочно-квадратичной интерполяции не удастся, поскольку при линейной интерполяции может быть реализован код K минимально возможной для приведенного примера разрядности.

Рассмотрим дискретную модель варианта нелинейного преобразования при постоянном значении относительной дискретности устанавливаемого времени действия $\varepsilon = \text{const}$.

Устанавливаемые времена $T_{yd}(K)$, исходя из постоянного значения относительного увеличения устанавливаемого времени, равны

$$T_{yd}(0) = T_{yd \min},$$

$$T_{yd}(1) = (1 + \varepsilon) T_{yd}(0) = (1 + \varepsilon) T_{yd \min},$$

$$T_{yd}(2) = (1 + \varepsilon) T_{yd}(1) = (1 + \varepsilon)^2 T_{yd \min},$$

...

$$T_{yd}(K) = (1 + \varepsilon) T_{yd}(K-1) = (1 + \varepsilon)^K T_{yd \min},$$

...

$$T_{yd \max} = (1 + \varepsilon) T_{yd}(K_{\max} - 1) = (1 + \varepsilon)^{K_{\max}} T_{yd \min}.$$

Переходя к относительным единицам, имеем

$$t_0 = (1 + \varepsilon)^K, \quad t_{0 \max} = (1 + \varepsilon)^{K_{\max}}. \quad (14)$$

Вместо экспоненциальной функции по выражению (4) получили показательную функцию (14) с последовательностью t_0 , представляющую собой геометрическую прогрессию.

Количество вводимой информации и разрядность двоичного кода определяются теми же выражениями (1).

Необходимое значение K определяется выражением

$$K = \text{round} \left[\log_{(1+\varepsilon)} t_0 \right], \quad K_{\max} = \text{round} \left[\log_{(1+\varepsilon)} t_{0 \max} \right]$$

или

$$K = \text{round} \left(\frac{\ln t_0}{\ln(1 + \varepsilon)} \right), \quad K_{\max} = \text{round} \left(\frac{\ln t_{0 \max}}{\ln(1 + \varepsilon)} \right).$$

Сравним выражения (4) и (14). Заменяем в выражении (4) e^ε его разложением в степенной ряд, ограничиваясь первыми двумя членами [6],

$$t_0 = (e^\varepsilon)^K \approx (1 + \varepsilon)^K.$$

Получили примерное совпадение выражений (4) и (14).

Рассмотрим отношение β_1 изменений t_0 при изменении K на единицу, получаемое из формулы (14) при использовании дискретной модели:

$$\beta_1 = \frac{t_0(K+1)}{t_0(K)} = 1 + \varepsilon.$$

Аналогичное отношение β_2 из формулы (4) при использовании непрерывной модели

$$\beta_2 = e^\varepsilon.$$

Используем разложение экспоненты в степенной ряд [6]:

$$e^\varepsilon = 1 + \varepsilon + R_1(\varepsilon),$$

где $R_1(\varepsilon)$ – остаточный член в форме Лагранжа при ограничении разложения функции в степенной ряд членами первого порядка [6]:

$$R_1(\varepsilon) = \frac{e^c}{2!} \varepsilon^2,$$

где c – коэффициент, принимающий значения от 0 до ε .

Выражение для β_2 примет вид

$$\beta_2 = 1 + \varepsilon + \frac{e^c}{2!} \varepsilon^2.$$

Так как $\varepsilon \ll 1$, $c \leq \varepsilon$, то $\frac{e^c}{2!} \varepsilon^2 \approx 0,5\varepsilon^2$,

$$\beta_2 \approx 1 + \varepsilon + 0,5\varepsilon^2.$$

При $\varepsilon = 10^{-3}$ по точным формулам $\beta_1 = 1,001$, $\beta_2 = 1,0010005$, а по упрощенной формуле $\beta_2 \approx 1,001001$. Полученные отличия практического значения не имеют, что свидетельствует о получении идентичных результатов при использовании непрерывной и дискретной моделей рассматриваемого нелинейного преобразования.

Сделанный ранее вывод о возможной замене непрерывной функции (4) полиномами (6) может быть распространен и на дискретную функцию (14).

Получаемые результаты интерполяции формулы (14) полиномом 2-го порядка (6) в рассмотренном ранее примере не дали заметных отличий от интерполяции выражения (4).

Отсчет установленного времени определяется выражением

$$T_{0d} = NT_g,$$

где T_{0d} – отсчитанное время; T_g – период генератора, определяющий дискретности отсчета времени; N – число периодов T_g генератора при отсчете времени.

Рассмотрим порядок определения значения N .

Устанавливаемое время действия равно

$$T_{yd} = t_0 T_{yd \min}. \quad (15)$$

Приравняв устанавливаемое и отсчитываемое времена, имеем

$$NT_g = t_0 T_{yd \min}, \quad NT_g = t_0 N_{\min} T_g, \\ N = t_0 N_{\min}, \quad (16)$$

где N_{\min} – число импульсов генератора, соответствующее минимальному отсчитываемому времени.

Реализация вычислительным устройством управляющей системы выражения (15) осуществляется следующим образом. Предварительно в постоянную память данных временного устройства записываются:

- значения t_{01k} или при небольшой разрядности n_2 кода $K2$, t_{01k}^{K2} ;
- коэффициенты интерполирующего полинома (6);
- значение N_{\min} , соответствующее минимальному устанавливаемому времени.

Указанные параметры определяются выбором разрядностей n_1 , n_2 кодов $K1$, $K2$ и разрядностью интерполирующего полинома (6).

Период T_g генератора и номинальное значение относительной дискретности ϵ ввода времени действия могут являться конструктивными параметрами временного устройства автономной системы.

В процессе ввода от внешнего прибора управления данных о требуемом времени действия во временное устройство автономной системы поступает код K , включающий в себя коды $K1$, $K2$. Вычислительное устройство этой системы по значению кода $K1$ и записанным в его память коэффициентам определяет значение t_{1p} ($K1$) интерполяционного полинома (6), соответствующее коду $K1$. Далее в соответствии с выражением (10) определяется относительное значение t_0 устанавливаемого времени действия и по формуле (16) находится N . Отсчет времени осуществляется в соответствии с выражением (15).

Если вычислительные мощности временного устройства автономной системы позволяют реализовать выражение (14), то в описанном порядке записи и отсчета времени действия реализации подлежит не интерполяционный полином (6), а выражение (14) для t_0 .

На основании проведенного анализа можно заключить:

1. Сокращение времени ввода в автономных информационных и управляющих системах необходимых данных может быть осуществлено уменьшением разрядности передаваемого в автономную систему цифрового кода, что может быть реализовано путем исключения избыточной передаваемой информации.

3. Одним из возможных путей исключения избыточной информации о требуемом времени действия предложено использование нелинейного преобразования код – время действия.

4. В качестве нелинейного преобразования код – время действия может быть использовано преобразование, у которого при использовании непрерывной модели отношение производной зависимости код – время действия к времени действия является постоянной величиной.

ной, а при использовании дискретной модели последовательность вводимых времен представляет собой геометрическую прогрессию.

5. При ограничениях вычислительных мощностей временного устройства автономной системы могут использоваться кусочно-линейные или кусочно-нелинейные интерполяционные полиномы первого или второго порядков.

6. В приведенном примере использование нелинейных преобразований при построении дистанционно управляемых автономных систем позволило уменьшить количество вводимой информации в битах на 25 % и, соответственно, необходимую разрядность кода вводимых данных – с 16 до 12 бит.

Библиографический список

1. Патент Российская Федерация 2630417, МПКН03М 1/82 (2006.01). Цифровой преобразователь код временной интервал / С. А. Калмыков, С. М. Крыжко, В. Г. Можайченко ; заявл. от 21.11.2016 ; опубл. 07.09.2017, Бюл. № 25.
2. Трофимов, В. Ю. Использование микроконтроллеров при преобразовании временного интервала в цифровой код / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 13–22.
3. Бессалов, А. Основы теории информации и кодирования / А. Бессалов. – Москва : Palmarium Academic Publishing, 2018. – 280 с.
4. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик ; под ред. А. Джеффри, Д. Цвиллингера ; пер. с англ. под ред. В. В. Максимова. – 7-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 1232 с.
5. Катцен, С. PIC-микроконтроллеры : пер. с англ. / С. Катцен. – Москва : Додэка ; ДМК Пресс, 2014. – 652 с.
6. Демидович, Б. П. Методы приближенных вычислений / Б. П. Демидович, Э. З. Шувалова, И. А. Марон. – Москва : Карьера Пресс, 2015. – 400 с.
7. АмосГилат. MATLAB. Теория и практика / пер. с англ. Н. К. Смоленцева. – 5-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 416 с.

References

1. Pat. Russian Federation 2630417, MPKN03M 1/82 (2006.01). *Tsifrovoy preobrazovatel' kod vremennoy interval* [Digital converter code time interval]. S. A. Kalmykov, S. M. Kryzhko, V. G. Mozhaychenko; appl. 21.11.2016; publ. 07.09.2017, bull. № 25. [In Russian]
2. Trofimov V. Yu., Shakhmeyster L. E. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 3 (17), pp. 13–22. [In Russian]
3. Bessalov A. *Osnovy teorii informatsii i kodirovaniya* [Fundamentals of information theory and coding]. Moscow: Palmarium Academic Publishing, 2018, 280 p. [In Russian]
4. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. *Tablitsy integralov, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, series, and products]; transl. from Engl. ed. V. V. Maksimov. 7th ed. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 1232 p. [In Russian]
5. Kattsen S. *PIC-mikrokontrollery: per. s angl.* [PIC-microcontroller: translation from English]. Moscow: Dodeka ; DMK Press, 2014, 652 p. [In Russian]
6. Demidovich B. P., Shuvalova E. Z., Maron I. A. *Metody priblizhennykh vychisleniy* [Methods of approximate calculations]. Moscow: Kar'era Press, 2015, 400 p. [In Russian]
7. *AmosGilat. MATLAB. Teoriya i praktika* [Theory and practice]. Transl. from Engl. by N. K. Smolentsev. 5th ed. Moscow: DMK Press, 2016, 416 p. [In Russian]

Трофимов Вадим Юрьевич

кандидат технических наук,
научный сотрудник,
НПО «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
г. Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: Trovadji@gmail.com

Trofimov Vadim Yurievich

candidate of technical sciences,
research fellow,
SRA "Poisk"
(3 Lesnaya street, Leningrad region,
Murino, Russia)

Шахмейстер Леонид Ефимович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
заместитель генерального директора по НИОКР,
НПО «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
г. Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: lsh43@mail.ru

Shakhmeyster Leonid Efimovich

doctor of technical sciences,
senior researcher,
deputy general director for research
and development,
SRA "Poisk"
(3 Lesnaya street, Leningrad region,
Murino, Russia)

Образец цитирования:

Трофимов, В. Ю. Нелинейные преобразователи цифрового кода во временной интервал в автономных информационных и управляющих системах / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 42–54. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-5.

К. С. Самохина

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С УВЕЛИЧЕННЫМ ПЕРИОДОМ ОДНОЗНАЧНОСТИ

K. S. Samohina

INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM BASED ON LASER OPTOELECTRONIC DEVICES WITH AN EXTENDED PERIOD OF UNAMBIGUITY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является анализ возможностей применения информационно-измерительных систем на основе лазерных оптико-электронных приборов с увеличенным периодом однозначности для измерения физических величин. **Материалы и методы.** Применены методы математического анализа; математического моделирования; математической физики; методы и средства лазерной интерферометрии; акустооптики; пространственной фильтрации; фотоэлектрических преобразований, включая оптическое гетеродинирование; прецизионных линейных измерений; вычислительной техники. **Результаты.** Рассмотрена схема информационно-измерительных систем на основе лазерных оптико-электронных приборов с увеличенным периодом однозначности для измерения физических величин. Проведен анализ данного варианта схемы для измерения линейных величин. Предложенный метод позволяет проводить измерения перемещения подвижных объектов в абсолютном режиме. **Выводы.** Пространственное положение точки, расположенной на трассе измерения, находят по абсолютному значению разности фаз двух оптических пучков «0»-го и «+1»-го дифракционных порядков. На основании проведенных расчетов сделан вывод, что период однозначности оптической схемы информационно-измерительной системы на основе оптико-электронных приборов с абсолютным отсчетом измерения изменяется от 105 до 45 мм при изменении частоты возбуждения в акустооптическом модуляторе в пределах от 6 до 9 МГц.

A b s t r a c t. Background. The purpose of the research is to analyze the possibilities of using information and measurement systems based on laser optoelectronic devices with an extended period of unambiguity for measuring physical quantities. **Materials and methods.** Applied methods of mathematical analysis; mathematical modeling; mathematical physics; methods and means of laser interferometry; acousto-optics, spatial filtration; photoelectric transformations, including optical heterodination; precision linear measurements; computer technology. **Results.** The scheme of information and measurement systems based on laser optoelectronic devices with an extended period of unambiguity for measuring physical quantities is considered. The analysis of this variant of the scheme used to measure linear quantities. The proposed method allows measuring the movement of moving objects in absolute mode. **Conclusions.** The spatial position of a point located on the measurement path is found by the absolute value of the phase difference of two optical beams of the "0" and "+1" diffraction orders. Based on the calculations, it is concluded that the period of unambiguity of the optical scheme

of an information and measurement system based on optoelectronic devices with an absolute measurement reading varies from 105 to 45 mm when the excitation frequency in the acousto-optical modulator changes in the range from 6 to 9 MHz.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптико-электронный прибор, лазерное излучение, информационно-измерительная система, период однозначности, фаза электрического сигнала.

Key words: optical-electronic device, laser radiation, information-measuring system, period of unambiguity, phase of an electric signal.

Введение

Развитие оптико-электронных информационно-измерительных систем на основе оптико-электронных приборов заключается в расширении функциональных возможностей и повышении точности измерения. В фазовых информационно-измерительных системах для измерения размеров в пределах единиц и десятков метров требуется последовательное накопление фазы измерительной информации в форме целых и дробных долей периода изменения фазы оптической волны, так как длина волны оптического излучения составляет доли и единицы микрометров.

Перспектива развития информационно-измерительных систем на основе оптико-электронных приборов заключается, в основном, в достижении ими как можно большего количества выполняемых функций [1, 2].

Исследование принципа работы устройств с абсолютным отсчетом измерения физических величин

В настоящее время методы измерения линейных размеров информационно-измерительными системами на основе оптико-электронных приборов перемещений, несмотря на высокую точность измерений, обладают некоторым эксплуатационным недостатком. Перекрытие оптического пучка во время измерения или случайные помехи приводят к потере оптической измерительной информации. В этом случае процесс измерения необходимо повторять снова. Это уменьшает производительность и достоверность измерения.

Необходимо применять информационно-измерительные системы на основе оптико-электронных приборов с абсолютным отсчетом измерения. Значение пространственного периода однозначности лазерных информационно-измерительных систем на основе оптико-электронных приборов определяется длиной волны оптического излучения λ . Увеличение значения длины волны приводит к увеличению пространственного периода однозначности, но сдвигает частотный спектр оптического излучения в инфракрасную область. Это накладывает определенные трудности, связанные с юстировкой и контролем оптической схемы информационно-измерительной системы. Поэтому необходима информационно-измерительная система на основе оптико-электронных приборов с абсолютным отсчетом измерения. Пространственный период однозначности лазерных измерительных систем определяется длиной волны света λ .

Использование эффекта взаимодействия двух когерентных оптических колебаний, имеющих разные пространственные периоды (λ_1 и λ_2), приводит к увеличению периода однозначности информационно-измерительных систем на основе оптико-электронных приборов. Разность абсолютных мгновенных значений фаз двух измерительных сигналов определяет нахождение координаты точки в пределах периода однозначности. Увеличение периода однозначности в интерференционных методах также можно получить при использовании двух оптических пучков, одновременно распространяющихся по наклонным направлениям по отношению к направлению линии измерения [3–5].

На рис. 1 представлена информационно-измерительная система на основе оптико-электронных приборов с увеличенным периодом однозначности.

Оптический сигнал от источника оптического излучения ИОИ проходит через оптическую систему ОС и модулируется в акустооптический модулятор АОМ, в котором создается ультразвуковая волна на частоте 8 МГц от источника электрического сигнала ИЭС. Испол-

зуются распространяющиеся под углом дифракции друг к другу разночастотные оптические пучки, названные «0»-ым и «+1»-ым дифракционными порядками. Эти оптические пучки имеют разные частоты, отличающиеся на значение частоты сигнала возбуждения в АОМ. Оптические пучки направляются на подвижный уголкового отражатель ПУО, отражаются от него и подвергаются вторичной дифракции в АОМ. После вторичной дифракции оптический пучок «+1»-го дифракционного порядка получает угловой наклон α , совпадающий с направлением «0»-го оптического пучка и дополнительный частотный сдвиг на величину частоты сигнала возбуждения в АОМ. Эти оптические пучки направляются через линзы оптические ЛО1,2 и диафрагму оптическую ДО на фотоэлектрический преобразователь ФЭП.

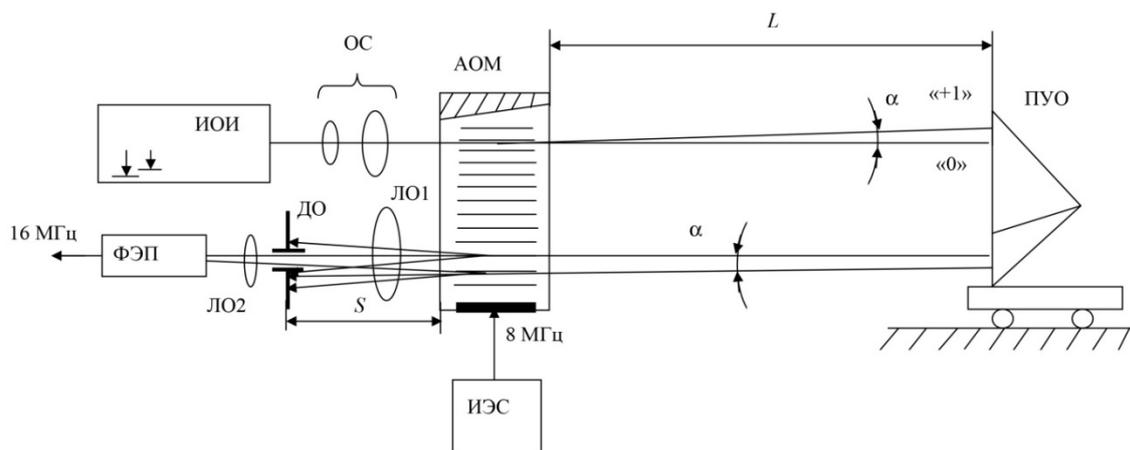


Рис. 1. Информационно-измерительная система на основе оптико-электронных приборов с увеличенным периодом однозначности

Мощности оптических пучков «0»-го P_0 и «+1»-го P_{+1} дифракционных порядков описываются [6, 7] выражениями

$$P_0 = P \sin\left(\omega t + 4\pi \frac{L}{\lambda}\right); P_{+1} = P \sin\left[(\omega + 2F)t + 4\pi L \cos \frac{\alpha}{\lambda}\right], \quad (1)$$

где P – мощность оптического излучения ИОИ; L – расстояние от АОМ до ПУО; ω – частота оптического излучения; F – частота возбуждения в АОМ; λ – длина волны оптического излучения; α – угол между направлениями распространения оптических пучков «0»-го и «+1»-го дифракционных порядков.

На выходе ФЭП выделяется измерительный сигнал, который определяется выражением [8, 9]:

$$U = U_m \cos\left(2Ft + 4\pi L \cos \frac{\alpha}{\lambda}\right). \quad (2)$$

Пространственный период однозначности предложенной оптической схемы определяется выражением

$$L_o = \lambda \frac{\cos \alpha}{2(1 - \cos \alpha)}. \quad (3)$$

При изменении частоты возбуждения сигнала в АОМ изменяется угол между направлениями распространения оптических пучков «0»-го и «+1»-го дифракционных порядков [5, 10], который определяется выражением

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda F}{C_{уз}}, \quad (4)$$

где $C_{уз}$ – скорость распространения ультразвуковой волны в АОМ.

Заключение

Расчеты по формулам (3) и (4) показывают, что период однозначности оптической схемы информационно-измерительной системы на основе оптико-электронных приборов с абсолютным отсчетом измерения изменяется от 105 до 45 мм при изменении частоты возбуждения в АОМ в пределах от 6 до 9 МГц.

Предложенный метод позволяет проводить измерения перемещения подвижных объектов в абсолютном режиме. Пространственное положение точки, расположенной на трассе измерения, находят по абсолютному значению разности фаз двух оптических пучков «0»-го и «+1»-го дифракционных порядков. Предложенный метод позволяет увеличить помехозащищенность процесса измерения, так как исключается воздействие случайных помех во время проведения измерения и пространственное положение точки определяется в пределах пространственного периода однозначности.

Библиографический список

1. *Bazykin, S. N. Principles of building information measuring systems of linear displacement / S. N. Bazykin, N. A. Bazykina, K. S. Samohina // Engineering and earth sciences: applied and fundamental research : International symposium (ISEES 2018). – URL: <https://www.atlantis-pess.com/proceedings/isees-18/55909719>*
2. *Базыкин, С. Н. Пространственные реперные точки в гетеродинных лазерных интерферометрах / С. Н. Базыкин, Н. А. Базыкина // Датчики и системы. – 2005. – № 10. – С. 19–20.*
3. *Порфирьев, Л. Ф. Основы теории преобразований сигналов в оптико-электронных системах / Л. Ф. Порфирьев. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 386 с.*
4. *Селиверов, С. Н. Широкополосный умножитель частоты / С. Н. Селиверов // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – № 5. – С. 25–27.*
5. *Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – Москва : Машиностроение, 1999. – 360 с.*
6. *Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 512 с.*
7. *Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Москва : Высш. шк., 2002. – 448 с.*
8. *Фомин, А. И. Анализ помехоустойчивости радиосистемы передачи информации мониторинга с квадратурным компенсатором узкополосных помех / А. И. Фомин, А. К. Ялин // Электросвязь. – 2016. – № 5. – С. 68–73.*
9. *Фомин, А. Ф. Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы / А. Ф. Фомин, А. И. Хорошавин, О. И. Шелухин. – Москва : Радио и связь, 1987. – 248 с.*
10. *Шахгильдян, В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин. – Москва : Связь, 1972. – 448 с.*

References

1. *Bazykin S. N., Bazykina N. A., Samohina K. S. Engineering and earth sciences: applied and fundamental research: International symposium (ISEES 2018). Available at: <https://www.atlantis-pess.com/proceedings/isees-18/55909719>*
2. *Bazykin S. N., Bazykina N. A. Datchiki i sistemy [Sensors and systems]. 2005, no. 10, pp. 19–20. [In Russian]*
3. *Porfir'ev L. F. Osnovy teorii preobrazovaniy signalov v optiko-elektronnykh sistemakh [Fundamentals of the theory of signal processing in opto-electronic systems]. Saint-Petersburg: Lan', 2013, 386 p. [In Russian]*
4. *Seliverov S. N. Pribory i tekhnika eksperimenta [Experimental devices and techniques]. 1985, no. 5, pp. 25–27. [In Russian]*
5. *Yakushenkov Yu. G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Theory and calculation of optoelectronic devices]. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 360 p. [In Russian]*
6. *Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya skhemotekhnika [Solid state circuitry]. Moscow: DMK Press, 2008, 512 p. [In Russian]*
7. *Baskakov S. I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Vyssh. shk., 2002, 448 p. [In Russian]*
8. *Fomin A. I., Yalin A. K. Elektrosvyaz' [Telecommunication]. 2016, no. 5, pp. 68–73. [In Russian]*

9. Fomin A. F., Khoroshavin A. I., Shelukhin O. I. *Analogovye i tsifrovye sinkhronno-fazovye izmeriteli i demodulyatory* [Analog and digital synchronous phase meters and demodulators]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 248 p. [In Russian]
10. Shakhgil'dyan V. V., Lyakhovkin A. A. *Sistemy fazovoy avtopodstroyki chastoty* [Phase-locked frequency systems]. Moscow: Svyaz', 1972, 448 p. [In Russian]

Самохина Кристина Сергеевна

ассистент,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: priborostroenie@bk.ru

Samohina Kristina Sergeevna

assistant,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Самохина, К. С. Информационно-измерительная система на основе лазерных оптико-электронных приборов с увеличенным периодом однозначности / К. С. Самохина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 55–59. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-6.

А. А. Коротков

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ СИГНАЛА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

A. A. Korotkov

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATING ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH OVERSAMPLING WITH INTERMEDIATE WIDTH-PULSE MODULATION IN THE COMPOSITION OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрены вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС, и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога. **Материалы и методы.** Для выбора технического аналога была проведена систематизация $\Sigma\Delta$ -АЦП и сформирована экспертная система с интегрированной базой данных. Для разработки имитационной модели, соответствующей параметрам технического аналога, была использована программная среда NI Multisim 12.0. **Результаты.** Разработана имитационная модель интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с передискретизацией сигнала с промежуточной широтно-импульсной модуляцией в составе информационно-измерительных систем. Основные параметры разработанной модели совпадают с параметрами зарубежного технического аналога. **Выводы.** Разработанная Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП согласно дихотомической систематизации относится к классу 1-1-1, т.е. с коррекцией, с элементами схемы, приближенными к реальным, реализуемая.

A b s t r a c t. Background. The article discusses the issues associated with the selection of a technical analogue from the subclass $\Sigma\Delta$ -ADC, which satisfies the technical requirements for IMS and solving the design problem of Σ -ADC, which implements one of the options for pulse modulation, as close as possible to the characteristics of the technical analogue. **Materials and methods.** To select a technical analogue, a $\Sigma\Delta$ -ADC was systematized and an expert system was formed with an integrated database. To develop a simulation model that matches the parameters of a technical analog, the NI Multisim 12.0 software environment was used. **Results.** A simulation model of an integrating analog-to-digital converter with signal oversampling with intermediate pulse-width modulation as part of information-measuring systems is developed. The main parameters of the developed model coincide with the parameters of a foreign technical analogue. **Conclusions.** According to the dichotomous systematization, the developed Multisim-model $\Sigma\Delta$ -ADC belongs to the class 1-1-1, i.e. with correction, with circuit elements close to real, realizable.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, широтно-импульсная модуляция сигнала, погрешность от краевых эффектов, технический аналог, имитационная модель.

К e y w o r d s: integrating analog-to-digital converter, pulse-width modulation of the signal, error from edge effects, technical analogue, simulation model.

Введение

В настоящее время в информационно-измерительных системах (ИИС) при построении измерительных каналов как правило используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), основанные на принципе импульсно-разностной модуляции (Δ -модуляция). Они строятся на основе алгоритмов уравнивающего интегрирующего развертывающего преобразования, что в сочетании с использованием Δ -модуляции позволяет создавать многоуровневые интегрирующие прецизионные АЦП (ИАЦП) по технологии цифровых интегральных схем, отличающиеся низкой стоимостью. Это ставит их вне конкуренции по отношению к остальным подклассам АЦП.

На основе алгоритмов уравнивающего интегрирующего развертывающего преобразования могут быть построены разнообразные варианты Σ -АЦП с преобразованием сигнала в один из видов импульсной модуляции: импульсно-разностный ($\Sigma\Delta$ -АЦП), широтно-импульсный (ΣT -АЦП), частотно-импульсный ($\Sigma\Omega$ -АЦП), фазо-импульсный ($\Sigma\psi$ -АЦП), кодо-импульсный (КИМ) сигнал [1, 2]. Среди перечисленных вариантов Σ -АЦП наибольшее распространение получил подкласс $\Sigma\Delta$ -АЦП из-за возможности реализации аналоговых интеграторов по технологии CMOS (КМОП-технологии), а алгоритмов цифровой фильтрации измерительных сигналов, реализованных по технологии SoC (Система на кристалле) [3–8]. Их развитие все последнее время шло по пути совершенствования технологий, что является главным недостатком при проектировании ИИС, в случае если возникают ограничения на элементную базу. Тогда целесообразно рассматривать Σ -АЦП, использующие перечисленные выше виды импульсной модуляции, для которых могут быть преодолены ограничения на элементную базу. Однако на этом пути возникает целый ряд нерешенных задач, связанных с недостаточностью теории и практики разработки всего класса Σ -АЦП.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога.

Выбор технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП

Можно выделить два пути развития Σ -АЦП, по которым осуществляется совершенствование данного класса преобразователей. Совершенствование связано в первую очередь с развитием элементной базы, что дает расширение частотного диапазона, снижение энергопотребления и габаритов, а также повышение точности за счет более сложных структурно-алгоритмических решений.

Однако при этом есть серьезные ограничения, связанные с рядом методических погрешностей, из которых основной является погрешность от краевых эффектов [8, 9]. Кроме того, при реализации алгоритмов преобразования информации в АЦП с сигма-дельта архитектурой возникает проблема привязки результата измерения к времени преобразования, что существенно ограничивает их применение при решении измерительных задач [10].

Ко второму пути развития ИАЦП можно отнести использование технических решений из ранних разработок, когда главная проблема совершенствования ИАЦП, связанная с несовершенством элементной базы, решалась путем поиска новых вариантов структур и алгоритмов ИАЦП.

В многообразной практике измерительной техники возникают задачи, инженерные решения которых вызывают значительные трудности в рамках концепции использования $\Sigma\Delta$ -АЦП в виде монолитных ИМС. В этих случаях целесообразно в качестве альтернативы рассматривать варианты АЦП с промежуточной ШИМ [11].

Концепция $\Sigma\Delta$ -АЦП в виде монолитных ИМС предполагает использование сложных цифровых фильтров, что вызывает значительные трудности при смене технологии изготовления, при наличии ограничительного списка на элементную базу, необходимости предельного снижения энергопотребления, повышения помехоустойчивости (использование аналоговых интеграторов) и т.д.

Погрешность от краевых эффектов интегрирующих АЦП связана с невозможностью обеспечения равенства интегральных значений измеряемой величины с интегральными значениями опорного напряжения в конце интервала интегрирования. Значение амплитуды остаточного напряжения является погрешностью от краевого эффекта (погрешность квантования во временной области), в отличие от $\Sigma\Delta$ -АЦП, для которых имеет место погрешность квантования по амплитуде.

С этой точки зрения $\Sigma\Delta$ -АЦП можно разделить на два подкласса по критерию наличия или отсутствия элементов коррекции погрешности от краевых эффектов. На первом этапе проектирования разрабатываются идеальные модели $\Sigma\Delta$ -АЦП для анализа методических погрешностей, которые в дальнейшем переводятся в модели, отражающие реальные характеристики элементов для оценки инструментальных погрешностей.

Однако может возникнуть ситуация, когда выбранная структура в силу внешних ограничений на элементную базу не может быть реализована или будет обладать недопустимыми характеристиками. Поэтому необходимо предусмотреть заключительное разделение структурно-алгоритмических решений на два подкласса – реализуемые и нереализуемые для данных конкретных условий реализации. Описанные выше процедуры разработки $\Sigma\Delta$ -АЦП удобно представить в виде дихотомической систематизации, представленной на рис. 1.

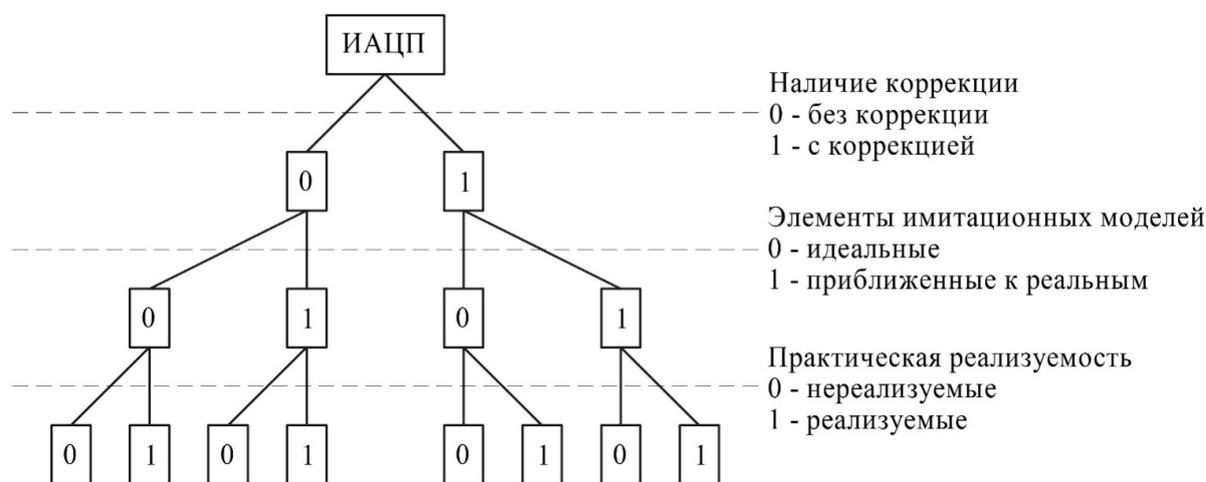


Рис. 1. Дихотомическая систематизация $\Sigma\Delta$ -АЦП

Данная систематизация позволила провести исследование известных структур $\Sigma\Delta$ -АЦП, осуществить поиск новых технических решений в рамках единого методологического подхода. Согласно этому подходу может быть решена важная задача проектирования, а именно, обоснованное принятие решения о реальных технических характеристиках $\Sigma\Delta$ -АЦП при условии минимальных затрат на экспериментальные исследования. Данный подход основан на понятии о ближайшем техническом аналоге, который используется в смежных областях измерительной техники и обладает совокупностью технических характеристик, в первом приближении удовлетворяющих требованиям технического задания. Однако в силу ряда ограничений непосредственное использование технического аналога либо встречается существенные трудности, либо полностью невозможно. В данной работе в качестве технических аналогов для $\Sigma\Delta$ -АЦП рассматривается подкласс $\Sigma\Delta$ -АЦП, выполненный по технологии «система на кристалле», которые являются несомненными лидерами по таким характеристикам, как разрядность, энергопотребление, стоимость. Наличие технического аналога упрощает проведение обоснованного принятия решения о реальных технических характеристиках $\Sigma\Delta$ -АЦП на этапе анализа практической реализуемости. Это достигается за счет выявления критически важных

элементов, параметры которых определяют инструментальную погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП, и сопоставления их с характеристиками технического аналога ($\Sigma\Delta$ -АЦП).

Для решения задачи выбора технического аналога необходимо сформулировать критерии выбора и организовать прикладное ПО с базой данных на $\Sigma\Delta$ -АЦП. На последнем уровне проектирования решается задача, важная с точки зрения практической реализации, учета ограничений по выбору элементной базы, технологии, а также на системном уровне, в рамках которого формулируются дополнительные требования по интеграции АЦП в информационно-измерительные системы. Несмотря на явную избыточность данного подхода, в качестве положительного момента можно отметить гарантию получения реализуемого технического решения, оптимального по множеству критериев, заложенных в техническое задание.

Существует большое количество разновидностей $\Sigma\Delta$ -модуляторов. Поэтому целесообразно ограничиться их разделением на подклассы лишь по самым основным признакам. В качестве таковых будем использовать классификационные признаки, которые изложены в работе [8]. Классификационный граф $\Sigma\Delta$ -модуляторов представлен на рис. 2.

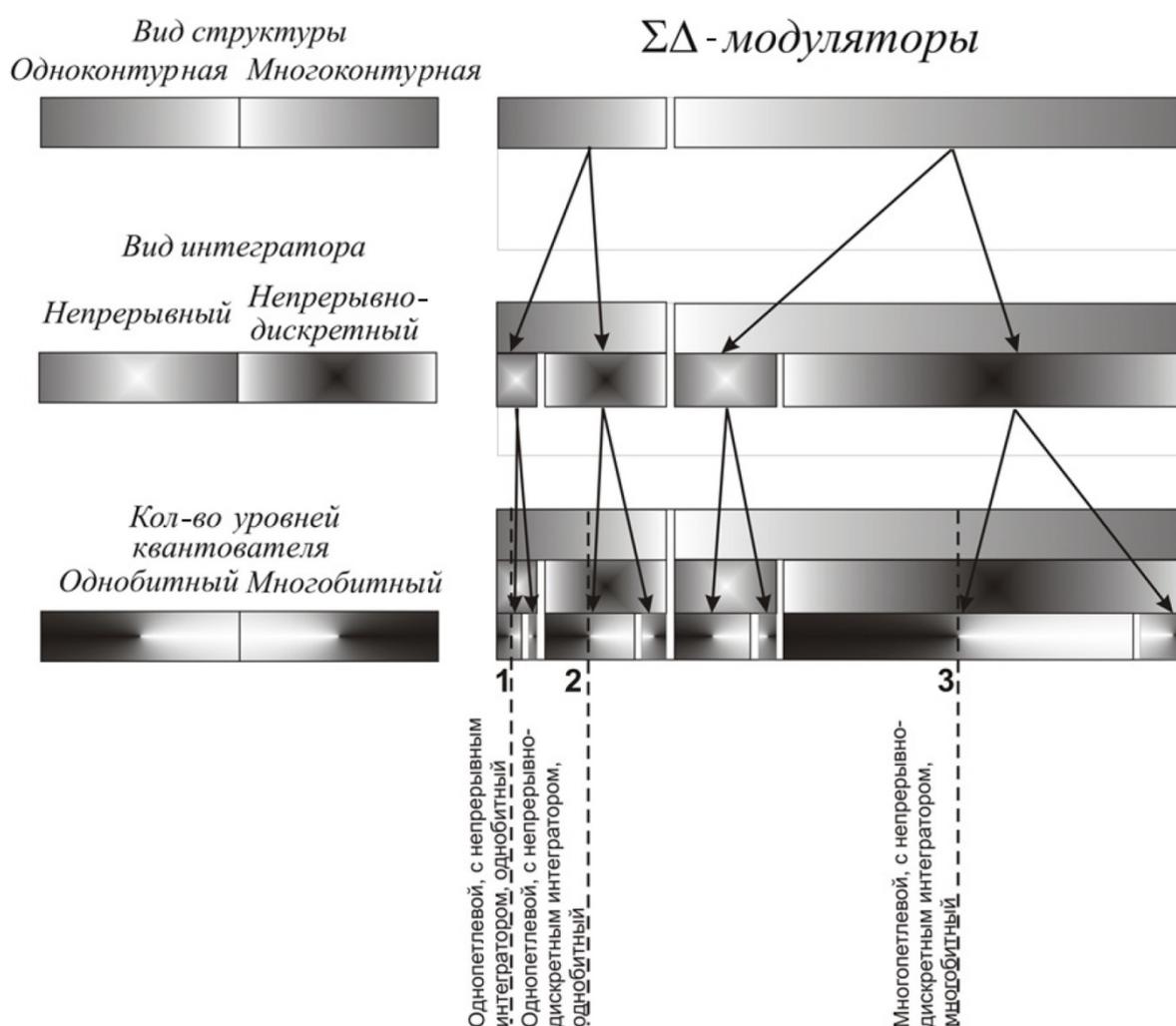


Рис. 2. Классификационный граф $\Sigma\Delta$ -модуляторов

В разработанной СППР [12] предусмотрено два режима работы – Новичок и Эксперт. Доступен выбор типа преобразователя. В режиме эксперта доступно редактирование характеристик микросхем и расстановка приоритета их отбора по 8-балльной шкале (1 – самые важные). По умолчанию приоритет выставлен 1, параметры не учитываются до указания.

В ходе анализа характеристик производимых микросхем для выбора технического аналога предложено следующее деление параметров по классам:

- быстродействие: высокое (свыше 10М выборок в секунду), среднее (от 10к до 10М), низкое (до 10к), где к – кило (10^3), М – мега (10^6);
 - точность (эффективная разрядность, ENOB – Effective Number of Bits): высокая (от 20 бит), средняя (16–20 бит), низкая (до 16 бит);
 - потребляемая мощность: маломощные (до 100 мВт), мощные (свыше 100 мВт);
 - заявленная разрядность: высокая (от 20 бит), средняя (16–20 бит), низкая (до 16 бит);
 - тип интерфейса: последовательный (serial), параллельный (parallel), иной;
 - тип корпуса (номенклатура корпусов взята из прилагаемых сопроводительных информационных листов микросхем – DataSheet);
 - тип выхода: аналоговый (токовый), цифровой;
 - цена: дорогие (свыше 50 \$), средние (10–50 \$), недорогие (до 10 \$).
- Разработанная СППР показана на рис. 3.

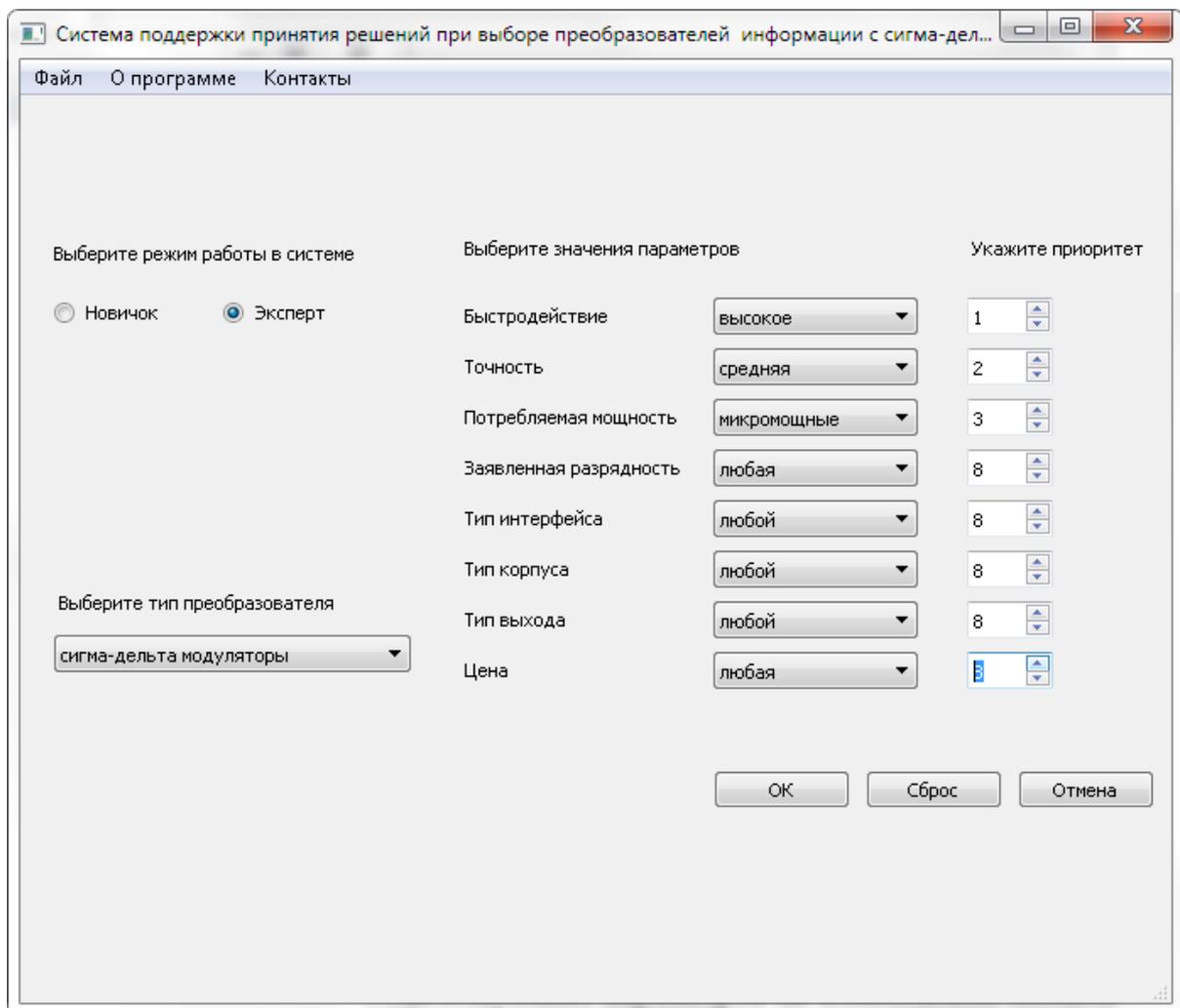


Рис. 3. Оконная форма СППР

СППР позволяет выбрать технический аналог, параметры которого удовлетворяют разрабатываемому проекту – ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

Интегрирующий АЦП с широтно-импульсной модуляцией

Средствами программной среды NI Multisim была разработана имитационная модель 16-битного $\Sigma\Delta$ -АЦП [13] с частотой дискретизации 5 МГц (рис. 4), по характеристикам близкая к техническому аналогу – ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

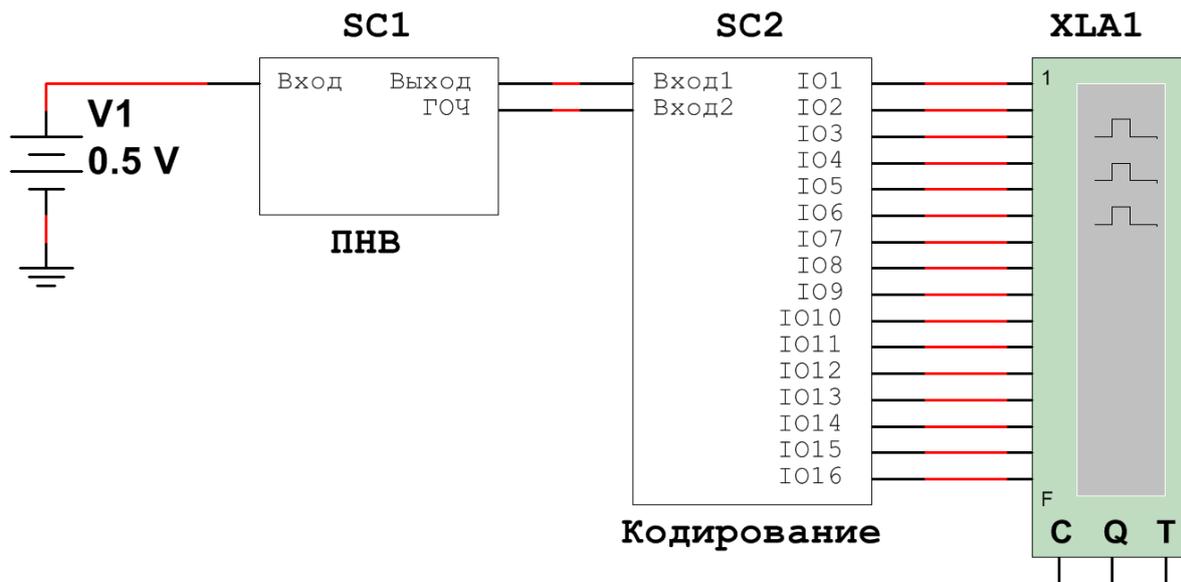


Рис. 4. Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП с идеальными параметрами элементов

Поскольку модельный лист имеет размерные ограничения, устройство структурно разделено на две подсистемы (SC1 и SC2), имитирующие преобразователь напряжения в интервал времени и подсистему кодирования информативного интервала времени. Подсистема SC1 представлена на рис. 5.

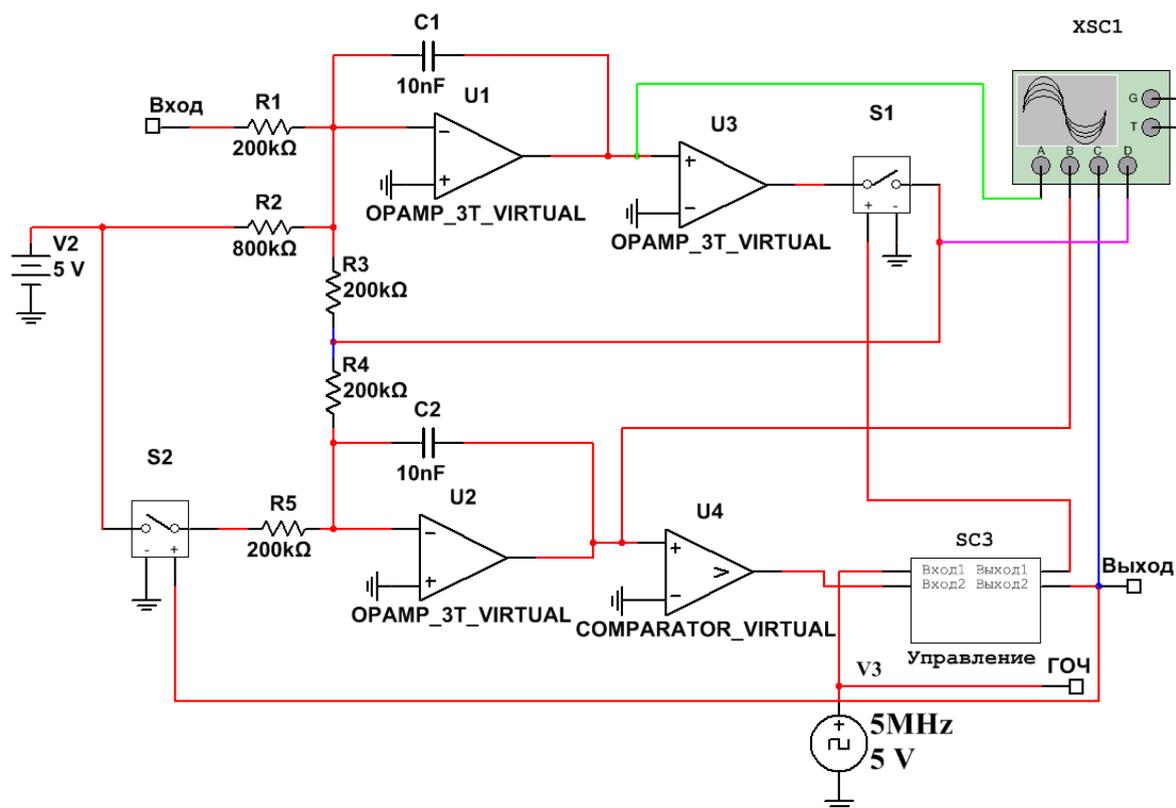


Рис. 5. Подсистема SC1

Подсистема кодирования информативного интервала времени (SC2) представлена на рис. 6.

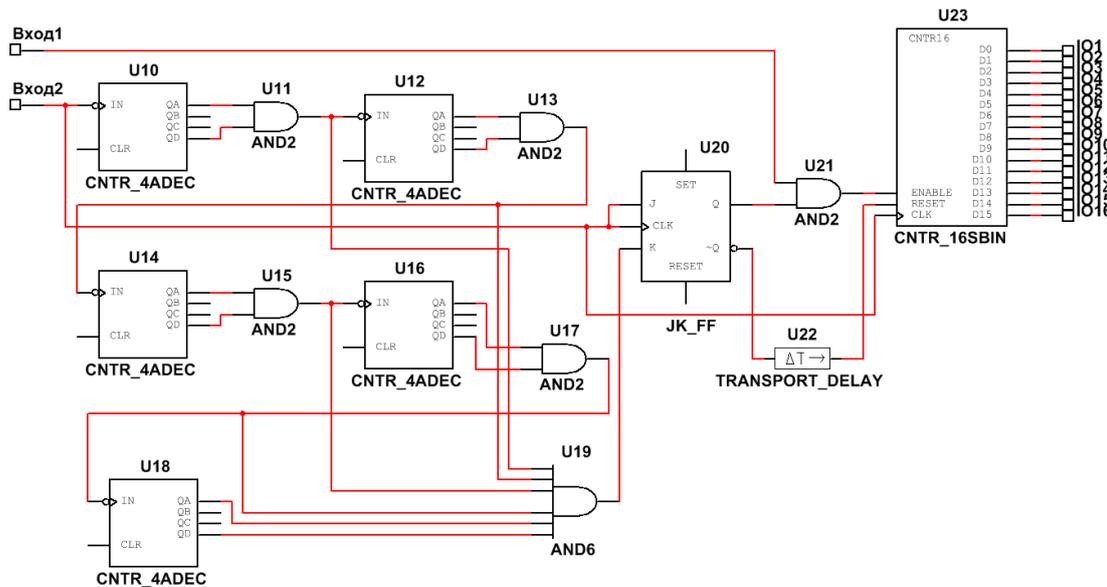


Рис. 6. Подсистема SC2

Исследование разработанной Multisim-модели $\Sigma\Delta$ -АЦП показало [13], что при идеальных параметрах аналоговых элементов отклонения линейности преобразования полностью отсутствуют. Также была исследована реакция АЦП на сетевую помеху в виде гармонического входного сигнала (синусоида) частотой 50 Гц и амплитудой 1 В. Для гармонического воздействия частотой 50; 49,5; 49 Гц помехоподавление ИАЦП без входного фильтра составило $-76,5$; $-70,5$; $-55,7$ дБ соответственно.

Заключение

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога.

Разработанная Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП согласно дихотомической систематизации относится к классу 1-1-1, т.е. с коррекцией, с элементами схемы, приближенными к реальным, реализуемая. По разрядности и частоте дискретизации соответствует техническому аналогу ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

Библиографический список

1. Ашанин, В. Н. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 214 с.
2. Ашанин, В. Н. Виды интегрирующих аналого-цифровых преобразователей / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов // Измерения. Контроль. Автоматизация: состояние, проблемы, перспективы. – 2009. – № 3 – С. 47–51.
3. Lee, W. L. A novel higher order interpolative modulator topology for high resolution oversampling A/D converters: Master's Thesis / W. L. Lee. – Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1982.
4. Adams, R. W. Design and implementation of an audio 18-bit analog-to-digital converter using oversampling techniques / R. W. Adams // Journal of the Audio Engineering Society. – 1986. – Vol. 34, № 3. – P. 153–166.
5. Norsworthy, S. R. Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation / S. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes. – Piscataway, NJ : IEEE Press, 1997.
6. Xu, Ye. A Wideband High Dynamic Range Continuous-Time Sigma-Delta ADC for Wireless Applications / Ye Xu // Master's Thesis at school of ICT. – Integrated Devices and Circuits. – 2010. – 77 p.
7. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press, 2005. – 446 p.
8. Ашанин, В. Н. $\Sigma\Delta$ -АЦП: основы теории и проектирование : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 188 с.

9. Шахов, Э. К. Интегрирующие развертывающие преобразователи / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
10. Ашанин, В. Н. Особенности оценки погрешности измерения преобразователей информации с дискретизацией сигнала / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2009. – Вып. 10. – С. 10–11.
11. Надеев, А. И. Сравнительный анализ интегрирующих АЦП с промежуточным преобразованием в сигналы широтной и разностной импульсной модуляции / А. И. Надеев // Информационно-измерительная техника : межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – Вып. 31. – С. 99–106.
12. Ashanin, V. N. Development of Engineering Application for a Choice of Data Converters with Sigma Delta Architecture / V. N. Ashanin, B. V. Chuvykin, A. A. Korotkov, I. A. Sidorova // Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE). – Moscow, 2015. – P. 251–254.
13. Ashanin, V. N. Realisation of Integrating Analog-Digital Converter with Intermediate Time-Impulse Modulation Using NI Multisim / V. N. Ashanin, A. A. Korotkov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. – MWENT 2018. – Proceedings 1. – 2018. – P. 1–7.

References

1. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya* [Theory of integrating analog-to-digital conversion: monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 214 p. [In Russian]
2. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Izmereniya. Kontrol'. Avtomatizatsiya: sostoyanie, problema, perspektivy* [Measurements. Control. Automation: state, problems, prospects]. 2009, no. 3, pp. 47–51. [In Russian]
3. Lee W. L. *A novel higher order interpolative modulator topology for high resolution oversampling A/D converters: Master's Thesis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
4. Adams R. W. *Journal of the Audio Engineering Society*. 1986, vol. 34, no. 3, pp. 153–166.
5. Norsworthy S. R., Schreier R., Temes G. C. *Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation*. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1997.
6. Xu Ye. *Master's Thesis at school of ICT. – Integrated Devices and Circuits*. 2010, 77 p.
7. Schreier R., Temes G. C. *Understanding delta-sigma data converters*. New Jersey: IEEE Press, 2005, 446 p.
8. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *ΣΔ-АЦП: основы теории и проектирование: monografiya* [ΣΔ-ADC: fundamentals of theory and design : monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 188 p. [In Russian]
9. Shakhov E. K., Mikhotin V. D. *Integriruyushchie razvertvyvayushchie preobrazovateli* [Integrating deployable converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
10. Ashanin V. N., Chuvykin B. V. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: collection of articles of the International scientific and technical conference] Penza: PGTA, 2009, iss. 10, pp. 10–11. [In Russian]
11. Nadeev A. I. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Information and measurement technology: interuniversity collection of scientific papers]. Penza: Izd-vo PGU, 2007, iss. 31, pp. 99–106. [In Russian]
12. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Korotkov A. A., Sidorova I. A. *Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE)*. Moscow, 2015, pp. 251–254.
13. Ashanin V. N., Korotkov A. A. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. MWENT 2018, Proceedings 1, 2018, pp. 1–7.

Коротков Алексей Александрович

аспирант,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
 инженер-конструктор 2-й категории,
 Научно-исследовательский институт
 электронно-механических приборов
 (Россия, г. пенза, ул. Каракозова, 4)
 E-mail: lexifer@mail.ru

Korotkov Aleksey Aleksandrovich

postgraduate student,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);
 design engineer of the 2nd category,
 Research Institute of Electronic
 and Mechanical Devices
 (4 Karakozova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Коротков, А. А. Разработка интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с передискретизацией сигнала с промежуточной широтно-импульсной модуляцией в составе информационно-измерительных систем / А. А. Коротков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 60–68. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-7.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 684.4.05

DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-8

*Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, В. В. Антипенко,
В. А. Баранов, Ю. А. Вареник, В. С. Александров*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ И СВОЙСТВ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ,
СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА**

*E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, V. V. Antipenko,
V. A. Baranov, Yu. A. Varenik, V. S. Alexandrov*

**MODELING THE RELATIONSHIP BETWEEN
TECHNOLOGICAL MODES AND PROPERTIES OF AN OXIDE
COATING SYNTHESIZED BY SPRAY PYROLYSIS**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Свойства прозрачных проводящих оксидов, обуславливающие возможность их использования в элементах функциональной электроники, в солнечных элементах, зависят от ряда технологических режимов. Цель данного исследования заключается во всестороннем исследовании и моделировании взаимосвязей между свойствами синтезируемых покрытий и влияющими факторами различной природы, что позволит решить актуальную задачу синтеза покрытий с заданными свойствами. **Материалы и методы.** Исследование посвящено моделированию на основе теории графов, а также с использованием пакета программ STATGRAPHICS взаимосвязей параметров технологического процесса спрей-пиролиза на примере синтеза тонких пленок прозрачных проводящих оксидов. **Результаты.** Впервые предложена модель взаимосвязи параметров прозрачных проводящих покрытий и свойств оксидных покрытий в виде ориентированного графа, на основе которой разработана аналитическая модель в виде системы уравнений. В левой части каждого уравнения – приращение соответствующего параметра реакции; в правой части – сумма произведений свойств и приращений параметров-воздействий. **Выводы.** Разработанная аналитическая модель взаимосвязи технологических параметров процесса спрей-пиролиза и свойств прозрачных проводящих оксидов, а также полученные в результате корреляционного и регрессионного анализа модели исследуемых взаимосвязей в виде уравнений регрессии позволяют автоматизировать выбор технологических режимов для синтеза покрытий с заданными свойствами.

A b s t r a c t. Background. The properties of transparent conductive oxides, which make it possible to use them in functional electronics elements, in solar cells, depend on a number of technological modes. The purpose of this study is to comprehensively study and simulate the relationship between the properties of synthesized coatings and influencing factors of different nature, which will solve the urgent problem of synthesizing coatings with desired properties.

Materials and methods. The study is devoted to modeling on the basis of graph theory, as well as using the STATGRAPHICS software package, of the relationships between the parameters of the spray pyrolysis technological process using the example of the synthesis of thin films of transparent conducting oxides. **Results.** For the first time, a model of the relationship between the parameters of transparent conductive coatings and the properties of oxide coatings in the form of an oriented graph is proposed, on the basis of which an analytical model in the form of a system of equations has been developed. On the left side of each equation is the increment of the corresponding reaction parameter; on the right – the sum of the products of properties and increments of parameters-effects. **Conclusions.** The developed analytical model of the relationship between the technological parameters of the spray pyrolysis process and the properties of transparent conducting oxides, as well as the models of the investigated relationships obtained as a result of the correlation and regression analysis in the form of regression equations, make it possible to automate the selection of technological modes for the synthesis of coatings with specified properties.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прозрачные проводящие оксиды, технологические параметры, метод спрей-пиролиза, ориентированный граф, модели взаимосвязи параметров.

К e y w o r d s: transparent conducting oxides, technological parameters, spray pyrolysis method, oriented graph, models of the relationship of parameters.

Введение

В зависимости от режима обработки технологический процесс спрей-пиролиза позволяет получить как различного вида порошки: магнитные порошки гексаферритов, TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 [1–4], так и тонкие пленки прозрачных проводящих оксидов (ППО), поглощающих покрытий, защитных и т.д. Однако широкое промышленное внедрение спрей-пиролиза сдерживается большим количеством разнородных одновременно влияющих факторов [5], усложняющих подбор оптимального технологического режима, а также несовершенством измерительного оборудования, которое применяется для контроля технологических параметров в процессе синтеза покрытий [6].

Авторами предложена методология, которая включает в себя совокупность моделей, описывающих процесс спрей-пиролиза: графовую модель взаимосвязи между параметрами синтеза ППО-процесса и свойствами оксидного покрытия; аналитическую модель в виде системы дифференциальных уравнений; модель в виде совокупности уравнений, полученных в результате корреляционного и регрессионного анализа экспериментально полученных зависимостей параметров-реакций от параметров-воздействий, которые в совокупности позволили разработать методику управляемого синтеза ППО с заданными свойствами.

Графовая модель взаимосвязи между параметрами синтеза ППО и свойствами оксидного покрытия

Всю совокупность факторов, влияющих на свойства и параметры качества ППО-покрытий, можно представить в виде ориентированного графа (рис. 1). На графовой модели вершинами показаны параметры процесса спрей-пиролиза, которые могут выступать в качестве воздействий и реакций на эти воздействия. Дугами обозначены свойства, возникающие вследствие проявления физических эффектов, причем стрелки направлены от параметров-воздействий к параметрам-реакциям.

Параметры воздействия: T – температура пиролиза; χ – концентрация примеси; V – объем раствора; v – скорость распыления; P – давление в распылителе; t – время распыления; l – расстояние между подложкой и распылителем, ε – диэлектрическая проницаемость материала на высоких частотах.

Параметры реакции: R – сопротивление, D – коэффициент пропускания.

Ряд параметров зависит от других факторов, что влияет на параметры процесса. Следующие параметры являются как воздействиями, так и реакциями:

$$J, n, \mu, Ef, d, Eg, L, \varepsilon f, K, p, \rho, \eta, n_k, c, \omega, \tau.$$

Множество параметров-воздействий, которые не являются реакциями (рис. 3), описывается следующим образом:

$$A = \{T, \chi, l, V, v, P, \varepsilon, t\}.$$

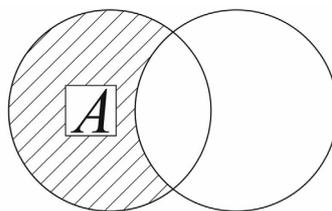


Рис. 3. Обозначение множества A

При этом множество A может быть найдено как разность множеств:

$$A = V / VR = \{x | x \in V \text{ и } x \notin VR\}.$$

Взаимосвязи между параметрами синтеза ППО и свойствами оксидных покрытий можно выразить в виде свойств, характеризующих физический эффект (изменение реакции вследствие воздействия), что показано в табл. 1.

Таблица 1

Взаимосвязи между параметрами синтеза ППО и свойствами оксидных покрытий

Свойство	Математическое описание	Свойство	Математическое описание
1	2	3	4
Egc	$Egc = \frac{\partial c}{\partial Eg}$	Tc	$Tc = \frac{\partial c}{\partial T}$
JR	$JR = \frac{\partial R}{\partial J}$	Ac	$Ac = \frac{\partial c}{\partial A}$
TR	$TR = \frac{\partial R}{\partial T}$	ηn_k	$\eta n_k = \frac{\partial n_k}{\partial \eta}$
nR	$nR = \frac{\partial R}{\partial n}$	$\varepsilon f n_k$	$\varepsilon f n_k = \frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon f}$
μR	$\mu R = \frac{\partial R}{\partial \mu}$	Egn_k	$Egn_k = \frac{\partial n_k}{\partial Eg}$
EfR	$EfR = \frac{\partial R}{\partial Ef}$	Vp	$Vp = \frac{\partial p}{\partial V}$
dR	$dR = \frac{\partial R}{\partial d}$	χp	$\chi p = \frac{\partial p}{\partial \chi}$
LR	$LR = \frac{\partial R}{\partial L}$	dp	$dp = \frac{\partial p}{\partial d}$
$\varepsilon f R$	$\varepsilon f R = \frac{\partial R}{\partial \varepsilon f}$	bp	$bp = \frac{\partial p}{\partial b}$
KR	$KR = \frac{\partial R}{\partial K}$	Tp	$Tp = \frac{\partial p}{\partial T}$
bR	$bR = \frac{\partial R}{\partial b}$	lp	$lp = \frac{\partial p}{\partial l}$
χ^n	$\chi^n = \frac{\partial n}{\partial \chi}$	tp	$tp = \frac{\partial p}{\partial t}$
Vn	$Vn = \frac{\partial n}{\partial V}$	Pp	$Pp = \frac{\partial p}{\partial P}$

Окончание табл. 1

1	2	3	4
dn	$dn = \frac{\partial n}{\partial d}$	$\nu\rho$	$\nu\rho = \frac{\partial p}{\partial \nu}$
$\chi\mu$	$\chi\mu = \frac{\partial \mu}{\partial \chi}$	$V\rho$	$V\rho = \frac{\partial \rho}{\partial V}$
$V\mu$	$V\mu = \frac{\partial \mu}{\partial V}$	$\chi\rho$	$\chi\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \chi}$
$d\mu$	$d\mu = \frac{\partial \mu}{\partial d}$	$T\rho$	$T\rho = \frac{\partial \rho}{\partial T}$
$b\mu$	$b\mu = \frac{\partial \mu}{\partial b}$	$l\rho$	$l\rho = \frac{\partial \rho}{\partial l}$
$\varepsilon\epsilon f$	$\varepsilon\epsilon f = \frac{\partial \epsilon f}{\partial \varepsilon}$	$\nu\rho$	$\nu\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \nu}$
$\tau\epsilon f$	$\tau\epsilon f = \frac{\partial \epsilon f}{\partial \tau}$	χA	$\chi\mu = \frac{\partial A}{\partial \chi}$
$\omega\epsilon f$	$\omega\epsilon f = \frac{\partial \epsilon f}{\partial \omega}$	$nE f$	$nE f = \frac{\partial E f}{\partial n}$
Vd	$Vd = \frac{\partial d}{\partial V}$	μL	$\mu L = \frac{\partial L}{\partial \mu}$
νd	$\nu d = \frac{\partial d}{\partial \nu}$	nL	$nL = \frac{\partial L}{\partial n}$
Td	$Td = \frac{\partial d}{\partial T}$	dEg	$dEg = \frac{\partial E g}{\partial d}$
pd	$pd = \frac{\partial d}{\partial p}$	$n\tau$	$n\tau = \frac{\partial \tau}{\partial n}$
χd	$\chi d = \frac{\partial d}{\partial \chi}$	$\chi\tau$	$\chi\tau = \frac{\partial \tau}{\partial \chi}$
td	$td = \frac{\partial d}{\partial t}$	$\mu\tau$	$\mu\tau = \frac{\partial \tau}{\partial \mu}$
ld	$ld = \frac{\partial d}{\partial l}$	$K\tau$	$K\tau = \frac{\partial \tau}{\partial K}$
$K\eta$	$K\eta = \frac{\partial \eta}{\partial K}$	$d\tau$	$d\tau = \frac{\partial \tau}{\partial d}$
$\rho\eta$	$\rho\eta = \frac{\partial \eta}{\partial \rho}$	TK	$TK = \frac{\partial K}{\partial T}$
$P\eta$	$P\eta = \frac{\partial \eta}{\partial P}$	χK	$\chi K = \frac{\partial K}{\partial \chi}$
$n_k\eta$	$n_k\eta = \frac{\partial \eta}{\partial n_k}$	VK	$VK = \frac{\partial K}{\partial V}$
dD	$dD = \frac{\partial D}{\partial d}$	tK	$tK = \frac{\partial K}{\partial t}$
KD	$KD = \frac{\partial D}{\partial K}$	νK	$\nu K = \frac{\partial K}{\partial \nu}$
nD	$nD = \frac{\partial D}{\partial n}$	$n\omega$	$n\omega = \frac{\partial \omega}{\partial n}$
ηD	$\eta D = \frac{\partial D}{\partial \eta}$	$\varepsilon\omega$	$\varepsilon\omega = \frac{\partial \omega}{\partial \varepsilon}$
cD	$cD = \frac{\partial D}{\partial c}$		

На основе ориентированного графа (см. рис. 1) авторами разработана аналитическая модель взаимосвязи параметров синтеза ППО. Указанная модель представляет собой систему уравнений. В левой части каждого уравнения – приращение соответствующего параметра реакции; в правой части – сумма произведений свойств и приращений параметров-воздействий:

$$\begin{cases}
 \partial R = JR \cdot \partial J + TR \cdot \partial T + nR \cdot \partial n + \mu R \cdot \partial \mu + EfR \cdot \partial Ef + dR \cdot \partial d + LR \cdot \partial L + \epsilon fR \cdot \partial \epsilon f + KR \cdot \partial K + bR \cdot \partial b, \\
 \partial n = \chi n \cdot \partial \chi + Vn \cdot \partial V + dn \cdot \partial d, \\
 \partial \mu = \chi \mu \cdot \partial \chi + V \mu \cdot \partial V + d \mu \cdot \partial d + b \mu \cdot \partial b, \\
 \partial \epsilon f = \epsilon \epsilon f \cdot \partial \epsilon + \tau \epsilon f \cdot \partial \tau + \omega \epsilon f \cdot \partial \omega, \\
 \partial d = Vd \cdot \partial V + vd \cdot \partial v + Td \cdot \partial T + pd \cdot \partial p + \chi d \cdot \partial \chi + td \cdot \partial t + ld \cdot \partial l, \\
 \partial \eta = K \eta \cdot \partial K + p \eta \cdot \partial p + P \eta \cdot \partial P + n_k \eta \cdot \partial n_k, \\
 \partial D = dD \cdot \partial d + KD \cdot \partial K + nD \cdot \partial n + \eta D \cdot \partial \eta + cD \cdot \partial c, \\
 \partial c = Tc \cdot \partial T + Ac \cdot \partial A + Eg c \cdot \partial Eg, \\
 \partial p = Vp \cdot \partial V + \chi p \cdot \partial \chi + dp \cdot \partial d + bp \cdot \partial b + Tp \cdot \partial T + lp \cdot \partial l + tp \cdot \partial t + Pp \cdot \partial P + vp \cdot \partial v, \\
 \partial \rho = V \rho \cdot \partial V + \chi \rho \cdot \partial \chi + T \rho \cdot \partial T + l \rho \cdot \partial l + v \rho \cdot \partial v, \\
 \partial J = TJ \cdot \partial T + LJ \cdot \partial L + vJ \cdot \partial v + pJ \cdot \partial p, \\
 \partial \tau = n \tau \cdot \partial n + \chi \tau \cdot \partial \chi + \mu \tau \cdot \partial \mu + K \tau \cdot \partial K + d \tau \cdot \partial d, \\
 \partial K = TK \cdot \partial T + \chi K \cdot \partial \chi + VK \cdot \partial V + tK \cdot \partial t + vK \cdot \partial v, \\
 \partial \omega = n \omega \cdot \partial n + \epsilon \omega \cdot \partial \epsilon, \\
 \partial n_k = \eta n_k \cdot \partial \eta + \epsilon f n_k \cdot \partial \epsilon f + E g n_k \cdot \partial E g, \\
 \partial L = nL \cdot \partial n + \mu L \cdot \partial \mu, \\
 \partial E g = d E g \cdot \partial d, \\
 \partial E f = n E f \cdot \partial n, \\
 \partial A = \chi A \cdot \partial \chi.
 \end{cases} \quad (1)$$

Согласно первому уравнению системы (1) на сопротивление R оказывают влияние изотропность J , концентрация n и подвижность μ носителей заряда, энергия Ферми Ef , толщина d , длина свободного пробега L , размер кристаллитов b , количество дефектов K и диэлектрическая функция плазменной частоты ϵf , на которые в свою очередь оказывает влияние совокупность взаимосвязанных факторов, что описывают соответствующие выражения рассматриваемой системы.

Выявление совокупности параметров, подлежащих экспериментальному определению

Система уравнений (1) содержит 20 уравнений, которые характеризуются отношениями приращений параметров-реакций к параметрам-воздействиям. При этом полагаем, что параметры-воздействия и реакции возможно измерить посредством экспериментов. Тогда для решения системы необходимо стабилизировать ряд параметров в условиях эксперимента. Анализ модели показал целесообразность стабилизации параметров: χ , V , T .

В работе [7] авторами предложена методика выбора оптимальной совокупности функциональных зависимостей, удовлетворяющих критерию максимальной информативности при минимальном количестве составляющих, которая ранее была апробирована при исследовании свойств активных диэлектриков.

В результате данного исследования авторами установлено, что наиболее важными технологическими параметрами, влияющими на свойства ППО-покрытий, выступают температура пиролиза, концентрация и объем раствора.

Корреляционный и регрессионный анализ экспериментально полученных зависимостей параметров-реакций от параметров-воздействий

Обработка результатов экспериментальных исследований проведена в пакете *STATGRAPHICS*. Целью обработки экспериментальных данных является синтез математических моделей взаимосвязей физических величин в процессе синтеза ППО.

Обработка данных включает в себя следующие этапы: корреляционный анализ, регрессионный анализ.

В процессе корреляционного анализа по абсолютному значению коэффициента корреляции выявлено наличие корреляции между параметрами процесса ППО и, при наличии, ее тип. В ходе регрессионного анализа установлены аналитические математические модели исследуемых корреляционных связей в виде уравнений регрессии. Пакет *STATGRAPHICS* поддерживает большое количество различных типов уравнений регрессии. По результатам анализа объекта исследования принято решение принять экспоненциальное уравнение как единую универсальную форму уравнения регрессии для описания взаимосвязей процесса синтеза ППО.

Выбор экспоненциальной формы уравнения регрессии обоснован следующими аргументами:

- единая форма уравнения регрессии обеспечивает однородность модели, ее наглядность и удобство анализа;
- многие взаимосвязи, возникающие в процессе синтеза ППО, теоретически описываются в экспоненциальной форме;
- экспоненциальная функция бесконечно дифференцируема с сохранением типа функции, что облегчает как исследование динамических свойств процесса синтеза ППО на основе математической модели в виде системы дифференциальных уравнений, так и метрологический анализ каналов измерения технологических параметров и свойств покрытий.

Таким образом, модели (математические модели взаимосвязей физических величин в процессе синтеза ППО, аналитическая модель взаимосвязи параметров-воздействий, параметров-реакций, полученная на основе графовой модели) целесообразно использовать при автоматизации процесса синтеза прозрачных проводящих покрытий для подбора технологических режимов с целью получения покрытий с заданными свойствами [8–10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

Библиографический список

1. Кондрашин, В. И. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова / В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодежной науч. школы-семинара. – Ульяновск, 2016. – С. 175–176.
2. Зинченко, Т. О. Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2018. – С. 256–258.
3. Electrical properties of transparent conductive ato coatings obtained by spray pyrolysis / Т. О. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Materials, Alloys and Experimental Mechanics, ICMAEM 2017". – India, 2017. – P. 012255.
4. Паньков, В. В. Применение метода распылительного пиролиза для получения функциональных материалов / В. В. Паньков // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2007. – № 2. – С. 3–13.
5. Власов, А. И. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники / А. И. Власов, В. В. Маркелов, Д. Е. Зотьева // Датчики и системы. – 2014. – № 8. – С. 55–66.
6. Печерская, Е. А. Структура интеллектуальной системы поддержки исследований параметров сегнетоэлектрических материалов / Е. А. Печерская, А. М. Метальников, А. В. Бобошко // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 6 (131). – С. 21–24.
7. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей / Р. М. Печерская, Е. А. Печерская, А. М. Метальников, В. И. Кондрашин, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 237–241.
8. Печерская, Е. А. Математические модели предметной области при исследовании параметров материалов нанои микроэлектроники / Е. А. Печерская // Университетское образование : сб. ст.

- XV Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 50-летию полета первого космонавта Ю. А. Гагарина / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза, 2011. – С. 436–438.
9. Зинченко, Т. О. Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2018. – С. 258–260.
 10. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 99–107.

References

1. Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 19-y Vseros. molodezhnoy nauch. shkoly-seminara* [Actual problems of physical and functional electronics: materials of the 19th all-Russian youth scientific school-seminar]. Ulyanovsk, 2016, pp. 175–176. [In Russian]
2. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles of the all-Russian interuniversity scientific and practical conference]. Penza, 2018, pp. 256–258. [In Russian]
3. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Materials, Alloys and Experimental Mechanics, ICMAEM 2017"*. India, 2017, p. 012255.
4. Pan'kov V. V. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Bulletin of the Belarusian state University, Ser. 2, Chemistry. Biology. Geography]. 2007, no. 2, pp. 3–13. [In Russian]
5. Vlasov A. I., Markelov V. V., Zot'eva D. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2014, no. 8, pp. 55–66. [In Russian]
6. Pechep'skaya E. A., Metal'nikov A. M., Boboshko A. V. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology]. 2011, no. 6 (131), pp. 21–24. [In Russian]
7. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical Sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
8. Pecherskaya E. A. *Universitetskoe obrazovanie: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-metod. konf., posvyashch. 50-letiyu poleta pervogo kosmonavta Yu. A. Gagarina* [University education: collection of articles XV international scientific-method. conf., vol. 50th anniversary of the flight of the first cosmonaut Yuri Gagarin]. Penza, 2011, pp. 436–438. [In Russian]
9. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy : sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles all-Russian interuniversity scientific and practical conference]. Penza, 2018, pp. 258–260. [In Russian]
10. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2 (28), pp. 99–107. [In Russian]

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)

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

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

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)

Баранов Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: baranov_va2202@mail.ru

Baranov Viktor Alekseevich

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

Вареник Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurik_ru@mail.ru

Varenik Yuriy Alexandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of nano- and microelectronics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александров Владимир Сергеевич

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

Alexandrov Vladimir Sergeevich

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

Образец цитирования:

Моделирование взаимосвязей технологических режимов и свойств оксидного покрытия, синтезированного методом спрей-пиролиза / Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, В. В. Антипенко, В. А. Баранов, Ю. А. Вареник, В. С. Александров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 69–77. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-8.

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

УДК 621.37, 615.47.144

DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-9

*Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин,
С. А. Антипенко, В. С. Александров, О. А. Мельников*

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ БИОИМПЕДАНСА**

*E. A. Pecherskaya, V. V. Antipenko, O. V. Karpanin,
S. A. Antipenko, V. S. Alexandrov, O. A. Mel'nikov*

**METROLOGICAL ASPECTS OF THE AUTOMATED METHOD
FOR MEASURING BIOIMPEDANCE**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* На современном этапе развития персонализированной медицины актуальной является задача создания автоматизированной системы измерения биомпеданса, обладающей гарантированной точностью, высоким быстродействием и возможностью обработки результатов измерений с помощью ЭВМ. Целью представленного исследования является повышение метрологических характеристик разработанной автоматизированной системы. *Материалы и методы.* Представлено схемотехническое решение автоматизированного метода измерения биоимпеданса, позволяющего определить соотношение разных типов тканей в составе тела человека. *Результаты.* Установлено, что погрешности измерения биоимпеданса возникают при регистрации тока, протекающего через систему параллельно-последовательных сопротивлений и емкостей, представляющих собой эквивалент электрической схемы человека. В результате метрологического анализа автоматизированной системы измерения биомпеданса достигнуто снижение основной относительной погрешности измерения до 0,1 %. *Выводы.* Разработана модель в виде эквивалентной электрической схемы, согласно которой тело человека представляет собой паразитный конденсатор на высоких частотах, в котором одежда выступает диэлектриком, одной из обкладок является тело человека, а второй – земля. Проанализированы фазо-частотные характеристики указанной схемы, что позволило улучшить схемотехническую часть источника тока с целью минимизации влияния паразитной емкости объекта.

A b s t r a c t. *Background.* At the present stage of the development of personalized medicine, it is urgent to create an automated system for measuring bioimpedance with guaranteed accuracy, high speed and the ability to process measurement results using a computer. The aim of the presented study is to improve the metrological characteristics of the developed automated system. *Materials and methods.* A schematic solution of an automated method for measuring bioimpedance is presented, which makes it possible to determine the ratio of different types

of tissues in the composition of the human body. **Results.** It has been established that errors in measuring bioimpedance arise when recording the current flowing through a system of parallel-series resistances and capacitors, which are the equivalent of a human electrical circuit. As a result of the metrological analysis of the automated bioimpedance measurement system, the basic relative measurement error has been reduced to 0.1 %. **Conclusions.** A model has been developed in the form of an equivalent electrical circuit, according to which the human body is a parasitic capacitor at high frequencies, in which clothing acts as a dielectric, one of the plates is the human body, and the other is the earth. The phase – frequency characteristics of this circuit are analyzed, which made it possible to improve the circuitry part of the current source in order to minimize the effect of the parasitic capacitance of the object.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биоимпеданс, погрешность измерения, автоматизированная измерительная система, фазо-частотная характеристика.

Key words: bioimpedance, measurement error, automated measuring system, phase – frequency response.

Введение

Биоимпедансные анализаторы обладают свойствами портативности, мобильности и повышенного комфорта для длительного мониторинга [1]. Спектр измерения частоты от 100 до 2500 кГц, анализаторы позволяют различать внесение погрешностей внеклеточной и внутриклеточной жидкостью. Для повышения точности измерения решены следующие задачи: проведен обзор электрических моделей биообъектов, разработано схемотехническое решение измерительных узлов и проанализированы погрешности измерений биоимпеданса.

Анализ погрешностей измерения биоимпеданса

Погрешности измерения биоимпеданса могут возникать при регистрации тока, протекающего через систему параллельно-последовательных сопротивлений и емкостей – эквивалент электрической схемы человека [2, 3], вследствие паразитных утечек тока на общий провод, потому как измерительные электроды подключаются к крайним точкам [4]. Разработанная схема источника тока, минимизирующая данные погрешности, представлена на рис. 1.

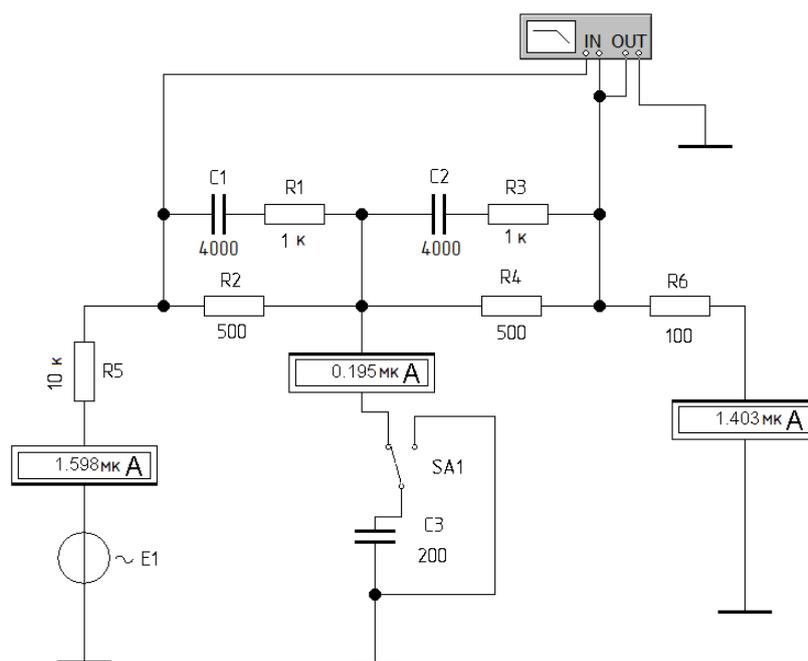
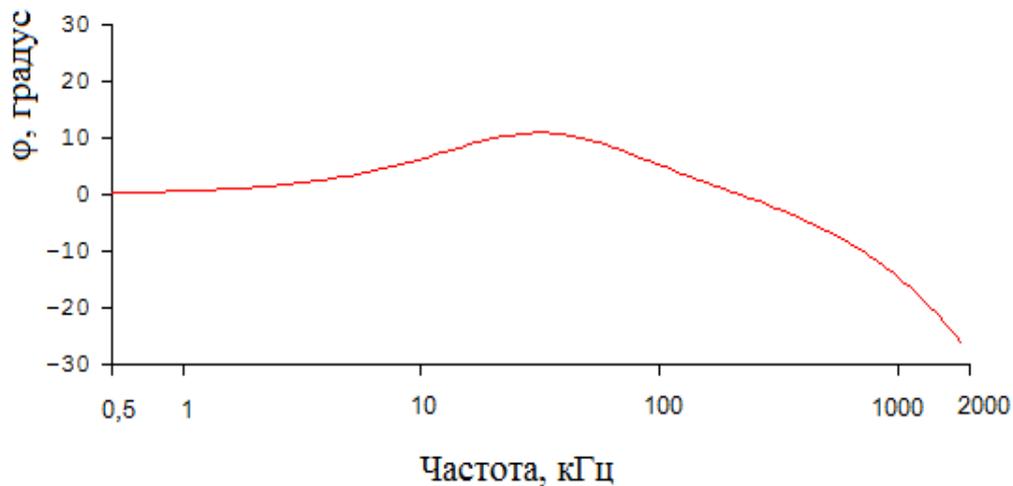


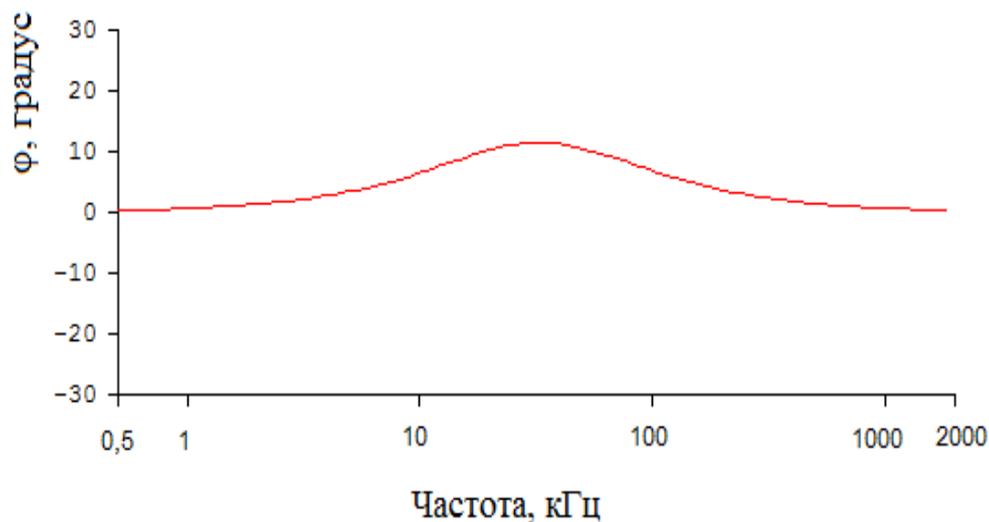
Рис. 1. Схема, моделирующая утечку тока на землю

Цепь состоит из $R1$ – сопротивление межклеточной жидкости, $C1$ – емкость, образованная диэлектрической мембраной клеток, и $R3$ – сопротивление внутриклеточной жидкости. Тело человека представляет собой паразитный конденсатор на высоких частотах, в котором одежда выступает диэлектриком, одной из обкладок является тело человека, а второй – земля. В качестве такого паразитного конденсатора выступает $C3 = 200$ пФ (см. рис. 1), его реактивное сопротивление равно 398 Ом, при напряжении 10 В и частоте 2 МГц. Согласно первому правилу Кирхгофа определено, что паразитный ток составляет $12,2\%$.

На рис. 2 представлены фазо-частотные характеристики (ФЧХ) рассмотренной схемы. Анализ ФЧХ показал, что при увеличении частоты свыше 150 кГц проявляется эффект утечки тока на землю через конденсатор $C3$, что оказывает влияние на погрешность измерения биоимпеданса.



а)



б)

Рис. 2. Фазо-частотные характеристики:
а – при отключенном конденсаторе $C3$; б – при включенном конденсаторе $C3$

На рис. 3 изображена схема, которая состоит из сумматора, необходимого для суммирования токов, и делителя напряжения, с помощью которого производится регулировка пропорции токов. В зависимости от положения движка коэффициент передачи различный, так в верхнем положении $K = 1$, а в нижнем – $K = 0$. При моделировании схемы наиболее подходящая пропорция составила 60% – входящий ток и 40% – выходящий.

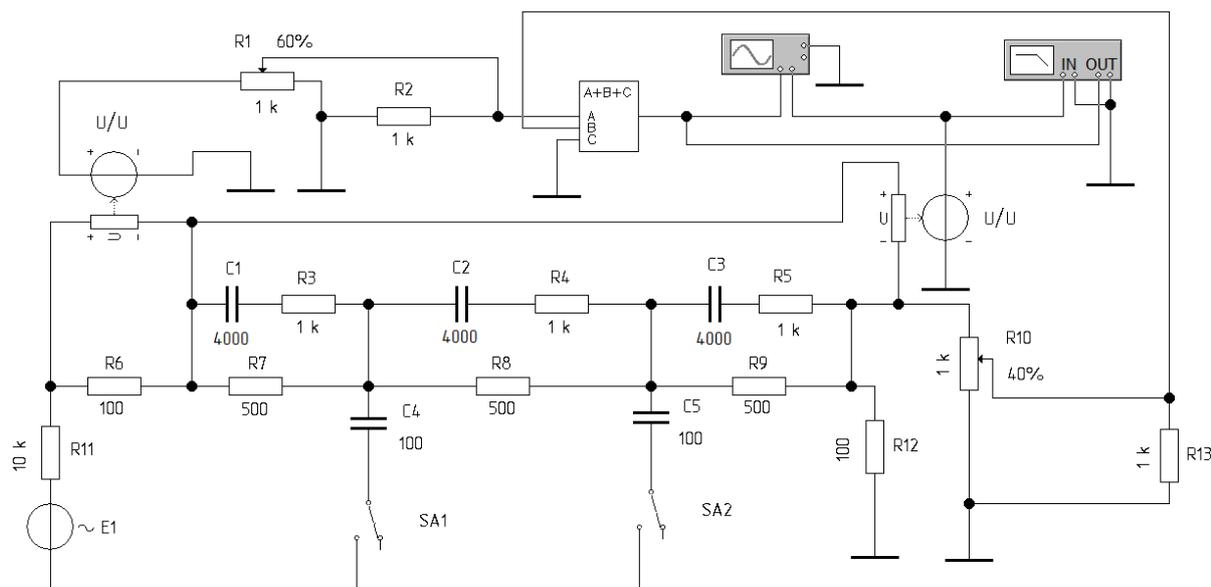
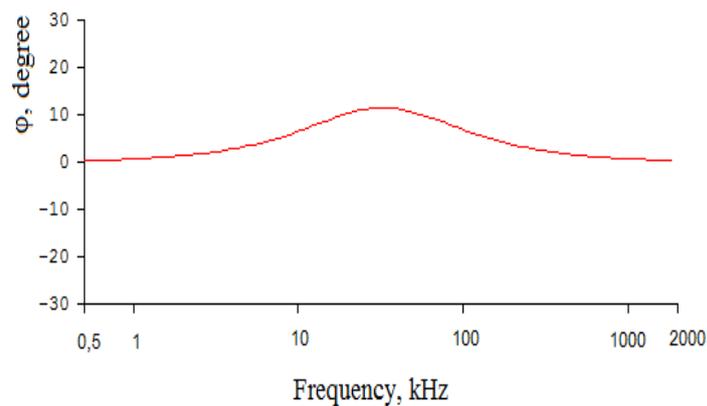
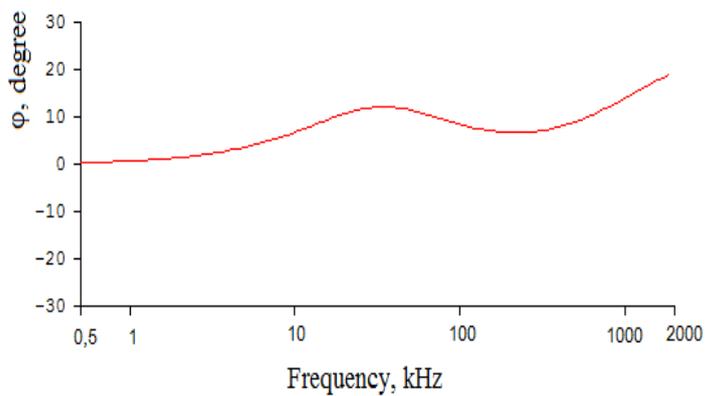


Рис. 3. Схема измерения суммы втекающего (60 %) и вытекающего (40 %) тока с усложненной эквивалентной схемой тела человека

Добавим в схему, представленную на рис. 3, кодоуправляемые источники напряжения. Они необходимы для косвенного измерения токов через падение напряжения на резисторах [5]. На рис. 4 представлены фазо-частотные характеристики рассмотренной схемы.



а)



б)

Рис. 4. Фазо-частотные характеристики при кодоуправляемых источниках напряжения: а – при отключенном конденсаторе C_3 ; б – при включенном конденсаторе C_3

Из полученных фазо-частотных характеристик следует, что влияние конденсатора $C3$ начинается также с частоты около 150 кГц. На рис. 5 представлена усложненная эквивалентная схема тела человека, в которой с помощью сумматора складываются сигналы входного и выходного токов. На рис. 6 представлены фазо-частотные характеристики рассмотренной схемы. Данный способ устранения помехи не универсален, но в данном случае его применение целесообразно.

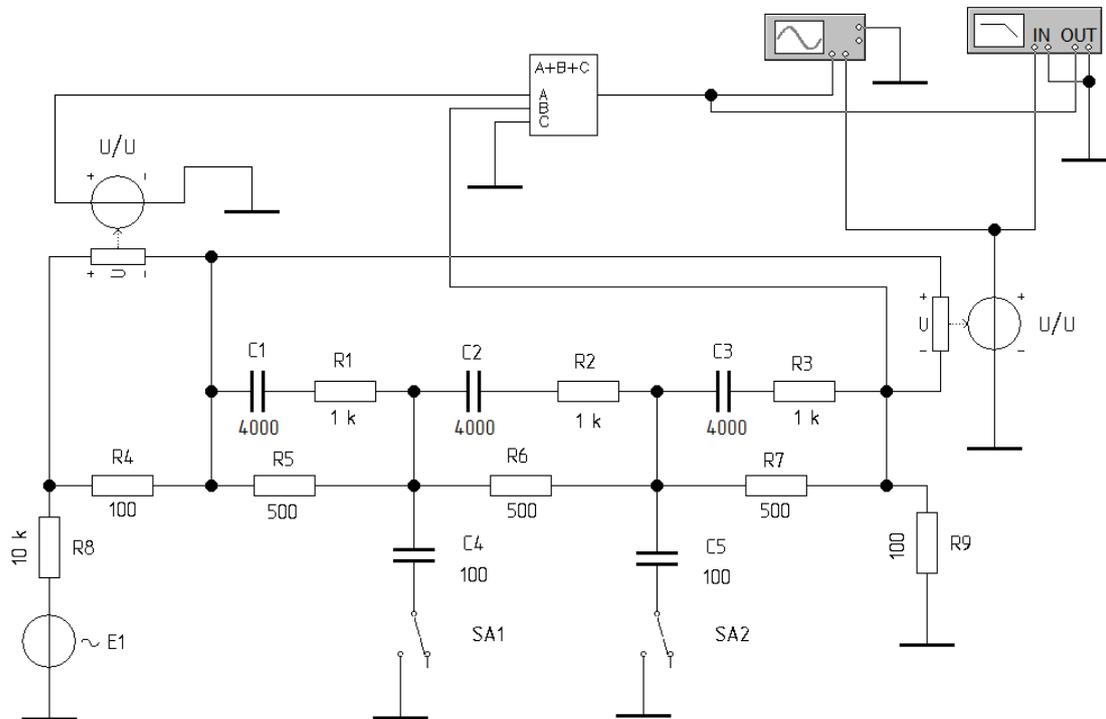


Рис. 5. Схема измерения суммы втекающего и вытекающего тока с усложненной эквивалентной схемой тела человека

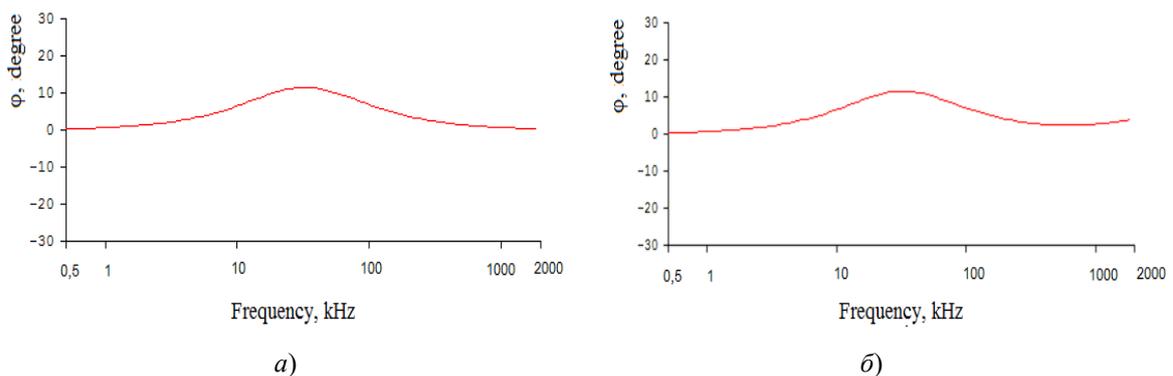


Рис. 6. Фазо-частотные характеристики:
а – при отключенном конденсаторе $C3$; б – при включенном конденсаторе $C3$

Заключение

В данной работе промоделирована схема, учитывающая ток утечки на землю. Представлен объект измерения в виде электрической модели и проведено моделирование процесса, что позволило улучшить схемотехническую часть источника тока с целью увеличения точности измерения и максимально устранить влияние паразитной емкости объекта. Следовательно, меняя пропорции токов электрической модели схемы на RC -элементах, можно снизить влияние паразитной помехи.

Библиографический список

1. *Леонов, С. Д.* Измеритель биоимпеданса с определением активной и реактивной составляющих / С. Д. Леонов, С. А. Образцов, Ю. В. Троицкий // *Медицинская техника*. – 2011. – № 4 (268). – С. 15–18.
2. *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. – Пенза, 2020. – С. 221–224.
3. *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.
4. *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. – Пенза, 2019. – С. 178–179.
5. Automated system for bioimpedance measuring / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, O. V. Karpanin, K. Y. Kraynova, D. V. Artamonov, Y. V. Shepeleva // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2018, Novosibirsk)* : proceedings. – Novosibirsk, 2018. – P. 641–644.
6. 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, 2020. – С. 52075.

References

1. Leonov S. D., Obraztsov S. A., Troitskiy Yu. V. *Meditinskaya tekhnika* [Medical equipment]. 2011, no. 4 (268), pp. 15–18. [In Russian]
2. 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 interuniversity scientific and practical conference]. Penza, 2020, pp. 221–224. [In Russian]
3. 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]
4. 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 of the VI all-Russian interuniversity scientific and practical conference.]. Penza, 2019, pp. 178–179. [In Russian]
5. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Kraynova K. Y., Artamonov D. V., Shepeleva Y. V. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2018, Novosibirsk): proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 641–644.
6. 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, 2020, p. 52075.

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

Карпанин Олег Валентинович
старший преподаватель,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

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

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

Мельников Олег Андреевич
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

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

Karpanin Oleg Valentinovich
senior lecturer,
sub-department of nano-and microelectronics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Antipenko Svetlana Anatolevna
engineer,
PIC «Electropribor»
(69 Pobedy Avenue, Penza, Russia)

Alexandrov Vladimir Sergeevich
student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Образец цитирования:

Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин С. А. Антипенко, В. С. Александров, О. А. Мельников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 78–84. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-9.