

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Торгашин С. И., Папко А. А., Полякова Е. А.

ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ
СЕЙСМОДАТЧИКОВ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ
ЗАЩИТЫ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

6

Чебурахин И. Н.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАКЕТНОЙ ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

14

Даев Ж. А.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РАСХОДА
И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПЕРЕМЕННОГО
ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ: ОБЗОР И АНАЛИЗ
ДОСТИЖЕНИЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

19

Архангельская Е. А., Заморенова Э. А.

АНАЛИЗ ПРОТИВОРЕЧИЙ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫХ
И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭТАЛОННОЙ БАЗЕ
ДЛЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ
ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ДИАПАЗОНЕ СВЕРХВЫСОКИХ
ЧАСТОТ

25

Волчихин В. И., Иванова Н. А., Серикова Ю. И., Банных А. Г.

СИНТЕЗ И ТЕСТИРОВАНИЕ ОРАКУЛА, СПОСОБНОГО
ПРЕДСКАЗЫВАТЬ АСИММЕТРИЧНЫЕ ГРАНИЦЫ
ИНТЕРВАЛА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ МАЛЫХ ВЫБОРОК
БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

32

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Волков В. С., Рыблова Е. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ
ЗАВИСИМОСТЬ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

40

Андреев П. Г., Гришко А. К., Кочегаров И. И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЙ

48

Тимаков С. В., Хошев А. В., Макушкин Д. Е., Храмов А. С.

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК
«ХРОМ-НИКЕЛЬ», СИНТЕЗИРОВАННЫХ РАСПЫЛЕНИЕМ
ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

55

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Поленов Д. Ю.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОРТОВЫХ
РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

60

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Балахонова С. А.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
СИСТЕМЫ КАРДИОДИАГНОСТИКИ

70

Бердибаева Г. К., Бодин О. Н., Громков Н. В.,

Козлов В. В., Ожикенов К. А., Пижонков Я. А.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД

77

Бодин О. Н., Полосин В. Г., Убиенных А. Г.,

Рахматуллов Ф. К., Сергеенков А. С., Крамм М. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ СЕРДЦА

85

Свистунов Б. А.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ
ИЗБЫТОЧНОСТИ

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Torgashin S. I., Papko A. A., Polyakova E. A.

QUALITY AND RELIABILITY EVALUATION
OF SEISMIC SENSORS FOR EMERGENCY PROTECTION
SYSTEMS OF REACTOR FACILITIES

6

Cheburakhin I. N.

EQUIPMENT FOR PACKET PULSE CURRENT PROCESSING
OF THIN FILM TENSORESISTORS

14

Daev Z. A.

MEASUREMENT SYSTEMS OF THE FLOW RATE
AND QUANTITY OF FLUID OF VARIABLE DIFFERENTIAL
PRESSURE: THE REVIEW AND ANALYSIS
OF ACHIEVEMENTS IN THE LAST DECADES

19

Arkhangelskaya E. A., Zamorenova E. L.

ANALYSIS OF CONTRADICTIONS OF LEGISLATIVE
AND NORMATIVE REQUIREMENTS TO THE REFERENCE BASE
FOR VERIFICATION OF MEASUREMENT MEANS OF DENSITY
ENERGY FLOW IN THE RANGE OF HIGH FREQUENCIES

25

Volchikhin V. I., Ivanova N. A., Serikova Yu. I., Bannykh A. G.

SYNTHESIS AND TESTING OF AN ORACLE CAPABLE
OF PREDICTING ASYMMETRIC BOUNDARIES
OF THE ACTUAL POSITION OF THE MATHEMATICAL
EXPECTATION OF SMALL SAMPLES OF BIOMETRIC DATA

32

MEASUREMENT OF ELECTRICAL AND MAGNETIC QUANTITIES

Volkov V. S., Ryblova E. A.

THE STUDY OF DOPANT CONCENTRATION INFLUENCE
ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF GAGE FACTOR
FOR SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGES

40

Andreev P. G., Grishko A. K., Kochegarov I. I.

DETERMINATION OF THE ELECTRIC TENSION
COMPOSITION OF ELECTROMAGNETIC FIELD
WITH ACCOUNT OF REFLECTIONS

48

Timakov C. V., Khoshev A. V., Makushkin D. E., Khramov A. S.

ANALYSIS OF THE PROPERTIES THIN-FILMS
OF CHROME-NICKEL SYNTHESIZED
BY SPRAYING FROM AN INDEPENDENT SOURCE

55

RADIO MEASUREMENT

Polenov D. Yu.

COMPARATIVE EVALUATION OF ADVANCED METHODS
OF EFFICIENCY BOARD TELEMETRIC SYSTEMS

60

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENT

Balakhonova S. A.

IMPLEMENTATION FEATURES OF DISTRIBUTED
CARDIO DIAGNOSIS SYSTEM

70

Berdibaeva G. K., Bodin O. N., Gromkov N. V.,

Kozlov V. V., Ozhikenov K. A., Pizhonkov Ya. A.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR
VOICE RECOGNITION

77

Bodin O. N., Polosin V. G., Ubiennykh A. G.,

Rakhmatullov F. K., Sergeenkov A. S., Kramm M. N.

MODELING AND VISUALIZATION
OF THE ELECTRICAL ACTIVITY OF THE HEART

85

Svistunov B. L.

MEASURING TRANSDUCERS FOR PARAMETRIC SENSORS
USING ANALYTICAL REDUNDANCY

94

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 658.562.64

С. И. Торгашин, А. А. Папко, Е. А. Полякова

ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ СЕЙСМОДАТЧИКОВ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

S. I. Torgashin, A. A. Papko, E. A. Polyakova

QUALITY AND RELIABILITY EVALUATION OF SEISMIC SENSORS FOR EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS OF REACTOR FACILITIES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. С целью защиты атомных электростанций (АЭС) от воздействия сейсмических колебаний внешней поверхности Земли согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии на АЭС должна применяться аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок. В настоящее время актуальным решением повышения безопасности при эксплуатации АЭС является применение сейсмотатчиков типа СД 4 разработки и производства АО «НИИФИ» с повышенными техническими требованиями к качеству и надежности. С целью оценки соответствия безотказности сейсмотатчика заданным требованиям технического задания целесообразно проведение расчета надежности, который позволит получить оценку соответствия показателей надежности до получения экспериментальных данных. **Материалы и методы.** Сейсмотатчик является сложной многоканальной системой, не имеющей отечественных и зарубежных аналогов по показателям безотказности. С целью непрерывного мониторинга проекций вектора сейсмоускорения в системе формируются отдельные аналоговые сигналы и информация о модуле измеренного вектора сейсмоускорения. Расчетный метод подтверждения безотказности учитывает различия структуры системы по каждой из выполняемых функций и реализует функцию автоматического контроля исправности, периодичность которого позволит прогнозировать безопасность интервалами времени, необходимыми для достижения установленных показателей, в чем и заключается его оригинальность. **Результаты.** Для выполнения расчета проведены качественный анализ надежности датчика, в результате которого определены состав и структура датчика, границы датчика, описаны критерии отказа и неисправности датчика и количественный анализ надежности. В результате анализа признана необходимость реализации в сейсмотатчике функции «контроль исправности», обеспечивающей периодическое автоматическое определение исправности измерительных трактов на протяжении всего жизненного цикла датчика. В результате расчета надежности путем прогнозирования интенсивностей отказов электрорадиоизделий, примененных в датчике, определены количественные значения

показателей его безотказности. **Выводы.** Достигнутые расчетным путем показатели надежности сейсмодатчика соответствуют требованиям нормативной документации и обеспечивают надежную работу датчика с выполнением его функций. Проведенный расчет значительно сокращает время на получение результатов оценки показателей безотказности на данном этапе разработки и позволяет спрогнозировать надежность без проведения эксперимента.

A b s t r a c t. Background. For the purpose of nuclear power plants (NPP) protection from ground surface borne vibrations, according to International Atomic Energy Agency (IAEA) recommendations, NPP must be equipped with anti-seismic protection instrumentation for reactor facilities. Nowadays the up-to-date solution for NPP safety enhancement is the usage of seismic sensors SD 4 of "NIIFI" JSC development and production with increased quality performance specifications of quality of reliability. To provide evaluation of conformity seismic sensor's reliability to specified technical requirements it is appropriate to perform reliability calculation that provides evaluation of reliability numbers conformity prior to experimental and measurement data. **Materials and methods.** The seismic sensor is a complex multichannel system; in terms of reliability it has no home-produced or international alternative sensors. To provide continuous monitoring of seismic load vector projection, separate analog signals and data on the module of measured seismic load vector are generated within the system. Computational method of reliability confirmation accounts for differences in system structure under each performed function and in intervals performs built-in check that provides safety forecasting by time intervals needed for reaching the specified values, wherein lies the method's originality. **Results.** For the purpose of computation qualitative analysis of sensor reliability has been carried out; as a result of which, sensor components, structure and limits have been defined, sensor failure and fault criteria have been described, as well as numerical reliability analysis. As follows from the analysis it is necessary to implement in the seismic sensor such function as «built-in check» which provides repetitive automatic detection of measuring routes state-of-health throughout the sensor operating life cycle. As a result of reliability calculation using failure rate forecasting for sensor electronic components, quantitative values of sensor reliability index have been defined. **Conclusions.** Calculated reliability index of the seismic sensor complies with the requirements of the reference documentation and guarantees the sensor reliable operation with full functions performing. The carried out calculation considerably cuts the time needed to obtain the results of reliability index evaluation at this development phase and allows to forecast reliability without experiment performance.

К л ю ч е в ы е с л о в а: аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок, сейсмодатчик, качественный анализ надежности, расчет надежности.

Key words: anti-seismic protection systems for reactor facilities, seismic sensor, reliability qualitative analysis, reliability calculation.

Глобальной задачей проектирования и эксплуатации атомных электростанций (АЭС) является обеспечение гарантий сохранения их ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации.

Одну из наиболее значимых угроз для безопасности АЭС представляют землетрясения и сейсмические колебания внешней поверхности Земли. Для обеспечения защиты АЭС от их воздействия согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии на всех АЭС мира должна применяться аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок [1], к качеству и надежности которой предъявляются повышенные технические требования.

В настоящее время актуальным решением повышения безопасности при эксплуатации АЭС является применение сейсмодатчиков типа СД 4 разработки и производства АО «НИИФИ», которые устанавливаются на фундаменты помещений в зоне реакторных установок. СД 4 по сути является сложной многоканальной системой и не имеет отечественных и зару-

бежных аналогов по таким показателям безотказности, как средняя наработка до отказа – не менее 250 000 ч, вероятность невыполнения функции аварийной защиты на требование при действии аварийного значения сейсмоускорения (ситуация «пропуск события») – не более $1 \cdot 10^{-6}$, вероятность ложного срабатывания по функции аварийной защиты – не более $1 \cdot 10^{-6}$ и параметр потока отказов при выполнении функции контроля и регистрации – не более $2 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Единственным реализуемым способом подтверждения перечисленных показателей безотказности на стадиях разработки и производства является предложенный авторами расчетный метод, оригинальность которого состоит в учете различий структуры системы по каждой из выполняемых функций и реализации функции автоматического контроля исправности, периодичность которого позволит прогнозировать безопасность интервалами времени, необходимыми для достижения установленных показателей.

СД 4 предназначен для непрерывной регистрации сейсмических воздействий на реакторную установку атомной электростанции. В нем формируются дискретные предупредительные и аварийные сигналы превышения установленных уровней сейсмического воздействия, которые передаются в аппаратуру отображения и протоколирования, и дискретный сигнал о состоянии исправности датчика, передаваемый в аппаратуру сигнализации первопричины. Кроме этого, сейсмодатчик с целью непрерывного мониторинга проекций вектора сейсмоускорения на ортогональные оси X , Y , Z , связанные с установочной плоскостью датчика, формирует отдельные аналоговые сигналы и информацию о модуле измеренного вектора сейсмоускорения.

Для выполнения расчета проведем качественный и количественный анализ надежности СД 4. Качественный анализ надежности включает в себя определение состава и структуры датчика, границ датчика, а также описание его критериев отказа и неисправности.

Согласно [2] СД 4 содержит три акселерометра (сейсмоприемника), установленных на специальной платформе по трем ортогональным осям X , Y , Z , которые предназначены для измерения проекций вектора сейсмоускорения, а также три измерительных канала. Измерительные каналы предусматривают, в зависимости от конкретного требования к порогам срабатывания, возможность ослабления или усиления выходных сигналов акселерометров и последующего их возведения в квадрат. Нагрузкой измерительных каналов является суммирующий усилитель, выходной сигнал которого подается на извлекатель корня и далее на компараторы, настроенные на заданные пороги срабатывания. Компараторы управляют работой одновибраторов, которые формируют одиночные импульсы заданной амплитуды и длительности. Через элементы гальванической развязки импульсы передаются в регистратор и в систему защиты. В датчике предусмотрены возможность автоматического контроля исправности с периодичностью (11 ± 2) мин на протяжении всего жизненного цикла и возможность калибровки от внешнего источника.

Границами датчика являются: вектор поля сейсмоускорения (по входу для функций формирования сигнала запуска регистратора и аварийного сигнала), разъем CALIBRATION (по функции калибровки) и по выходу – разъем, соединяющий СД 4 с аппаратурой отображения протоколирования и регистрации.

Рассмотрим возможные критерии отказа и неисправности датчика. Критериями отказа датчика по функциям предупредительной аварийной защиты являются, во-первых, функциональный отказ – отсутствие выходных сигналов аварийной защиты и сигналов запуска регистратора при наличии аварийной и предаварийной ситуаций и, во-вторых, ложное срабатывание – наличие выходных сигналов аварийной защиты и начала запуска регистратора при отсутствии аварийной и предаварийной ситуаций и отсутствие выходных сигналов датчика или их несоответствие заданным требованиям при проведении контроля исправности [3]. По способу обнаружения отказы делят на явные отказы, обнаруживаемые в момент их возникновения с помощью имеющихся технических средств (например, выполнение функции «контроль исправности») и скрытые отказы, обнаруживаемые при проведении калибровки при остановленной реакторной установке. При анализе характера и последствий отказов необходимо учитывать отказы, зависящие от условий работы и места расположения датчика, возникновения внутренних и внешних нештатных ситуаций и ошибок, допущенных в техническом задании, конструкторской документации, при изготовлении, а также от ошибок эксплуатирующего персонала.

С целью исключения возникновения перечисленных отказов необходимо размещать кабельные трассы по независимым помещениям или кабельным стеллажам, осуществлять питание датчика от надежной сети напряжения 220 В и учитывать возможность отключения одного из каналов при работающей реакторной установке для проведения калибровки.

При проведении количественной оценки показателей безотказности датчика необходимо получить оценку средней наработки до отказа T_0 , функциональной надежности (вероятности невыполнения функции защиты на требование – ситуация «пропуск события» $P_{\text{проп.АЗ}}$, вероятности ложного срабатывания $P_{\text{лож.АЗ}}$ и параметра потока отказов при выполнении функции контроля и регистрации ($\lambda_{\text{проп.ПЗ}}$ и $\lambda_{\text{лож.ПЗ}}$) и оценку вероятности невыполнения функции аварийной защиты на требование комплекта трех датчиков, соединенных по логике «2 из 3» $P_{\text{АЗ}}$.

Расчетная оценка показателей безотказности основана на вычислении этих показателей по справочным данным о безотказности электрорадиоизделий. Исходные данные для расчетов определены по [4]. Оценка показателей надежности датчика проводилась методом прогнозирования по надежности-функциональным схемам (НФС), составленным на основании анализа особенностей функционирования устройства в различных режимах его работы.

Для получения консервативной оценки, достаточной и необходимой для обеспечения заданных показателей надежности, возможны следующие допущения:

- для отдельных элементов принят экспоненциальный закон распределения наработки до отказа;
- интенсивности отказов отдельных элементов постоянны, не зависят от времени $\lambda(t) = \lambda$, а элементы прошли период приработки и не достигли периода старения;
- параметр потока отказов является стационарным одинарным потоком;
- интенсивность отказов и параметр потока отказов различаются;
- отказы отдельных элементов являются независимыми событиями.

Ниже представлены примеры расчета показателей надежности. Расчеты проведены в соответствии с требованиями [5].

Расчет средней наработки до отказа

При определении средней наработки до отказа принято условие, что на этот показатель влияют все элементы и узлы сейсмодатчика. Кроме этого, учтены результаты предварительного анализа, которые привели к необходимости реализации в сейсмодатчике функции «контроль исправности», с помощью которой периодически автоматически определяется исправность измерительных трактов на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Средняя наработка до отказа (в ч) определяется по формуле

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -типа изделий (электро-радиоизделий и узлов), 1/ч; N_i – количество элементов i -типа в изделии; m – количество типов, используемых в датчике изделий.

Интенсивность отказов λ_i определяется как

$$\lambda_i = \lambda_{\delta} K_p K_{\text{э}} K_{\text{пр}} K_y \prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}, \quad (2)$$

или

$$\lambda_i = \lambda_{\text{бсг}} K_p K_{\text{э}} K_{\text{пр}} K_y \prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}, \quad (3)$$

где λ_{δ} – интенсивность отказов данного типа изделий, 1/ч; $\lambda_{\text{бсг}}$ – интенсивность отказов данной группы (подгруппы) изделий, 1/ч; K_p – коэффициент режима; $K_{\text{э}}$ – эксплуатационный коэффициент; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент вида приемки; K_y – коэффициент роста надежности; $\prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}$ –

произведение коэффициентов, учитывающих влияние на интенсивность отказов конструктивно-технологических факторов третьей группы; n – число учитываемых конструктивно-технологических факторов.

Суммарная интенсивность отказов составила $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{\Sigma i} = 3,390159386 \text{ 1/ч.}$

С учетом этого наработка до отказа датчика равна

$$T_o = \frac{1}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i} = \frac{1}{3,390159386 \cdot 10^{-6}} = 294971,38 \text{ ч.}$$

Поскольку при выполнении функции контроля в режиме функционирования находятся все элементы датчика, параметр потока отказов $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i$ при выполнении функции можно считать равным $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 3,390159386 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$

Расчет вероятности невыполнения функции защиты на требование (ситуация «пропуск события»)

Расчет вероятности невыполнения функции защиты на требование проводится по функции формирования сигналов предупредительной аварийной защиты (АЗ) с использованием структурной схемы датчика, приведенной на рис. 1. Схемы на рис. 2 и последующих рисунков содержат только те элементы и узлы датчика, отказ которых может привести к отказу по рассматриваемой функции и ситуации.

Интенсивность отказов датчика $\lambda_{\text{проп.АЗ}}$ определяется по формуле (2) и в соответствии с данными справочника составляет $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 2,46429783 \text{ 1/ч.}$ Вероятность пропуска события $P_{\text{проп.АЗ}}$ определяется по формуле

$$P_{\text{проп.АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{проп.АЗ}} t}, \quad (4)$$

где t – максимальное значение межконтрольного интервала времени, равное 13 мин $\approx 0,22 \text{ ч.}$

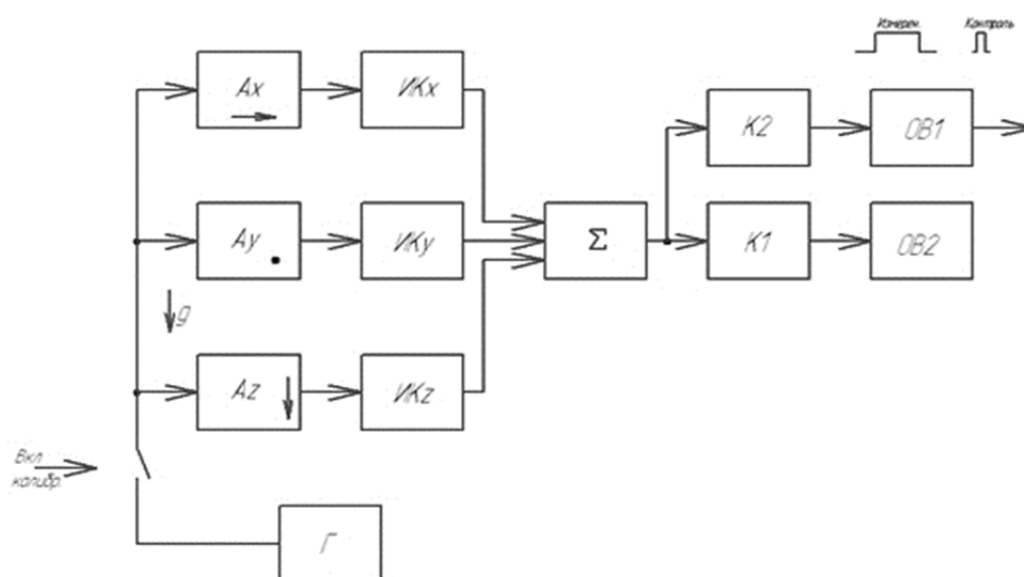


Рис. 1. Структурная схема сейсмодатчика СД 4: X, Y, Z – обозначение измерительных осей акселерометра; g – модуль и направление гравитационного ускорения

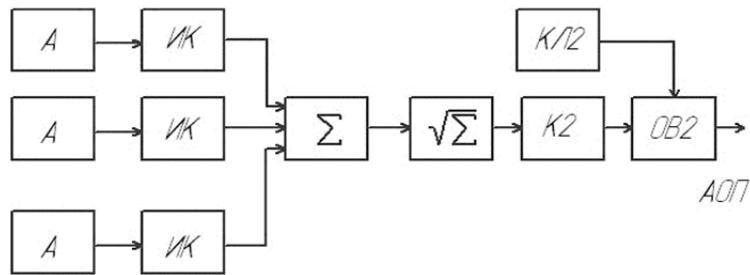


Рис. 2. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала для запуска регистратора в ситуации «пропуск сигнала» и для оценки отказов по функции регистрации:
 А – акселерометры, ИК – измерительные каналы, Σ – суммирующий усилитель и извлекатель корня квадратного формирователя аналоговых сигналов, К2 – компаратор, ОВ2 – одновибратор, КЛ2 – аналоговый ключ для управления режимом работы ОВ2

С учетом данных по интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{проп.АЗ}}$ вероятность пропуска события составит

$$P_{\text{проп.АЗ}} = 1 - e^{-2.46429783 \cdot 10^{-6} \cdot 0.22} = 1 - 0.999999457 = 5,4 \cdot 10^{-7}.$$

Расчет вероятности ложного срабатывания

Расчет вероятности ложного срабатывания проводится с использованием структурной схемы датчика, приведенной на рис. 2. Интенсивность отказов датчика $\lambda_{\text{лож.АЗ}}$ определена по формуле (2) и составила $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 3,07952979$ 1/ч.

Вероятность ложного срабатывания $P_{\text{лож.АЗ}}$ определяется как

$$P_{\text{лож.АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{лож.АЗ}} t}. \quad (5)$$

С учетом данных интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{лож.АЗ}}$ вероятность события ложного срабатывания равна $6,8 \cdot 10^{-7}$.

Расчет параметра потока отказов по функции регистрации

Параметр потока отказов по функции регистрации $\lambda_{\text{проп.ПЗ}}$ и $\lambda_{\text{лож.ПЗ}}$ определяется с использованием структурных схем (рис. 3, 4) для ситуации «пропуск события» и «ложное срабатывание» соответственно. Интенсивности отказов определены по формуле (2) и составили с учетом данных

об интенсивности отказов для ситуации «пропуск события»: $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 2,93824029 \cdot 10^{-6}$ 1/ч,

для ситуации «ложное срабатывание»: $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 2,97291549 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Тогда параметр потока отказов составляет: $\lambda_{\text{проп.ПЗ}} = 2,28599519 \cdot 10^{-6}$ 1/ч,
 $\lambda_{\text{лож.ПЗ}} = 2,93824029 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

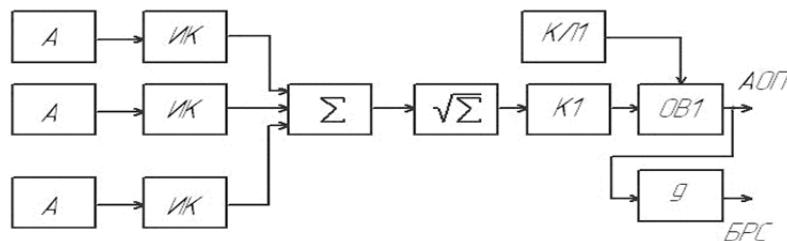


Рис. 3. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала аварийной защиты в ситуации «пропуск сигнала»: К1 – компаратор, ОВ1 – одновибратор, КЛ1 – аналоговый ключ для управления режимом работы одновибратора ОВ1, г – инвертор формирователя дискретных сигналов по каналу П1

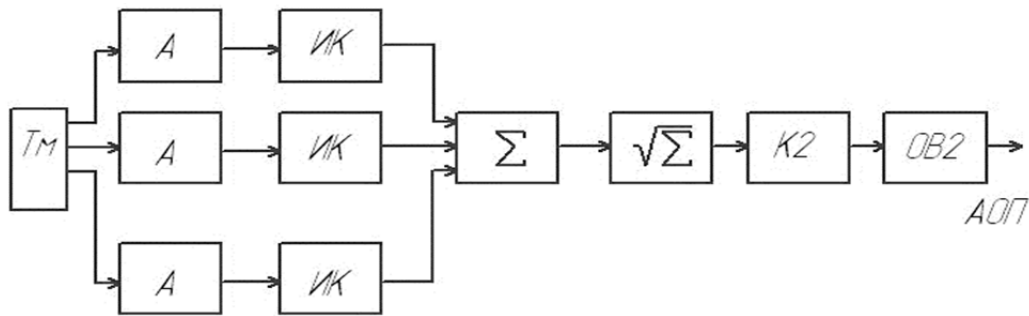


Рис. 4. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала для запуска регистратора в ситуации «ложное срабатывание»: К2 – компаратор, Тм – таймер

Расчет надежности комплекта датчиков, соединенных по схеме «2 из 3»

Комплект трех датчиков СД 4, соединенных по схеме «2 из 3», образует резервируемую восстанавливаемую систему. Расчет эквивалентной интенсивности отказов такой системы $\lambda_{\text{эКВ}}$ (резерв нагруженный, восстановление неограниченное), состоящей из N одинаковых элементов, проводится по формуле

$$\lambda_{\text{эКВ}} = k \cdot \lambda \cdot c_N^K \cdot \gamma^n, \quad (6)$$

где $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$, а $\gamma = \lambda \tau_{\text{восст}}$; λ – максимальное значение интенсивности отказов одного датчика; k – число рабочих элементов; n – число резервных элементов; N – общее число элементов ($N = k + n$); γ – интенсивность восстановления; $\tau_{\text{восст}}$ – время восстановления (с учетом времени обнаружения неисправности).

Для рассматриваемого варианта максимальное значение интенсивности отказов соответствует ситуации «ложное срабатывание». При этом $\lambda_{\text{ложАЗ}} \leq 3,1 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Остальные параметры равны: $k = 2$; $n = 1$; $N = 3$; $\tau_{\text{восст}} = 1$ ч. Тогда

$$\lambda_{\text{эКВ}} = 2\lambda C_3^2 (\lambda \cdot 1)^1 \cdot 1 = 2\lambda \frac{3!}{2!(3-2)!} \cdot 1 = 2\lambda^2 \cdot 3 \cdot 1 = 6\lambda^2. \quad (7)$$

Интенсивность отказов комплекта датчиков СД 4, соединенных по схеме «2 из 3», равна: $\lambda_{\text{эКВ}} = 6 \cdot \lambda_{\text{ложАЗ}}^2 = 6 \cdot (3,07952979 \cdot 10^{-6})^2 = 5,6901022 \cdot 10^{-11}$ 1/ч. Вероятность функции защиты на требование $P_{\text{АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{эКВ}} \tau_{\text{восст}}}$, что при полученных значениях $\lambda_{\text{эКВ}}$ и $\tau_{\text{восст}}$ с точностью до 7 знаков равно нулю. Указанное значение $P_{\text{АЗ}}$ свидетельствует о выполнении требований ТЗ (не более $5 \cdot 10^{-7}$).

Заключение

Предложенный метод оценки безотказности, основанный на учете взаимосвязи выполняемых функций системы аварийной защиты с узлами структурной схемы для их реализации и с периодичностью автоматического контроля исправности сейсмодатчиков на протяжении всего жизненного цикла, позволил подтвердить требования нормативной документации по безопасности объектов атомной энергетики по средней наработке до отказа не менее 250 000 ч, вероятностям пропуска события и ложного срабатывания, а также по параметру потока отказов. С помощью расчета надежности получена оценка безотказности до получения экспериментальных результатов, что значительно ускорило процесс подтверждения требований безотказности на данных этапах. В настоящее время указанные показатели безотказности подтверждены результатами эксплуатации систем аварийной антисейсмической защиты реакторных установок всех АЭС РФ (за исключением Смоленской), АЭС Ирана, Болгарии, Индии.

Библиографический список

1. Торгашин, С. И. Высокочувствительный МЭМС-датчик сейсмоскорости для систем аварийной защиты и диагностики / С. И. Торгашин, А. А. Папко // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 7–9.
2. Системы сейсмомониторинга и антисейсмической аварийной защиты реакторной установки АЭС удаленного конфигурирования / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, А. А. Папко, М. А. Калинин, А. В. Николаев // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 34–38
3. Трофимов, А. А. Методы технической диагностики : учеб. пособие / А. Н. Трофимов, Б. В. Цыпин, А. А. Трофимов. – Пенза : Инф.-изд. цент ПензГУ, 2006. – 121 с.
4. Надежность изделий электронной техники, электротехники и квантовой электроники. Справочник. – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
5. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87 (в части п.2); вступил в действие с 01.01.1997. – М. : Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 10 с.

Торгашин Сергей Иванович

кандидат технических наук,
директор по производству,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences,
director of prodaction,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Папко Антонина Алексеевна

доктор технических наук,
заместитель начальника конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Papko Antonina Alekseevna

doctor of technical sciences,
deputy Head of design department,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Полякова Екатерина Алексеевна

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

Polyakova Ekaterina Alekseevna

postgraduate student,
chief Specialist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 658.562.64

Торгашин, С. И.

Об оценке качества и надежности сейсмодатчиков систем аварийной защиты реакторных установок / С. И. Торгашин, А. А. Папко, Е. А. Полякова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 6–13.

УДК 537.39

И. Н. Чебурахин

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАКЕТНОЙ ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

I. N. Cheburakhin

EQUIPMENT FOR PACKET PULSE CURRENT PROCESSING OF THIN FILM TENSORESISTORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Импульсная обработка повышенными электрическими нагрузками позволяет проводить структурирование (стабилизацию) резистивного слоя, осуществлять юстировку (подгонку) величины сопротивлений резисторов до требуемого номинального значения. Разработка специализированного оборудования, позволяющего проводить пакетную импульсно-токовую обработку тонкопленочных тензорезисторов (ТР), является актуальной задачей. **Материалы и методы.** Оборудование разработано на основе следующих принципов: обработка тонкопленочных ТР пакетом электрических импульсов; выбор параметров стабилизирующих электрических импульсов так, чтобы нагрев тонкопленочных ТР за время импульса не достигал температуры интенсивного окисления; выбор параметров электрических импульсов подгонки так, чтобы нагрев тонкопленочных ТР за время импульса не достигал температуры диффузии резистивного и диэлектрического изолирующего тонкопленочных слоев; необходимость завершения всех происходящих в ТР процессов за время паузы между импульсами; контроль параметров ТР в паузах между пакетами импульсов; проведение обработки на воздухе при нормальных климатических условиях. **Результаты.** Описана структурная схема и работа устройства. Рассмотрена последовательность операций при стабилизации и подгонке сопротивления тензорезисторов. **Выводы.** Использование разработанной системы упрощает настройку датчиков и повышает их температурную стабильность.

A b s t r a c t. Background. Pulse processing advanced electrical loads allows the structure (stabilization) of the resistive layer, to carry out the adjustment (trimming) of the value of the resistor to the desired nominal value. Development of specialized equipment allowing for a batch pulsed current processing of thin-film strain gauges, is an urgent task. **Materials and methods.** Equipment developed on the basis of the following principles: processing of thin-film TR package electrical pulses; choice of parameters of the stabilizing electric pulses to heat the thin film of TR over the time the impulse has reached the temperature of intensive oxidation; choice of electric pulse parameters fit so that heating of the thin-film TR for the pulse time not reached temperature the diffusion of resistive and dielectric insulating thin-film layers; the need to complete all the events in TR processes during the pause between pulses; control parameters TR in the pauses between pulse packets; carrying out treatment on air under normal climatic conditions. **Results.** Describes the block diagram and the operation of the device. The sequence of operations for stabilizing and adjusting the resistance of the strain gages. **Conclusions.** The use of the developed system simplifies the adjustment of sensors and increases their thermal stability.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тензорезистор, стабилизация, подгонка, пакетная импульсно-токовая обработка.

К e y w o r d s: tensoresistor, stabilization, trimming, batch pulse-current handling.

Важной задачей при создании тензорезисторных датчиков физических величин является обеспечение долговременной стабильности их выходных параметров. Стабильность выходных параметров датчиков определяется стабильностью тонкопленочных тензорезисторов, образующих измерительный мост. Основной причиной нестабильности сопротивлений тонкопленочных тензорезисторов (ТР) являются скрытые дефекты в изолирующем и резистивном слое тонкопленочной структуры интегрального чувствительного элемента датчика давления. Причинами возникновения скрытых дефектов в тонких изолирующем и резистивном слоях являются как исходное состояние рабочей поверхности металлических упругих элементов (УЭ) (риски, царапины исчезающего и неисходящего характера на рабочей поверхности после полировки, структурные дефекты самого материала УЭ), так и отклонения самого технологического процесса напыления диэлектрического и тензорезистивного материалов (давление и состав остаточных газов в рабочем объеме вакуумной камеры, скорость напыления материалов, температура подложек в процессе напыления), приводящие к различным размерам зерен этих слоев и к появлению в них пор при взаимодействии с остаточными газами [1].

Другой важной причиной нестабильности сопротивлений является незавершенность процессов формирования структуры ТР. Непосредственно проводимая после напыления резистивного слоя термостабилизация в вакууме при температуре подложкодержателя 360 °С в течение одного часа позволяет в определенных пределах изменить и величину зазора между отдельными зернами структуры, и размер самих зерен, тем самым обеспечить в приближении термодинамически устойчивую структуру резистивного слоя [2]. Застабилизировать структуру тонкой пленки выбранными режимами стабилизации в вакууме с гарантированной надежностью не удастся из-за неизбежного присутствия в ней скрытых дефектов, обусловленных исходным состоянием самой рабочей поверхности УЭ, а также привносимых и самим процессом напыления резистивного слоя [3].

Импульсная обработка повышенными электрическими нагрузками позволяет проводить структурирование (стабилизацию) резистивного слоя (отжигать скрытые дефекты в пленке, упорядочивать структуру пленки, образуя мостики проводимости между отдельными зернами, в том числе и в зонах расположения отжигаемых скрытых дефектов), осуществлять юстировку (подгонку) величины сопротивлений резисторов до требуемого номинального значения без изменения их геометрии, а также отбраковывать потенциально ненадежные резисторы с «критичными» дефектами резистивного слоя. При этом выбором режимов обработки можно разделить этап структурирования (стабилизации) или этап юстировки сопротивления ТР [4–7]. Разработка специализированного оборудования, позволяющего проводить пакетную импульсно-токовую обработку тонкопленочных тензорезисторов, является темой настоящей статьи.

Основными принципами создания оборудования для импульсно-токовой обработки являются:

- обработка тонкопленочных ТР пакетом электрических импульсов;
- выбор параметров стабилизирующих электрических импульсов так, чтобы нагрев тонкопленочных ТР за время импульса не достигал температуры интенсивного окисления;
- выбор параметров электрических импульсов подгонки так, чтобы нагрев тонкопленочных ТР за время импульса не достигал температуры диффузии тензорезистивного и диэлектрического изолирующих тонкопленочных слоев;
- необходимость завершения всех происходящих в ТР процессов за время паузы между импульсами;
- контроль параметров ТР в паузах между пакетами импульсов;
- проведение обработки на воздухе при нормальных климатических условиях.

В соответствии с изложенными принципами разработана система стабилизации и подгонки тонкопленочных ТР, структурная схема которой представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации и подгонки тензорезисторов

Система содержит формирователь импульсов управления, с которого управляющие импульсы поступают на таймер времени измерения и индикации и программируемый счетчик импульсов стабилизации и подгонки. Таймер измерения управляет переключателем, который подключает обрабатываемый ТР к измерителю сопротивления или управляемому ключу. Со счетчика импульсов пакет импульсов поступает на управляемый ключ, через который усиленные импульсы от источника постоянного тока поступают на обрабатываемый резистор. Пульт управления управляет режимами стабилизации и подгонки, задавая длительность и количество импульсов.

В качестве источника постоянного тока используется источник питания постоянного тока Б5-8, в качестве измерителя сопротивления – ампервольтметр цифровой Ф-30. Обрабатываемые ТР модулей измерительных датчиков давления подключаются к системе посредством пульта. Остальные узлы системы смонтированы в кожухе АМУ 5.683.042, на передней панели которого расположены переключатели пульта управления и клеммы для подключения приборов и пульта. В качестве переключателя применено электромеханическое реле, в качестве управляемого ключа – высоковольтный транзистор. Формирователь импульсов управления, таймер измерения, счетчик импульсов выполнены на цифровых интегральных микросхемах. Циклограмма работы устройства представлена на рис. 2.

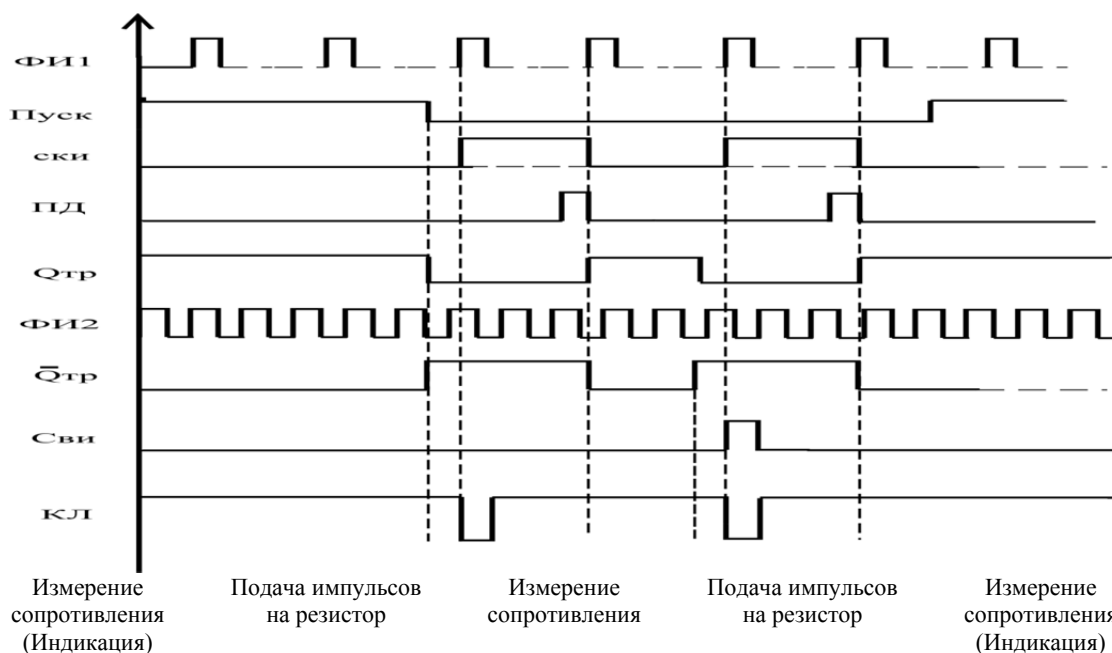


Рис. 2. Циклограмма работы системы пакетно-импульсной стабилизации и подгонки

Оператор подключает обрабатываемый резистор к системе, выбирает режим работы «стабилизация» и проводит замер сопротивления $R_{исх}$. Затем по формуле $U = \sqrt{50R_{исх}}$ рассчитывает напряжение и задает соответствующую величину на источнике питания Б5-8. Затем включает тумблер «пуск» на передней панели системы и контролирует уменьшение значения сопротивления по индикатору Ф-30. Когда уменьшение сопротивления прекратится, завершится этап стабилизации. Сопротивление обрабатываемого ТР станет равно $R_{ст}$. Оператор включает тумблер «пуск», рассчитывает по формуле $U_{имп} = \sqrt{60R}$ напряжение импульсов подгонки. Задав соответствующее значение на источнике питания, Б5-8 переводит систему в режим «подгонка» и рассчитывает значение сопротивления $R_{расч} = 1,015 R_{ст}$. Затем включает тумблер «пуск» на передней панели системы и контролирует увеличение значения сопротивления по индикатору Ф-30. При достижении значения сопротивления равного $R_{расч}$, подгонку прекращают, отключив тумблер «пуск».

При обработке тонкопленочного ТР на этапе стабилизации происходит его нагрев, причем более интенсивно нагреваются участки, имеющие скрытые дефекты структуры, характеризующиеся большим сопротивлением, чем бездефектные участки, а также промежутки между зернами структуры. При достижении определенной температуры дефекты отжигаются, а зерна структуры соединяются. Это приводит к снижению сопротивления обрабатываемого ТР. На этапе подгонки нагрев ТР происходит до температуры, при которой происходит окисление резистивного слоя кислородом воздуха.

Использование разработанной системы пакетной импульсно-токовой обработки обеспечивает проведение стабилизации и подгонки сопротивления тонкопленочных ТР.

В результате упрощается настройка измерительной схемы датчиков при балансировке за счет возможности обеспечения идентичных значений сопротивлений ТР и повышается температурная стабильность начального разбаланса за счет существенного уменьшения разброса температурного коэффициента сопротивления внутри мостовой схемы.

Библиографический список

1. Волохов, И. В. Опыт разработки технологии тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления / И. В. Волохов, Ю. А. Зеленцов // Приборы и системы управления. – 1990. – № 10. – С. 41–42.
2. Волохов, И. В. Технологические приемы достижения долговременной стабильности чувствительных элементов металлопленочных датчиков силы НВ-005 / И. В. Волохов, Д. В. Попченков // Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2004 : сб. докладов науч.-техн. конф. – Пенза, 2004. – С. 244–247.
3. Волохов, И. В. Импульсная токовая обработка тензосхемы / И. В. Волохов, Е. В. Песков, В. В. Корнев // Искусственный интеллект. – 2001. – № 3. – С. 607–612.
4. Фоменко, П. А. Импульсная отбраковка резисторов со скрытыми дефектами резистивного слоя / П. А. Фоменко // Электронная техника. Сер. III, Микроэлектроника. – 1973. – Вып. 2 (42). – С. 58–60.
5. Чебурахин, И. Н. Способ повышения стабильности тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин, П. А. Колосов // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 23–25.
6. Волохов, И. В. Опыт применения новых технологических методик для повышения стабильности параметров тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления, используемых в РКТ / И. В. Волохов, П. А. Колосов, И. Н. Чебурахин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 414–418.
7. Кандыба, П. Е. Импульсная юстировка величины сопротивления тонкопленочных резисторов / П. Е. Кандыба, П. А. Фоменко // Электронная техника. Сер. III, Микроэлектроника. – 1972. – Вып. 6 (40). – С. 56–61.

Чебурахин Игорь Николаевич

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

Cheburakhin Igor Nikolaevich

head of the microelectronics department,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 537.39

Чебурахин, И. Н.

Оборудование для пакетной импульсно-токовой стабилизации тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 14–18.

Ж. А. Даев

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ: ОБЗОР И АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Z. A. Daev

MEASUREMENT SYSTEMS OF THE FLOW RATE AND QUANTITY OF FLUID OF VARIABLE DIFFERENTIAL PRESSURE: THE REVIEW AND ANALYSIS OF ACHIEVEMENTS IN THE LAST DECADES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Измерение расхода и количества веществ является одним из способов достижения энергетической эффективности в различных отраслях промышленности. Среди большого количества методов измерения расхода и количества энергоресурсов особое место занимают системы измерения расхода на базе переменного перепада давления. Цель работы – обзор последних достижений в области повышения точности и эффективности этих систем и их анализ, который позволил бы сосредоточить внимание заинтересованных лиц на существующих проблемах метода. *Материалы и методы.* В рамках выполнения работы проведен анализ количественного распределения рассматриваемого метода и измерительных систем на его основе, рассмотрены и проанализирован рынок распределения расходомерных систем за последние два десятилетия. *Результаты.* В работе показано, что доля распространения традиционных технологий измерения расхода занимает половину всего парка расходомерных средств и систем, а величина распределения рассматриваемых измерительных систем остается наиболее высокой и востребованной. В статье показаны основные направления в рамках, которых ведутся исследования по улучшению и повышению эффективности метода. *Выводы.* Проведенный анализ показывает, что методы повышения точности и надежности функционирования исследуемых измерительных систем можно рассмотреть путем разделения на аппаратные способы повышения эффективности и алгоритмические, которые уточняют модель, в соответствии с которой ведется процесс выполнения измерений расхода и количества веществ.

A b s t r a c t. *Background.* Measurement of flow rate and the quantity of substances is one way to achieve energy efficiency in the various industries. Variable differential pressure flow measurement systems are very special type of the instrumentation among the large number of flow measurement techniques and systems. The purpose of this article is to provide an overview of the latest achievements in the field of improving accuracy and efficiency of these systems and make their analysis, which would allow focusing of stakeholders on the existing method problems. *Materials and methods.* As a part of the work was made an analysis of the quantitative distribution of the method and measurement systems based on variable pressure

drop, examined and studied the proportion of the flow distribution systems market over the past two decades. **Results.** The paper shows that the share of the spread of traditional flow measurement technologies takes half the market of the flow measurement equipment. The value of the distribution of the considered measuring systems remains the most popular and high. The article shows the main areas within which research is underway to improve the method. **Conclusions.** This analysis shows that the improving methods of the accuracy and reliability of functioning of these measurement systems are possible to consider by separation on ways to improve hardware and on algorithmic ways to increase efficiency.

К л ю ч е в ы е с л о в а: расход, расходомеры, переменный перепад, измерительная система, жидкость, газ, точность.

Key words: flow, flowmeters, differential pressure, measurement system, liquid, gas, accuracy.

Введение

Рациональное и правильное использование водных и энергетических ресурсов является одной из главных целей нынешнего времени с учетом их возрастающего потребления за последние десятилетия. Одним из главных и успешных инструментов в достижении этой цели является развитие методов и методик повышения точности и надежности средств и систем измерения расхода и количества веществ. В качестве доказательства этому можно сослаться на работы [1, 2], в которых приводятся результаты исследований о достижении значительной экономии в денежных средствах при уменьшении погрешности измерения расхода жидкостей и газов на 0,01 %.

Существует большое многообразие методов измерения расхода и количества жидкостей и газов. В соответствии с работой [3] методы измерения расхода и количества условно делят на традиционные и инновационные. К традиционным средствам измерений относятся расходомеры переменного перепада давления, тахометрические (турбинные) средства измерения, объемно-вытеснительные и меточные приборы, а также приборы, реализующие измерение расхода по принципу «площадь – скорость». Всем этим приборам присущи следующие общие отличительные признаки [3, 4]:

1. Технология измерения была изобретена задолго до 1950 г.
2. Технология измерения не сильно изменялась с точки зрения разработки новых продуктов на рынке.
3. Количество преимуществ данной группы приборов увеличивается незначительно по сравнению с приборами на базе новых технологий.
4. Затраты на обслуживание и поддержание в работоспособном состоянии довольно высокие по сравнению с приборами на базе новых технологий.

Одним из главных представителей традиционных методов измерения расхода и количества веществ является метод переменного перепада давления. Несмотря на то, что перечисленные признаки не всегда являются сильной стороной систем, построенных по методу переменного перепада давления, данный метод все еще остается популярным на большом числе различных производств. Поэтому целью данной статьи является анализ применения данного метода в промышленности, обзор и оценка последних достижений, которые ведут к совершенствованию метода за последние 20 лет.

Обзор достижений улучшения метода

В соответствии с данными опросов [3], которые проводились компаниями *Flow Research* и *Ducker Worldwide*, самым распространенным методом измерения расхода и количества жидкостей и газов является метод переменного перепада давления. В рамках данной работы было опрошено и исследовано большое количество самых передовых компаний мира на всех континентах (около 300 компаний). Также в соответствии с работой [4] доля систем измерения и приборов, основанных на традиционных технологиях измерения расхода веществ, составляет около 50 % всего мирового парка расходомерных систем. В работе [3] говорится, что по ре-

зультатам опроса системы измерения, основанные на переменном перепаде давления, составляют почти одну треть (27,2 %) всех методов измерения расхода. Также согласно работе [3] величина распределения расходомеров переменного перепада давления в географическом масштабе составляет следующее: системы рассматриваемого типа в Северной Америке составляют 38 % среди всех остальных измерительных технологий, в Азии эта цифра достигает 26 %, а в Европе – 15 %.

Относительно распространения на производствах особенно широкое применение метод получил в газовой промышленности, на отдельных производствах химической промышленности.

Все это является свидетельством того, что метод переменного перепада давления является доминирующим способом измерения расхода, особенно при измерении больших потоков вещества на трубах большого диаметра в соответствии с рекомендацией [5].

Широкому и успешному распространению метода переменного перепада давления способствовало отсутствие необходимости в дорогостоящем поверочном оборудовании и развитие вычислительной техники и информационных технологий, которые значительно повысили точность результатов измерений, автоматизировали процесс обработки данных и сделали удобным восприятие результатов измерений.

В настоящее время улучшение и развитие данного метода привело к разработке различных конструкций быстросъемных сужающих устройств (СУ), а развитие информационных технологий и методов обработки результатов измерений с помощью микропроцессорных систем сделали возможным разработку многопараметрических преобразователей, которые позволили объединить первичный преобразователь расхода с вторичными средствами измерений в единый объединенный комплекс.

Одним из методов повышения точности рассматриваемых систем является повышение точности измерительных преобразователей физических величин, входящих в состав систем в качестве каналов и элементов. Значительное повышение классов точности преобразователей перепада давления, давления и температуры, несомненно, приведет к повышению точности всей системы измерения расхода и количества веществ.

Помимо конструктивных решений и модернизации главных составных элементов систем измерения расхода и количества веществ, которые не претерпели значительных изменений за последние годы, существенно улучшались способы определения и методы уточнения различных коэффициентов, входящих в состав функции преобразования, что способствовало уменьшению погрешности воспроизводимого расхода вещества.

Одним из важных параметров, который лежит в основе метода, является так называемый коэффициент истечения СУ, представляющий собой отношение действительного значения расхода вещества, который протекает через СУ, к соответствующему ему значению, рассчитанному согласно теоретической модели расхода вещества через это же устройство:

$$C = \frac{4Q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{\epsilon \pi d^2 \sqrt{2\Delta p \rho}}, \quad (1)$$

где Q_m – массовый расход вещества; β – относительный диаметр СУ; d – диаметр СУ; Δp – измеряемый перепад давления на СУ; ρ – плотность вещества при рабочих условиях; ϵ – поправочный множитель на расширение, который для жидкостей принимается равным единице.

Так, были проведены эксперименты, которые позволили получить новые коэффициенты расширения и истечения, входящие в состав уравнения (1). Результаты экспериментов и оценка погрешностей новых коэффициентов приводится в работах [6, 7]. Новые коэффициенты истечения и расширения по Ридер – Харрису и Галлахеру, полученные взамен ранее действовавших коэффициентов по Штольцу согласно работе [8], легли в основу методики выполнения измерений в соответствии с нормативами [9, 10].

Но несмотря на существующее удовлетворяющее многих положение относительно получаемых результатов измерений с помощью метода, ведутся попытки развивать дальше метод альтернативными путями, повышая его точность.

В соответствии с работами [11, 12] предлагается пересмотреть концепцию вычисления коэффициентов истечения сужающих устройств, отказавшись от зависимости от числа Рей-

нольдса. В работе [11] предлагается альтернативное уравнение, зависящее только от перепада давления, для данного коэффициента, который непрерывно измеряется системой. Это позволит отказаться от определения коэффициента истечения методом многочисленных итераций, что значительно ускорит процесс вычисления, значительно сократит память программ, реализующих алгоритм измерения расхода, упростит восприятие данных параметров. Предлагаемое уравнение для коэффициента выглядит следующим образом:

$$C = a_1 + a_2 \beta^{3,75} + a_3 \beta^4 + a_4 \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^{1,25} + a_5 \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^{2,25}, \quad (2)$$

где $a_1 = 0,59865$, $a_2 = 0,81891$, $a_3 = -0,86143$, $a_4 = 0,25169$, $a_5 = -2,2216$; Δp – перепад давления на диафрагме; p – абсолютное давление газа до сужающего устройства. Поэтому уравнение (2) является более удобным и простым для восприятия по сравнению с принятыми в нормативных документах [9, 10].

Помимо исследований по уточнению самих коэффициентов истечения и расширения СУ, недавно были проведены эксперименты по оценке влияния температуры и различных возмущающих воздействий потока на процесс измерения расхода [13].

Результаты работы [13] показали, что температура в диапазоне от 20 до 85 °С абсолютно не оказывает влияния на исходные коэффициенты истечения, тем самым исключается возможность влияния этой величины на коэффициент истечения.

В рамках данных работ проводились исследования по влиянию профиля набегающего потока газа на сужающее устройство. В ходе экспериментов сравнивались значения коэффициентов истечения по Штольцу и Ридер – Харрису и Галлахеру при различных возмущающих воздействиях, которые показали, что в широком диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент истечения, положенный в основу [9, 10], совпал с коэффициентами возмущенного потока с нестандартным сужающим устройств. Это является еще одной причиной продолжать работы по уточнению коэффициентов истечения.

Не остаются в стороне и работы по изучению участков стабилизации для расходомеров, обусловленные структурой потока и влиянием шероховатости трубопроводов. Результаты этих исследований отражаются как в работах [6, 13], так и в работах типа [14, 15].

Одним из направлений совершенствования метода является также защита от недостоверных измерений и искажений измеряемой информации. В этом направлении ведутся работы по созданию манифольдов и вентильных блоков, исключающих умышленное искажение данных. К примеру, в работе [16] докладывается о разработке безвентильных блоков, которые обеспечивают строгое выполнение порядка включения либо отключения вентилей для отбора давления до и после сужающего устройства в одно действие.

Все это показывает, что наиболее традиционный и апробированный метод измерения расхода и количества жидкостей и газов не исчерпал возможностей по повышению точности и надежности. Активно ведутся исследования, способствующие улучшению метода как на уровне моделирования величин, входящих в функцию преобразования системы, так и на уровне повышения надежности аппаратной части.

Заключение

Таким образом, в работе проделан обзор и анализ значимых достижений в области повышения точности измерительных систем расхода и количества веществ методом переменного перепада давления, представлены и проанализированы последние попытки по улучшению коэффициентов истечения сужающих устройств, применяемых в качестве первичных преобразователей расхода. В статье приводятся данные о величине распределения расходомерных систем на основе данного метода в мире, говорящие об их подавляющем применении в различных отраслях промышленности, что является главной основой для продолжения исследований по повышению точности и информационной надежности метода переменного перепада давления. Учитывая, что рассматриваемые системы являются комбинацией различных преобразователей физических величин, каждая из которых представляет собой отдельную область развития измерительной техники и приборостроения, их повышение точности и надежности

приведет к развитию самих расходомеров. Поэтому главным направлением исследований в этой области видится повышение информационной надежности моделей, описывающих процессы, протекающие в первичных преобразователях расхода.

Библиографический список

1. Morrow, T. B. Orifice meter expansion factor tests in 4-in. and 6-in. meter tubes. Topical report GRI-04/0042 / T. B. Morrow // SwRI project no. 18.06584. – San-Antonio (TX), 2004.
2. Пистун, Е. П. Учет и экономия природного газа / Е. П. Пистун, Р. Я. Дубиль // Коммерческий учет энергоносителей. – СПб. : Политехника, 1999. – С. 19–28.
3. Yoder, J. Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma / J. Yoder // Control Magazine. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–6.
4. Yoder, J. Measuring a 1 % gain in a 4,5 billion dollars market / J. Yoder // Flow Control. – 2008. – Vol. 6. – P. 42–45.
5. МИ 3082-2007. Выбор методов и средств измерений расхода и количества потребляемого природного газа в зависимости от условий эксплуатации на узлах учета. Рекомендации ФГУП ВНИИР. – Казань : ВНИИР, 2007. – 39 с.
6. Пистун, Е. П. Уточнение коэффициента истечения стандартных диафрагм расходомеров переменного перепада давления / Е. П. Пистун, Л. В. Лесовой // Датчики и системы. – 2005. – № 5. – С. 14–16.
7. Daev, Zh. A. A Comparative Analysis of the Discharge Coefficients of Variable Pressure-Drop Flowmeters / Zh. A. Daev // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 58. – С. 323–326.
8. Stolz, J. A Universal Equation for the Calculation of Discharge Coefficient of Orifice Plates / J. Stolz // Flow Measurement of Fluids, North-Holland, Amsterdam. – 1978. – P. 519–534.
9. ISO 5167: 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. 536/ISO. – Guide, 2003.
10. ГОСТ 8.586.2–2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 2. Диафрагмы. Технические требования. – М. : Стандартинформ, 2007. – 37 с.
11. Cristancho, D. E. An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas / D. E. Cristancho, K. R. Hall, L. A. Coy, G. A. Iglesias-Silva // Flow Measurement and Instrumentation. – 2010. – Vol. 21. – P. 299–301.
12. A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamic / M. A. Gomez-Osorio, D. O. Ortiz-Vega, I. D. Mantilla, H. Y. Acosta, J. C. Holste, K. R. Hall, G. A. Iglesias-Silva // Flow Measurement and Instrumentation. – 2013. – Vol. 33. – P. 197–201.
13. Buker, O. Reynolds number dependence of an orifice plate / O. Buker, P. Lau, K. Tawackoli-an // Flow Measurement and Instrumentation. – 2013. – Vol. 30. – P. 123–132.
14. Nadeem, M. Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls / M. Nadeem, H. J. Lee, J. Lee, H. J. Sung // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2015. – Vol. 56. – P. 16–27.
15. De Marchis, M. Numerical observations of turbulence structure modification in channel flow over 2D and 3D rough walls / M. De Marchis, B. Milici, E. Napoli // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2015. – Vol. 56. – P. 108–123.
16. Пистун, Е. П. Применение безвентильных блоков подсоединения дифманометров для устранения возможности искажения результатов измерений при учете энергоносителей / Е. П. Пистун, Р. Я. Дубиль // Коммерческий учет энергоносителей. – СПб. : Политехника, 2001. – С. 350–354.

Даев Жанат Арикулович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технических
и естественно-научных дисциплин,
Казахско-Русский международный университет
(Республика Казахстан, г. Актобе, ул. Айтеке би, 52)
E-mail: zhand@yandex.ru

Daev Zhanat Arikulovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technical and natural sciences,
Kazakh-Russian International University
(52 Aiteke bi street, Aktobe, Republic of Kazakhstan)

УДК 681.121.85

Даев, Ж. А.

Измерительные системы расхода и количества жидкости и газа переменного перепада давления: обзор и анализ достижений за последние десятилетия / Ж. А. Даев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 19–24.

Е. А. Архангельская, Э. Л. Заморонова

**АНАЛИЗ ПРОТИВОРЕЧИЙ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫХ
И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭТАЛОННОЙ БАЗЕ
ДЛЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ
ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ДИАПАЗОНЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

E. A. Arkhangelskaya, E. L. Zamorenova

**ANALYSIS OF CONTRADICTIONS OF LEGISLATIVE
AND NORMATIVE REQUIREMENTS TO THE REFERENCE BASE
FOR VERIFICATION OF MEASUREMENT MEANS OF DENSITY
ENERGY FLOW IN THE RANGE OF HIGH FREQUENCIES**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены противоречия и несоответствия действующих на территории Российской Федерации законодательных и нормативных требований к эталонной базе для поверки средств измерений плотности потока энергии в диапазоне сверхвысоких частот. *Методы.* Проанализированы требования законодательных и нормативных документов к основным понятиям об эталонах единиц величин, их назначению и классификации, а также требования по созданию, содержанию и применению эталонов, указанные в Федеральном законе от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», Постановлении Правительства РФ от 23.09.2010 № 734 «Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» (вместе с «Положением об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений»), РМГ 29–2013 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения», ГОСТ Р 8.885–2015 «Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения». *Результаты.* Приведены недостатки установленных в нормативных документах терминов и определений. Выявлены противоречия между российскими и международными нормативными документами в основополагающих метрологических понятиях. Отмечены расхождения между указаниями на государственных поверочных схемах и требованиями нормативных документов, которые могут вызвать затруднения у метрологических служб при их непосредственном применении на производстве. *Выводы.* Законодательные и нормативные документы в области метрологии являются системой взаимосвязанных требований. Присутствующие в них несогласованность и несоответствия замедляют и усложняют работу метрологических служб, приводят к общему снижению качества и производительности предприятий. Действующие в настоящее время на территории Российской Федерации законодательные и нормативные документы, исследованные в статье, требуют доработки и приведения в соответствие установленных в них терминов, понятий и указаний, относящихся к эталонам единиц величин.

A b s t r a c t. Background. Collisions and noncompliance of Russian Federation norms and standard requirements to measurement standards for verification of power flow density measuring instruments at ultra-high frequency that are consisting in current laws and normative documents are considered in journal article. **Materials and methods.** Legal and standard requirements to basic definitions about measurement standards of units of quantities, their appointment, classification and requirements to measurement standards creation, content and appliance are analyzed. These requirements are listened in: Federal Law from 26.06.2008 № 102-FZ «Concerning the Ensuring of the Uniformity of Measurements»; RF Government Regulation from 23.09.2010 N 734 «Concerning the measurement standards, used by Governmental Regulation of Ensuring of the Uniformity of Measurements (including «Statute on measurement standards, used by Governmental Regulation of Ensuring of the Uniformity of Measurements»)»; RMG 29-2013 «State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions»; GOST R 8.885–2015 «State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement standards. Basic principles». **Results.** Defects of regulatory acceptance terms and definitions are adduced. Contradictions between the Russian and international normative documents concerning fundamental metrological terms are exposed. Discrepancies between instructions in state verification schedules and requirements of normative documents which can cause difficulties for metrological services in case of their direct application on production are specified. **Conclusions.** Legal and standard documents in area of metrology contain the system of interrelated requirements. Inconformity and noncompliance, those are present in legal and standard documents, delay and complicate the metrological service activities and reduce general quality and productivity of organizations work. Legal and standard documents in effect in Russian Federation now, which have been researched in journal article, need elaboration and adjustment in accordance with terms, definitions and directive instructions concerning measurement standards of units of quantities.

К л ю ч е в ы е с л о в а: эталонная база, требуемая точность, рабочий эталон, государственный первичный эталон, нормативные документы, система.

Key words: reference base, required accuracy, working standard, state primary standard, normative documents, system.

Базовой, фундаментальной основой метрологии как науки является обеспечение требуемой точности при проведении измерений и получении результатов, на основе которых будут приниматься важнейшие решения по разработке, проектированию, производству и эксплуатации любых видов технических средств и систем в любой отрасли промышленности. Основой любой науки является терминология – понятийный аппарат. Прежде чем проводить какой-либо эксперимент и выполнять измерения, необходимо заложить основы для общего понимания, что именно подразумевает под собой то или иное понятие и происходящие из него термины и определения, а также установить, в каких смысловых границах (рамках) присвоенное определение будет это понятие раскрывать. Понятийный аппарат должен быть стандартизирован.

Любое стандартизированное требование должно базироваться на научных принципах формальной логики и происходящих из нее законов мышления в его последовательности, непротиворечивости и доказательности. Формальная логика исследует абстрактное мышление и его основные формы: понятие, суждение, умозаключение. Вся система понятий – это базовые элементы, из которых строится логическое умозаключение. В центре логики находится понятие. Логика оперирует понятиями, т.е. логика – это понятийное мышление. Более узким, чем понятие, является термин. Термин – это то, что происходит с понятием в результате его определения, т.е. трансформация понятия в результате определения. По сути, термин – это понятие, от которого отсечено все лишнее. В формальной логике существуют определенные правила, по которым должно выстраиваться определение, т.е. правила присвоения определений.

Кроме того, существует отдельный раздел логики, называемый логикой норм. Логика норм разрешает многие вопросы права, выявляет противоречия в законах и нормативных

актах, объясняет необходимость включения той или иной нормы в нормативный акт. Существуют различные системы норм, которые иногда не согласуются друг с другом. Действие, обязательное в рамках одной системы, может быть безразличным или даже запрещенным в рамках другой. Но ни в какой системе норм одно и то же действие не может быть вместе и разрешенным, и запрещенным. В области норм требуется рациональное рассуждение, которое должно предлагать разумные основания для действий. И совершенно очевидно, что рассуждения нельзя назвать рациональными, если они обосновывают обязательность выполнения невозможных действий.

При рассмотрении основополагающих нормативных требований к эталонной базе для поверки средств измерения в них обнаруживаются положения, допускающие двусмысленную трактовку, несоответствия в определении базовых понятий и нарушения логических законов.

Основные понятия об эталонах единиц величин, их назначении и классификации, а также требования по созданию, содержанию и применению эталонов приведены:

- в Федеральном законе от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»;
- Постановлении Правительства РФ от 23.09.2010 № 734 «Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» (вместе с «Положением об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений»);
- РМГ 29–2013 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения»;
- ГОСТ Р 8.885–2015 «Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения».

Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» трактует понятие «*государственный первичный эталон единицы величины*» как «*государственный эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, утверждаемый в этом качестве в установленном порядке и применяемый в качестве исходного на территории Российской Федерации*» [1].

В первую очередь следует отметить, что в самом определении основной функции эталона «*передача единиц величин*» или «*передача размера единиц величин*» имеется логическое противоречие, связанное с трактовкой слова (понятия) «*передача*» с точки зрения русского языка.

Толковым словарем Т. Ф. Ефремовой понятие «*передача*» определяется как «*действие по значению глагола передавать*» [2], т.е. «*вручать, отдавать, подавать какой-либо предмет кому-либо*» [2]. Толковым словарем В. И. Даля понятие «*передавать*» определяется как «*передать что кому, подавать из рук в руки*» [3].

С точки зрения прямого смысла в русском языке единица величины не является предметом, который можно непосредственно передать. Исходя из определения того же РМГ 29–2013: «*единица (измерения) (величины): Величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин*» [4]. То есть единица величины – это принятое по соглашению значение, а величина – это «*свойство материального объекта или явления*» [4], а значит – абстрактные понятия, а не конкретный предмет.

Между Российскими и международными нормативными документами присутствует противоречие в определении и трактовке самого понятия «*эталон*». В соответствии с определениями Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ и РМГ 29–2013 под эталоном понимается техническое средство, средство измерительной техники. В международных нормативных документах применяется иная трактовка понятия «эталон». В международном словаре по метрологии JCGM 200:2008 под термином «*эталон*» понимается «*реализация определения данной величины с установленным значением величины и связанной с ним неопределенностью измерений, используемая в качестве основы для сравнения*» [5]. Если в Российских нормативных документах эталон – это, в первую очередь, само средство измерения (прибор или установка), то по трактовке, принятой в международном законодательстве, под эталоном понимается действие – реализация определения величины, которое может обеспечиваться средством измерения. Неясно, каким образом Российские метрологические требования могут быть приведены

в соответствие с международными (так называемая «гармонизация» требований), если в базовых определениях основополагающих метрологических понятий уже присутствует изначально разное понимание их основного смысла?

Между Российскими нормативными документами также имеются расхождения, причем не только связанные с терминологией или ориентацией на международные стандарты. Можно отметить, что эти противоречия присутствуют как раз в недавно принятых ГОСТ Р 8.885–2015 и РМГ 29–2013 – противоречия, относящиеся к классификации и функциональному назначению эталонов.

Так, в соответствии с установленной ГОСТ Р 8.885–2015 классификацией вторичные эталоны подразделяются на «*эталон-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны единиц величин*» [6]. И если определение и назначение эталонов сравнения идентично указано во всех нормативных документах – как в действовавших ранее, так и в актуальных на данный момент – ГОСТ Р 8.885–2015 и РМГ 29–2013, то в определениях, установленных для эталонов-копий и рабочих эталонов имеются явные неточности и недоработки. В РМГ 29–2013 точное определение понятия «*эталон-копия*» отсутствует. Ранее, в отмененном на территории РФ ГОСТ 8.057–80 устанавливалось, что «*эталон-копии предназначены для передачи размера единицы рабочим эталонам*» [7]. В новом ГОСТ Р 8.885–2015 в качестве назначения «*эталон-копий*» указано снижение эксплуатационной нагрузки с государственных первичных эталонов и их замена в обоснованных случаях с уточнением, что «*эталон-копия единицы величины не всегда является физической копией государственного первичного эталона единицы величины*» [6]. При этом применение эталонов-копий никак не регламентировано, отсутствуют указания, какие именно случаи можно считать обоснованными и каким образом законодательно правомерно для снижения нагрузки с государственных первичных эталонов применять эталоны-копии.

Явное противоречие между ГОСТ Р 8.885–2015 и РМГ 29–2013 состоит в определении понятий «*рабочий эталон*» и «*рабочие эталоны единиц величин*». В соответствии с РМГ 29–2013, рабочий эталон – это «*эталон, предназначенный для передачи единицы величины или шкалы измерений средствам измерений*» [4]. ГОСТ Р 8.885–2015 уточняет, что «*рабочие эталоны единиц величин предназначены для передачи единиц величин менее точным эталонам единиц величин и средствам измерений*» [6]. То есть РМГ устанавливает для рабочих эталонов применение для передачи единиц величин только средствам измерений, а определение ГОСТ допускает использование рабочих эталонов и для передачи единиц величин другим менее точным эталонам. Ранее в отмененном на территории РФ ГОСТ 8.057–80 было установлено иное назначение рабочих эталонов – они предназначались «*для проверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений*» [7]. РМГ 29–2013 и ГОСТ Р 8.885–2015 оставили за рабочими эталонами функции передачи единиц величин на нижнюю ступень иерархии эталонов при этом с явным расхождением в трактовке этой иерархии.

В приведенной в новом ГОСТ Р 8.885–2015 классификации эталонов с подразделением их на одиночные, групповые и эталонные наборы или эталонные комплексы функциональное назначение данных типов эталонов изменено, что влечет за собой изменение состава, содержания и порядка применения эталонов. Ранее отмененный ГОСТ 8.057–80 определял одиночный эталон как эталон, который «*состоит из одного средства измерений или одной измерительной установки, обеспечивающих воспроизведение и (или) хранение единицы самостоятельно, без участия других средств измерений того же типа*» [7]. Указание о самостоятельном воспроизведении и хранении одиночным эталоном единицы без участия других средств измерений в новом ГОСТ Р 8.885–2015 было исключено, соответственно допускается возможность воспроизведения и хранения единицы величины одиночным эталоном с помощью других средств измерения, что противоречит самой концепции понимания такого понятия, как «*одиночный эталон*».

ГОСТ Р 8.885–2015 дополнил определение группового эталона, касающееся его назначения, установив, что «*групповой эталон единицы величины состоит из совокупности основных технических средств одного типа (одного номинального значения или диапазона измерений), применяемых совместно для повышения точности воспроизведения и (или) хранения единицы величины и ее передачи нижестоящим по поверочной схеме эталонам или средствам измерений*» [6]. Ранее отмененный ГОСТ 8.057–80 определял групповой эталон только как «со-

вокупность средств измерений одного типа, применяемых как одно целое в целях повышения точности и метрологической надежности» [7].

В понятие эталонного набора внесено изменение по определению диапазона, в котором возможна передача единицы величины от эталонного набора к нижестоящим эталонам или средствам измерений. Если ранее ГОСТ 8.057–80 определял данный диапазон как диапазон, в котором *«отдельные средства измерения имеют различные номинальные значения¹ или диапазоны измерений²»* [7], то сейчас в соответствии с ГОСТ Р 8.885–2015 такой диапазон представляет собой всего лишь объединение диапазонов технических средств, включенных в данный эталонный набор. То есть указание о различных номинальных значениях, которые могут иметь средства измерений в определенном диапазоне, исключено.

В установленную ранее классификацию впервые введено такое понятие, как *«эталонный комплекс»*, представляющее собой объединение *«из нескольких установок, воспроизводящих и (или) хранящих единицу одной величины или единицы нескольких величин и передающих их нижестоящим по поверочной схеме эталонам единиц величин и средствам измерений»* [6]. В отменном ГОСТ 8.057–80 это понятие отсутствовало. В РМГ 29–2013 присутствуют только определения измерительной и эталонной установок. Какие-либо разъяснения по определению и порядку применения эталонных комплексов в нормативных требованиях не приведены.

Очередное расхождение присутствует между определением понятия *«поверочная схема»*, приведенном в РМГ 29–2013, и определением понятия *«государственная поверочная схема»*, приведенном в Постановлении Правительства РФ от 23.09.2010 № 734. Определение, установленное РМГ 29–2013 (*«иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа»* [4]), представляет поверочную схему только как структурную схему, на которой показаны иерархия и уровни подчиненности эталонов, что никак не отражает до конца основную функцию эталона, а именно порядок передачи единиц величин, а также не уточняет, каким образом такая передача может осуществляться. Определение, установленное Постановлением Правительства РФ от 23.09.2010 № 734, более точно отражает суть и главное назначение государственной поверочной схемы: это прежде всего *«документ, определяющий порядок передачи единиц величин эталонам единиц величин и (или) средствам измерений от эталонов единиц величин, имеющих более высокие показатели точности»* [8]. Но даже в этом определении имеется недоработка, касающаяся отсутствия указания на Государственной поверочной схеме применяемых методов и значений погрешностей при передаче единиц величин. Что же касается самих значений погрешностей эталонов и средств измерений, то в ГОСТ 8.061–80 приведены указания о том, каким образом в государственных поверочных схемах следует характеризовать погрешности для образцовых средств измерений [9]. При этом такое понятие, как *«образцовое средство измерения»* исключено из иерархической структуры эталонов и государственных поверочных схем.

Очередное серьезное противоречие присутствует между указаниями по сличению в государственных поверочных схемах и определением термина *«сличение эталонов»*, установленным в РМГ 29–2013. Так, к примеру, в соответствии с ГОСТ Р 8.574–2000 [10] передача единицы плотности потока энергии от государственного первичного эталона рабочим эталонам и поверочным установкам производится путем сличения. В качестве метода применяется сличение при помощи компаратора.

В соответствии с термином, приведенным в РМГ 29–2013, компаратор является средством измерений, предназначенным *«для сличения мер однородных величин, измерительных преобразователей и измерительных приборов»* [4]. Термин *«сличение эталонов»* определен в РМГ 29–2013 как *«установление соотношения между результатами измерений при воспро-*

¹ *«Номинальное значение величины: округленное или приближенное значение величины, приписанное средству измерений, которым следует руководствоваться при его применении»* [4].

² *«Диапазон измерений; рабочий диапазон: множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений или измерительной системой с указанными инструментальной неопределенностью или указанными показателями точности при определенных условиях»* [4].

изведении и передаче единицы измерения или шкалы измерений данными эталонами *одного уровня точности*» [4, 11]. Данное определение вступает в противоречие с процедурой передачи единицы измерения от первичного эталона к рабочим эталонам, установленной Государственными поверочными схемами. Государственный первичный эталон и рабочие эталоны воспроизводят и передают единицу величины *с разной степенью точности*. Соответственно в определении термина «*сличение эталонов*» по РМГ 29–2013 отсутствует указание о возможности передачи единиц величин от эталонов высшего уровня точности к эталонам с более низким, от Государственных первичных эталонов – к рабочим эталонам.

Из всего вышеперечисленного следует вывод о том, что законодательная и нормативная базы требуют доработки и приведения в соответствие между собой установленных в различных нормативных документах терминов и понятий, относящихся к эталонам единиц величин. Законодательные и нормативные документы в области метрологии являются системой взаимосвязанных между собой требований. Ключевое слово здесь «система» – единая система обеспечения единства измерений. Любое противоречие и несогласованность элементов системы между собой вносят дефект во всю систему. Когда количество противоречий достигает критического значения, система рушится. Неопределенность законодательных и нормативных требований замедляет и усложняет работу метрологических служб, приводит к общему снижению качества и производительности работы предприятий, если изначально допускать ошибки и несоответствия в основополагающих законах и стандартах или не устранять их сразу же, на этапе выявления. Метрология как наука имеет слишком широкую сферу применения, последствия ошибок в которой распространяются на все производство, промышленность и экономику. Отсюда следует та ответственность, которая лежит на ученых и специалистах, разрабатывающих, согласовывающих и утверждающих законодательные и нормативные документы в области метрологии.

Логика, научный подход и метрологическая точность – вот, что должно лежать в основе любого стандарта, нормативного требования или закона, обеспечивающих единство измерений [12, 13].

Библиографический список

1. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 26. – Ст. 3021.
2. Ефремова, Т. Ф. Современный толковый словарь русского языка : в 3 т. / Т. Ф. Ефремова. – М. : АСТ, 2005. – Т. 1. – 1168 с.
3. Даль, В. И. Большой иллюстрированный толковый словарь русского языка: современное написание / В. И. Даль. – М. : Астрель : АСТ : Транзиткнига, 2006. – 348 с.
4. РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2014.
5. JCGM 200:2008. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины : пер. с англ. и франц. / Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорусский государственный институт метрологии. – СПб. : Профessional, 2010. – 82 с.
6. ГОСТ Р 8.885–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2015.
7. ГОСТ 8.057–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны единиц физических величин. Основные положения. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980.
8. Постановление Правительства РФ от 23.09.2010 № 734 «Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (вместе с «Положением об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений»)» // Собрание законодательства РФ. – 2010. – № 40. – Ст. 5066.
9. ГОСТ 8.061–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. – М. : ИПК, Издательство стандартов, 2002.
10. ГОСТ Р 8.574–2000. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 0,3 до 178,4 ГГц. – М. : Стандартинформ, 2008.

11. Архангельская, Е. А. Допустимые решения задачи синтеза допусков внутренних параметров технических объектов / Е. А. Архангельская, Ю. Л. Николаев, А. В. Вишнеков. – Вестник московского государственного университета приборостроения и информатики. Сер.: Приборостроение и информационные технологии. – 2012. – № 38. – С. 46–56.
12. Ивин, А. А. Логика : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Ивин. – М. : Оникс : Мир и Образование, 2008. – 336 с.
13. Ивлев, Ю. В. Логика для юристов : учеб. / Ю. В. Ивлев. – М. : Юридический колледж МГУ, 1996. – 304 с.

Архангельская Елена Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра метрологии и стандартизации,
Московский технологический университет
МГУПИ
(Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)
E-mail: arleana@hazy.ru

Arkhangel'skaya Elena Anatol'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of metrology and standardization,
Moscow University of Technology MGUPI
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Заморенова Элизабет Леонардовна

заместитель начальника отдела
технического и нормативного контроля,
АО «МОЭК-Проект»
(Россия, г. Москва,
ул. Нижняя Красносельская, 28)
E-mail: Zamorenova_E_L@moeck.ru

Zamorenova Elizabeth Leonardovna

deputy head of the department
of technical and regulatory control,
JSC «MOEK-Project»
(28 Nizhnyaya Krasnosel'skaya street, Moscow, Russia)

УДК 006.91:53.08

Архангельская, Е. А.

Анализ противоречий законодательных и нормативных требований к эталонной базе для проверки средств измерений плотности потока энергии в диапазоне сверхвысоких частот / Е. А. Архангельская, Э. Л. Заморенова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 25–31.

УДК 519.24; 53; 57.017

В. И. Волчихин, Н. А. Иванова, Ю. И. Серикова, А. Г. Банных

**СИНТЕЗ И ТЕСТИРОВАНИЕ ОРАКУЛА, СПОСОБНОГО
ПРЕДСКАЗЫВАТЬ АСИММЕТРИЧНЫЕ ГРАНИЦЫ
ИНТЕРВАЛА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ МАЛЫХ ВЫБОРОК
БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

V. I. Volchikhin, N. A. Ivanova, Yu. I. Serikova, A. G. Bannykh

**SYNTHESIS AND TESTING OF AN ORACLE CAPABLE
OF PREDICTING ASYMMETRIC BOUNDARIES
OF THE ACTUAL POSITION OF THE MATHEMATICAL
EXPECTATION OF SMALL SAMPLES OF BIOMETRIC DATA**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью работы является оценка выигрыша от использования простейшего оракула, предсказывающего интервал неопределенности вычисления математического ожидания на малых тестовых выборках. *Материалы и методы.* Алгоритм вычисления математического ожидания давно известен и дает значительные ошибки на малых выборках. Это следствие того, что классический алгоритм вычисления не учитывает априорную информацию о виде закона распределения значений тестовой выборки, о размере тестовой выборки, о взаимном соотношении положения опытов в тестовой выборке. Учет всех этих дополнительных информационных параметров приводит к значительному сужению предсказания интервала возможного положения вычисляемого математического ожидания. *Результаты.* Показано, что простейший оракул, построенный на учете перечисленной выше априорной информации, дает более узкий интервал возможного положения математического ожидания с вероятностью 0,974. При этом по его данным удастся надежно определять момент, когда синтезированный предсказатель начинает ошибаться. *Выводы.* Рассматриваемый в статье предсказатель является самым простым, предположительно более сложные предсказатели будут сложнее настраиваться, однако и выигрыш от их использования будет выше. Видимо, более сложные предсказатели будут строиться, опираясь на использование искусственных нейронных сетей достаточно долго обучаемых, учитывать исходную априорную информацию на большом исходном статистическом материале. Поставлена задача перехода от простейшего предсказателя к синтезу более сложных нейросетевых предсказателей.

A b s t r a c t. *Background.* The aim of the paper is to estimate the gain from using the simplest oracle, predicting the interval of uncertainty in calculating the mathematical expectation on small test samples. *Materials and methods.* The algorithm for calculating the mathematical expectation has long been known and gives significant errors on small samples. This is a consequence of the fact that the classical computational algorithm does not take into account a priori information about the form of the distribution law for the values of the test sample, the size of the test sample, the mutual relationship of the experimental position in the test sample. Taking into account all these additional information parameters leads to a significant narrowing of the

prediction of the interval of the possible position of the calculated mathematical expectation.

Results. It is shown that the simplest oracle constructed on the basis of the above a priori information gives a narrower range of the possible position of the mathematical expectation with a probability of 0.974. At the same time, according to his data, it is possible to determine reliably the moment when the synthesized predictor begins to err. **Conclusions.** The predictor considered in this article is the simplest, presumably more complex predictors will be more difficult to customize, however, the gain from their use will be higher. Apparently, more complex predictors will be built on the basis of the use of artificial neural networks long enough for trainees to take into account the original a priori information on a large initial statistical material. The problem of transition from the simplest predictor to the synthesis of more complex neural network predictors is set.

К л ю ч е в ы е с л о в а: статистический анализ малых выборок, предсказание интервала ошибок вычисления математического ожидания, искусственные нейронные сети.

Key words: statistical analysis of small samples, prediction of the error interval for calculating mathematical expectation, artificial neural networks.

Общие положения обработки биометрических данных

В настоящее время активно идут процессы информатизации современного общества. При этом для защиты интернет-каналов и облачных сервисов активно используется криптография. К сожалению, человек не способен запомнить свои личные криптографические ключи и длинные пароли доступа. В связи с этим в России и за рубежом разрабатываются технологии преобразования биометрии в код криптографического ключа. За рубежом разрабатывается технология так называемых «нечетких экстракторов» [1–4]. В России развивается иной подход к решению задачи биометрической аутентификации, он построен на использовании нейросетевых преобразователей биометрия-код [5–7]. Структурные схемы реализации этих двух технологий представлены на рис. 1.

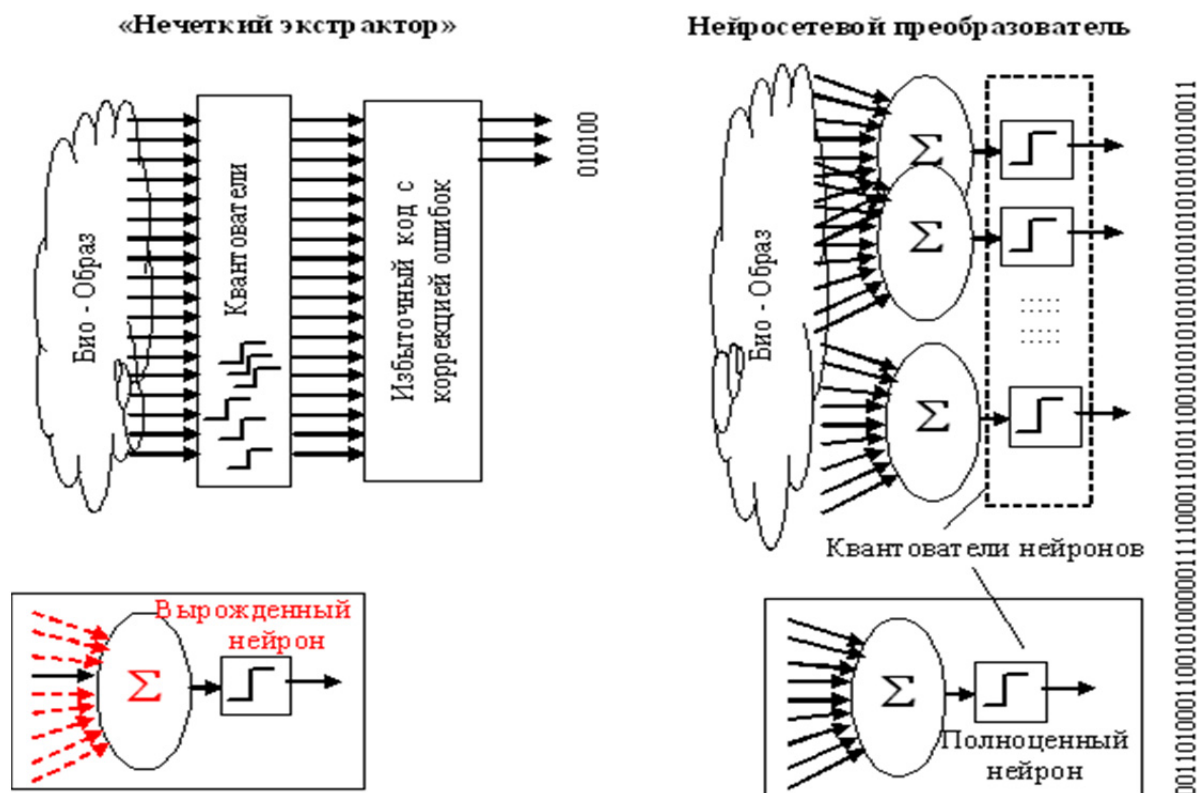


Рис. 1. Две конкурирующие между собой технологии обработки биометрических данных с использованием «нечетких экстракторов» и нейросетевых преобразователей

Все «нечеткие экстракторы» строятся на основе квантования контролируемых биометрических параметров. К сожалению, «плохих» биометрических параметров всегда оказывается больше, чем «хороших». По этой причине выходной код «нечеткого экстрактора» может иметь до 30 % ошибок. Для коррекции этих ошибок используют избыточный код, способный обнаруживать и корректировать ошибки. Обычно используются коды с 20-кратной избыточностью, что приводит к 20-кратному снижению длины скорректированного кода.

Нейросетевые преобразователи биометрия-код строятся иначе. Они осуществляют обогащение «плохих» биометрических параметров сумматорами нейронов, заранее обученной искусственной нейронной сети. Уже после обогащения суммарные биометрические параметры квантуются. При этом выходной код нейросетевых преобразователей оказывается много длиннее, чем выходной код «нечетких экстракторов».

«Нечеткие экстракторы» практически по всем показателям уступают нейросетевым преобразователям, так как они являются их частным случаем. В нижней левой части рис. 1 приведен вырожденный нейрон с вырожденным сумматором, имеющим всего один вход. В нижней правой части рисунка приведен полноценный нейрон с сумматором, имеющим несколько входов.

Единственным преимуществом «нечетких экстракторов» является то, что они способны обучаться всего на одном примере образа «Свой». Для обучения нейронных сетей нужно несколько примеров. В связи с этим возникает задача снижения объема обучающей выборки без потери качества обучения искусственной нейронной сети.

Вычисление математического ожидания на малой выборке примеров биометрического образа

При обучении больших искусственных нейронных сетей преобразователей биометрия-код по ГОСТ Р 52633.5 [8] требуется иметь порядка 20 примеров образа «Свой». Алгоритм обучения ГОСТ Р 52633.5 [8] имеет линейную вычислительную сложность в силу того, что не является итерационным. По этому алгоритму весовые коэффициенты нейронов рассматриваются как функция математического ожидания биометрических параметров – $E(x)$ и их статистических моментов более высокого порядка.

К сожалению, на выборке из 20 примеров вычислить точное значение математического ожидания нельзя:

$$E_{20}(x) = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} x_i = E_{\infty}(x) + \Delta E_{20}(x), \quad (1)$$

где $\Delta E_{20}(x)$ – ошибка, обусловленная малым объемом тестовой выборки.

Очевидно, что с ростом объема тестовой выборки модуль ошибки вычисления по формуле (1) будет падать, однако этот процесс не монотонен. Наблюдается не более чем тенденция снижения ошибки вычисления на фоне значительных колебаний в виде наложенного шума с медленно уменьшающейся амплитудой.

Очевидным является также то, что действительное значение математического ожидания $E_{\infty}(x)$ всегда будет находиться внутри некоторого интервала $\{E_{20}(x) - \Delta L, E_{20}(x) + \Delta R\}$. В связи с этим возникает задача предсказания значений левой и правой границ интервала положения действительного значения математического ожидания.

Простой численный способ предсказания положения симметричных границ в рамках гипотезы нормального закона распределения данных малой выборки

Перед вычислениями осуществим нормирование данных малой выборки:

$$\tilde{x} = \frac{x}{\sigma(x)}, \quad (2)$$

что приводит к выполнению условия $\sigma(\tilde{x}) = 1$.

Если теперь мы зададим $E_{\infty}(x) = 0$ для генератора псевдослучайных данных при выборках 20 примеров, то мы получим множество оценок значений математического ожидания $E_{20}(\tilde{x})$, что дает нам возможность рассчитать для них стандартное отклонение $\sigma(E_{20}(\tilde{x}))$.

Легко убедиться в том, что при такой постановке численного эксперимента значение стандартного отклонения нормированных данных не зависит от заданного изначально математического ожидания – $E_{\infty}(\tilde{x})$. Как результат, мы можем воспользоваться инженерным правилом 3σ и найти значение левой и правой границ интересующего нас интервала:

$$\begin{cases} L_{20} = E_{20}(\tilde{x}) - 3 \cdot \sigma(E_{20}(\tilde{x})) \approx E_{20}(\tilde{x}) - 0,68, \\ R_{20} = E_{20}(\tilde{x}) + 3 \cdot \sigma(E_{20}(\tilde{x})) \approx E_{20}(\tilde{x}) + 0,68. \end{cases} \quad (3)$$

Получается, что с вероятностью 0,997 оцениваемое значение $E_{\infty}(\tilde{x})$ будет находиться в интервале $(R_{20} - L_{20}) = 1,36$ с центром $E_{20}(\tilde{x})$.

Если мы увеличиваем объем выборки до 32 примеров, то стандартное отклонение уменьшается и, соответственно, уменьшается интервал предсказания:

$$\begin{cases} L_{32} = E_{32}(\tilde{x}) - 3 \cdot \sigma(E_{32}(\tilde{x})) \approx E_{32}(\tilde{x}) - 0,53, \\ R_{32} = E_{32}(\tilde{x}) + 3 \cdot \sigma(E_{32}(\tilde{x})) \approx E_{32}(\tilde{x}) + 0,53, \end{cases} \quad (4)$$

где $(R_{32} - L_{32}) = 1,06$.

Эти интервалы избыточны в силу их симметричности относительно вычисленного математического ожидания. В связи с этим может быть создан другой более эффективный оракул, предсказывающий положение значения математического ожидания в меньшем асимметричном интервале.

Синтез оракула, способного предсказывать асимметричные границы возможного положения математического ожидания

Для того чтобы оценить правую и левую границы интервала действительного положения математического ожидания, в работе [9] предложено осуществлять вычисления по меньшим выборкам. В частности, для тестовой выборки из 32 примеров можно вычислить 31 значение частных математических ожиданий $E_{31,i}$, отбрасывая при каждом из вычислений одно значение из исходной выборки.

Формально эти операции записываются следующим образом:

$$E_{31,i}(\tilde{x}) = \left(E_{32}(\tilde{x}) - \frac{\tilde{x}_i}{32} \right) \cdot \frac{32}{31} \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots, 31. \quad (5)$$

В этом случае правая и левая границы интервала находятся следующим образом:

$$L_{32} = \min(E_{31,i}(\tilde{x})), \quad (6)$$

$$R_{32} = \max(E_{31,i}(\tilde{x})). \quad (7)$$

Очевидно, что вычисления (6) и (7) с очень высокой вероятностью дают разный результат. То есть мы получили желаемый асимметричный предсказатель положения правой и левой границ интервала.

Тестирование и настройка асимметричного оракула

Цепочку вычислений асимметричного предсказателя (5)–(7) необходимо протестировать, чтобы определить вероятность получения верных предсказаний. Эту операцию следует выполнять проведением соответствующего численного эксперимента. Например, численный эксперимент может быть выполнен, если программный генератор будет настроен давать данные с нулевым математическим ожиданием $E_{\infty}(x) = 0$. В этом случае асимметричный пред-

сказатель цепочки вычислений (5)–(7) всегда будет давать следующие значения математических ожиданий положения границ:

$$E_{32}(L_{32}) < 0, \quad (8)$$

$$E_{32}(R_{32}) > 0. \quad (9)$$

Когда выполняется условие $(L_{32} > 0 \vee R_{32} < 0)$, исследуемый асимметричный предсказатель ошибается. То есть при численном эксперименте нам нужно оценить вероятность появления одного из частей условия $(L_{32} > 0 \vee R_{32} < 0)$.

Численный эксперимент показал, что оракул, вычисляющий данные по формулам (5)–(7), верно угадывает интервал возможных ошибок с вероятностью 0,697 и ошибается с вероятностью 0,307.

Для того чтобы поднять вероятность верных предсказаний до величины 0,997, необходимо увеличить влияние отбрасываемых компонент:

$$E_{31,i}(\tilde{x}) = E_{32}(\tilde{x}) - \alpha \cdot \tilde{x}_i \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots, 31, \quad (10)$$

где $\alpha = 0,2101 > 1/32$.

Для рассмотренной схемы предсказания приходится увеличивать в 6,7 раза влияние отбрасываемых компонент. Только в этом случае удастся получать сопоставимые по достоверности результаты предсказания симметричного (4) и асимметричного оракула (10), (6), (7).

Оценка выигрыша от перехода к асимметричному оракулу

Если вычислить ширину интервала предсказания $(R_{32} - L_{32})$ для асимметричного предсказателя 100 000 раз, то мы получим математическое ожидание $E(R_{32} - L_{32}) = 0,874$ и стандартное отклонение $\sigma(R_{32} - L_{32}) = 0,096$. Эта ситуация отображена на рис. 2.

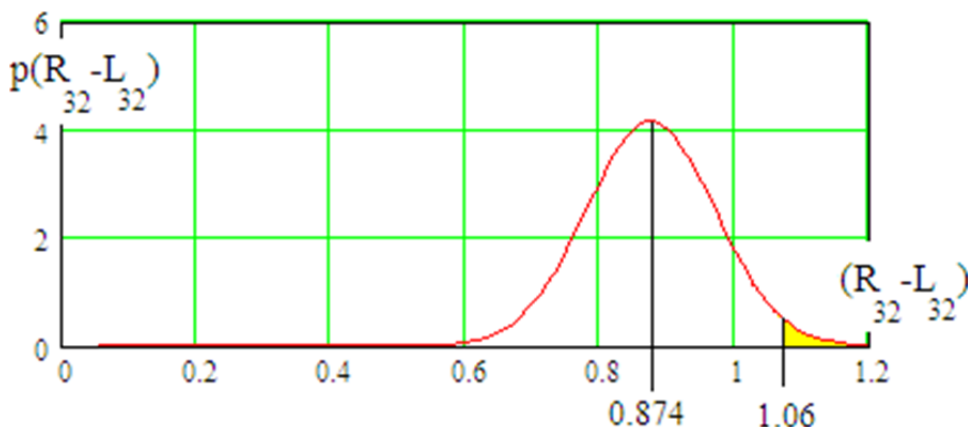


Рис. 2. Распределение ширины асимметричных интервалов предсказания

Из рис. 1 видно, что с наибольшей вероятностью ширина интервала предсказания сузится на 21,4 % ($1,06/0,874 = 1,214$). Очень редко, но будут возникать самые узкие интервалы предсказания с шириной 0,59, что соответствует сжатию на 79,7 %.

Асимметричный предсказатель с вероятностью 0,974 лучше работает, чем симметричный, однако если он дает интервал более 1,06, то он ошибается. Эти ошибочные данные не следует учитывать. В итоге мы получаем работоспособную комбинацию симметричного (4) и асимметричного (9) предсказателей. Их комбинация существенно сужает интервал возможного положения действительного значения математического ожидания малой тестовой выборки.

Эффект сужения интервала возможных ошибок при вычислении математического ожидания на 21,4 % иллюстрирует рис. 3.

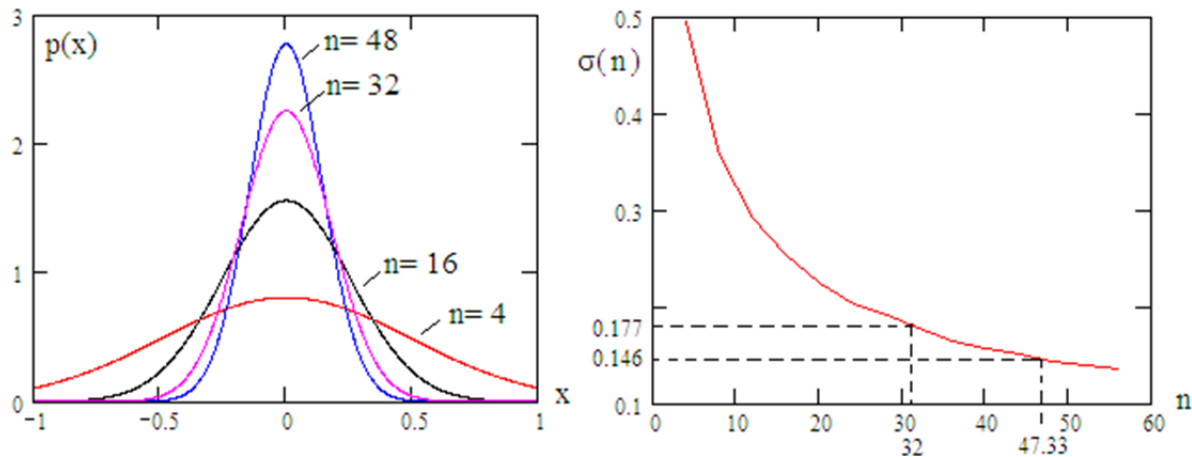


Рис. 3. Снижение стандартного отклонения от величины 0,177 до величины 0,146 эквивалентно увеличению объема выборки с 32 до 47 опытов

В левой части рис. 3 даны плотности распределения значений ошибок для данных с нулевым математическим ожиданием и единичным стандартным отклонением при разных объемах тестовой выборки. В правой части рис. 3 дана связь стандартного отклонения ошибок вычисления с размером тестовой выборки. Из правой части рис. 3 видно, что при выборке в 32 опыта стандартное отклонение ошибок составляет 0,177. Сужение интервала предсказания положения математического ожидания на 21,4 % приводит к снижению стандартного отклонения до величины 0,146. Это эквивалентно увеличению тестовой выборки с 32 до 47 опытов. Наблюдается эффект мнимого увеличения тестовой выборки на 15 опытов за счет того, что мы дополнительно учитываем априорную информацию о нормальном законе распределения значений исходных данных, о размере выборки в 32 опыта и о наблюдаемой в выборке асимметрии расположения данных относительно друг друга.

Получается, что при предварительной статистической обработке биометрических данных малых выборок удастся существенно повысить точность вычислений математического ожидания в дополнение к повышению точности вычисления стандартных отклонений [10] и коэффициентов корреляции [11].

Заключение

Качество предсказаний оракула должно расти по мере того, как он учитывает все больше и больше влияющих факторов. Симметричный оракул хуже асимметричного в силу того, что учитывает только нормальный закон распределения значений. Асимметричный оракул стал лучше работать из-за того, что он дополнительно учитывает, как расположены опыты выборки по отношению друг к другу.

В данной статье рассмотрен простейший оракул, осуществляющий вычисления линейной сложности над частными подвыборками, полученными отбрасыванием одного опыта. Мы рассмотрели линейный оракул, который учитывал $C_{32}^1 = 32 \approx (32-1)^1/1! = 31$ возможных состояний.

Если мы построим оракула, изымающего из полной выборки все возможные пары опытов, то будем вынуждены анализировать $C_{32}^2 = 496 \approx (32-2)^2/2! = 450$ возможных состояний. Реализация такого оракула будет иметь квадратичную вычислительную сложность.

По мере увеличения числа опытов, удаляемых из выборки, экспоненциально растет сложность вычислений $C_{32}^k \approx (32-k)^k/k!$. Попытки увеличить точность предсказаний всегда будут приводить к почти экспоненциальному росту потребляемых оракулом вычислительных ресурсов.

Возникает новая возможность, которой ранее не было. Мы можем обменять вычислительные ресурсы на число опытов в выборке. Это важно для медицины, фармакологии, биометрии и экономики. Для ряда практических приложений увеличить тестовую выборку оказывается технически затруднительно (нет достаточного числа больных редким заболеванием, слишком

дорого расширять выборку людей, испытывающих на себе новый фармакологический препарат, мало примеров биометрического образа «Свой» для обучения нейронной сети [1], нет достаточного числа однотипных по экономическим показателям предприятий). В этой ситуации следует привлекать для уточнения результатов вычисления математических ожиданий большие вычислительные ресурсы, реализуя оракулов приемлемой вычислительной сложности, потребляющих приемлемые вычислительные ресурсы в течение приемлемого интервала времени. Сегодня есть возможность аренды облачных серверов для реализации высокопроизводительных вычислений, и, соответственно, появляется возможность дополнительного маневра.

Кроме того, следует отметить, что по мере усложнения оракулов, экспоненциально растет объем их программного обеспечения, объем работ по их отладке (настройке) и их поддержке. Видимо, должны появиться специализированные фирмы-посредники, задачей которых будет являться квалифицированная программная поддержка высокоразмерных оракулов, ориентированных на разные прикладные задачи.

Библиографический список

1. Dodis, Y. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy / Y. Dodis, L. Reyzin, A. Smith // Proc. EUROCRYPT. – 2004. – April 13. – P. 523–540.
2. Monrose, F. Cryptographic key generation from voice / F. Monrose, M. Reiter, Q. Li, S. Wetzel // Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy. – 2001. – P. 202–213.
3. Ramírez-Ruiz, J. Cryptographic Keys Generation Using FingerCodes / J. Ramírez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA 2006 (LNCS 4140). – 2006. – P. 178–187.
4. Hao, F. Crypto with Biometrics Effectively / F. Hao, R. Anderson, J. Daugman // IEEE Transactions on Computers. – 2006. – Vol. 55, № 9. – P. 1073–1074.
5. Волчихин, В. И. Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : моногр. / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 273 с.
6. Малыгин, А. Ю. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
7. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров. – М. : Радиотехника, 2012. – 157 с.
8. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – М., 2011.
9. Иванова, Н. А. Синтез предсказателя, оценивающего ошибку вычисления математического ожидания для выборки из 32 примеров биометрического образа / Н. А. Иванова, Ю. И. Серикова // Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. – Пенза, 2016. – Т. 10. – С. 19–20. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BIT/T10-p19.pdf>
10. Волчихин, В. И. Использование эффектов квантовой суперпозиции при регуляризации вычислений стандартного отклонения на малых выборках биометрических данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Сериков, Ю. И. Серикова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 58–64.
11. Волчихин, В. И. Фрактально-корреляционный функционал, используемый при поиске пар слабо зависимых биометрических данных в малых выборках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 25–31.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vvi@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
President of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иванова Надежда Александровна

аналитик,

ООО «БиоКрипт»

(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Ivanova Nadezhda Alexandrovna

an analyst,

BioCrypt LLC

(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Серикова Юлия Игоревна

магистрант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: julia-ska@yandex.ru

Serikova Julia Igorevna

graduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Банных Андрей Григорьевич

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ibst@pgzgu.ru

Bannykh Andrey Grigoryevich

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 519.24; 53; 57.017

Волчихин, В. И.

Синтез и тестирование оракула, способного предсказывать асимметричные границы интервала действительного положения математического ожидания малых выборок биометрических данных / В. И. Волчихин, Н. А. Иванова, Ю. И. Серикова, А. Г. Банных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 32–39.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.3.032

В. С. Волков, Е. А. Рыблова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

V. S. Volkov, E. A. Ryblova

THE STUDY OF DOPANT CONCENTRATION INFLUENCE ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF GAGE FACTOR FOR SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование зависимости коэффициента тензочувствительности тензорезисторов p -типа от температуры и уровня легирования, а также определение оптимального значения концентрации легирующей примеси для обеспечения минимальной температурной зависимости тензочувствительности. **Материалы и методы.** Проведено аналитическое и графическое моделирование влияния температуры и концентрации примеси на коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов p -типа. **Результаты.** Показано, что полупроводниковые тензорезистивные датчики давления имеют значительную температурную погрешность, которая зависит от уровня концентрации примеси в полупроводнике. В ходе исследования графически было определено оптимальное значение уровня легирования, при котором температурная погрешность минимальна. Для найденного значения концентрации примеси были рассчитаны значения сопротивлений тензорезисторов, выходной сигнал мостовой схемы и температурная погрешность тензочувствительности. **Выводы.** Аналитические и графические зависимости, полученные в результате исследования, могут быть использованы для определения оптимальной концентрации легирующей примеси по критериям минимальной температурной погрешности и максимальной чувствительности аналитическим методом.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is study of temperature and dopant dependence of gage factor for the p -type strain gages, as well as the determination of the dopant concentration optimal values to ensure a minimum temperature dependence of the gage factor. **Materials and methods.** The analytical and graphical simulation of influence temperature and dopant concentration on the gage factor of p -type semiconductor strain gauges was completed. **Results.** It has been shown that semiconductor strain gage pressure sensors have significant

temperature error, which depends on the dopant concentration in the semiconductor. During the study was graphically determined optimum value of the doping level at which the temperature error is minimal. Using optimal the concentrations of impurities were calculated values of strain gauges resistance, the output signal of the bridge circuit and the temperature error of gage factor. **Conclusions.** Analytical and graphical dependences obtained in this research can be used to determine the optimal concentration of dopant to provide the minimum temperature error and maximum sensitivity by the analytical method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, коэффициент тензочувствительности, аналитическое моделирование, концентрация примеси, температурная погрешность.

Key words: semiconductor piezoresistive pressure sensor, gage factor, analytical simulation, dopant concentration, temperature error.

Одним из самых распространенных типов чувствительных элементов для датчиков давления являются чувствительные элементы на базе полупроводниковых технологий, построенные на основе тензорезистивного эффекта. Это объясняется тем, что в большинстве случаев требуется одновременно обеспечить выполнение требований по нескольким параметрам датчиков точности, стабильности выходных характеристик, надежности, долговечности, низкой цене. Наиболее полно таким требованиям, по сравнению с чувствительными элементами, основанными на других принципах преобразования, удовлетворяют датчики, содержащие размещенную на упругом элементе мостовую измерительную схему, состоящую из кремниевых тензорезисторов, легированных примесью p -типа (бором) [1–6].

Они характеризуются значительной дополнительной температурной погрешностью выходного сигнала, которая является следствием зависимости коэффициента тензочувствительности от температуры [1, 4–6]. По этой причине актуальной является задача исследования механизма влияния температуры на параметры тензорезисторов, определяющие характеристики чувствительного элемента и датчика в целом [7, 8].

Целью статьи является исследование модели зависимости коэффициента тензочувствительности тензорезисторов p -типа от температуры и концентрации примеси для определения значений концентрации примеси, позволяющей обеспечить минимальную температурную зависимость тензочувствительности.

Влияние температуры и уровня легирования на тензосопротивление монокристалла кремния характеризует модель Канда, которая описывает зависимость коэффициента тензочувствительности для полупроводников p -типа от температуры при различных значениях концентрации легирующей примеси [9].

В соответствии с моделью Канда коэффициент тензочувствительности монокристаллического кремния выражается зависимостью

$$\pi(N, T) = \pi(N_0, 300 \cdot K) \cdot P(N, T), \quad (1)$$

где $\pi(N, 300 \text{ K})$ – тензорезистивный коэффициент для слаболегированного кремния при нормальной температуре 300 K; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ; T – абсолютная температура, K; K – постоянная Больцмана. Для определения влияния концентрации легирующей примеси на характеристики тензорезисторов и мостовой схемы в целом проведем компьютерное имитационное моделирование температурной зависимости выходного сигнала от концентрации примеси и температуры [8, 10].

Определение коэффициента тензочувствительности как функции примеси и температуры производится в следующей последовательности:

1. Определяется безразмерная величина

$$\varepsilon(N, T) = \frac{N}{N_S(T)}, \quad (2)$$

где N – текущий уровень легирования в кремнии, см^{-3} ; N_s – поправочный коэффициент, учитывающий температурную зависимость концентрации, который рассчитывается по следующей формуле:

$$N_s(T) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{0,59}{300} T \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

2. Для определения уровня Ферми используется упрощенная аппроксимация Джойса – Диксона:

$$\eta_f(N, T) = \ln(\epsilon(N, T)) + \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \epsilon(N, T). \quad (4)$$

3. Главный тензорезистивный коэффициент как функция температуры эксплуатации и концентрации бора определяется по формуле

$$P(N, T) = \frac{300}{T} \cdot \frac{1}{(1 + \exp(-\eta_f(N, T))) \cdot (\ln(1 + \exp(\eta_f(N, T))))}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от концентрации примеси при различных значениях температуры для кремния p -типа [9].

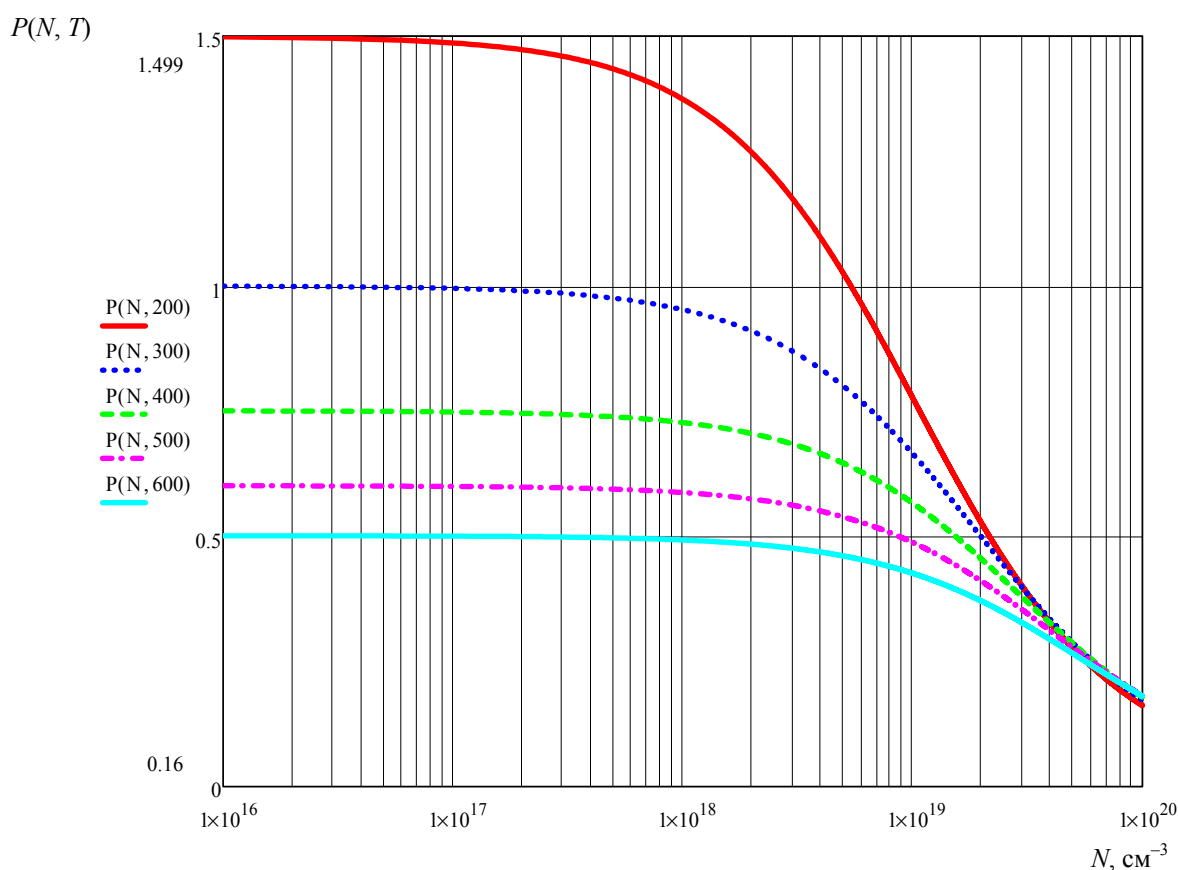


Рис. 1. Зависимость тензорезистивного коэффициента от концентрации легирующей примеси

На основе выражений (1)–(5) была построена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от температуры при различных значениях концентрации легирующей примеси N . Этот коэффициент уменьшается с увеличением температуры и увеличением концентрации примеси.

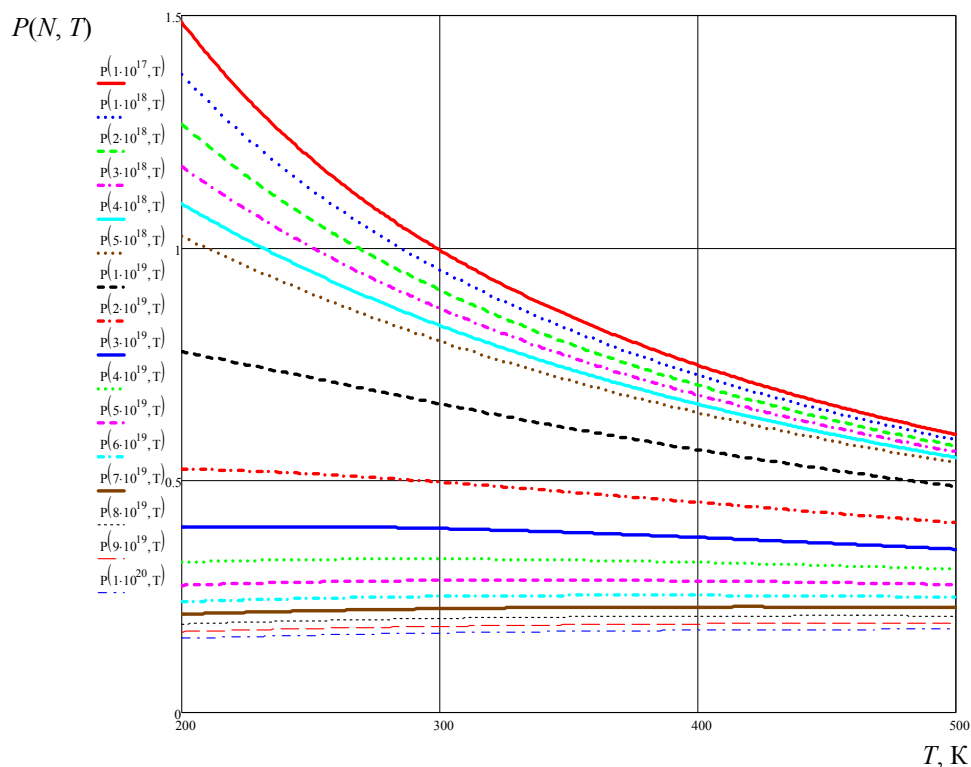


Рис. 2. Зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры

Из графика видно, что при концентрации примеси, начиная со значения $N = 1 \cdot 10^{19}$, температурная зависимость коэффициента тензочувствительности существенно уменьшается. Для большей наглядности была построена зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры при концентрациях примеси начиная с $1 \cdot 10^{19}$ до $1 \cdot 10^{20}$ (рис. 3).

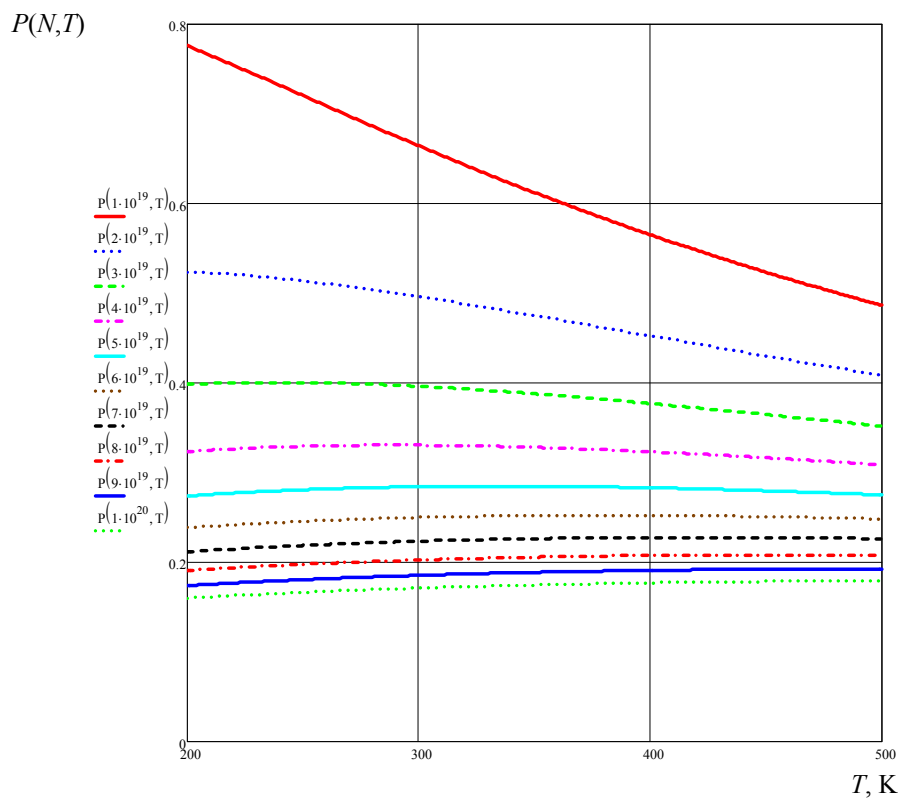


Рис. 3. Зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры в диапазоне концентраций примеси от $1 \cdot 10^{19}$ до $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Из рис. 3 видно, что наименьшая температурная зависимость соответствует концентрации примеси $\approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Следует отметить, что увеличение уровня легирования ухудшает тензочувствительность.

Для расчета выходного сигнала мостовой схемы принимаем следующие значения: номинальное значение сопротивления тензорезисторов $R_0 = 1000 \text{ Ом}$, тензорезистивный коэффициент принимаем равным $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11}$. Значение концентрации примеси примем $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Напряжение питания $U_0 = 1 \text{ В}$, ток питания $I_0 = 1 \text{ мА}$.

Расчет выходного сигнала проведем в следующей последовательности:

1. Определяется подвижность носителей заряда:

$$\mu = 54,3 \cdot T_N^{-0,57} + \frac{1,36 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,23}}{1 + \left[\frac{N}{2,35 \cdot 10^{17} \cdot T_N^{24}} \right] \cdot 0,88 \cdot T_N^{-0,146}}, \quad (6)$$

где T – температура, К; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

2. Рассчитывается удельное сопротивление тензорезистора:

$$\rho = \frac{1}{q \cdot \mu(N, T) \cdot N}, \quad (7)$$

где q – элементарный заряд, Кл; μ – подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

3. Рассчитывается температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\alpha(N) = \frac{\rho(N, 500) - \rho(N, 200)}{(500 - 200) \cdot \rho(N, 293)}, \quad (8)$$

где ρ – удельное сопротивление тензорезистора, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

4. Для каждого из тензорезисторов определяется сопротивление как функция от температуры:

$$R1(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (9)$$

$$R2(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 - \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (10)$$

$$R3(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (11)$$

$$R4(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 - \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (12)$$

где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении, для значения деформации $\varepsilon = 10^{-3}$ напряжение $\sigma = 129,8 \text{ МПа}$; T – температура, К; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ; α – температурный коэффициент выходного сопротивления моста, К^{-1} ; π_{44} – коэффициент тензосопротивления.

5. Определяется значение выходного сопротивления мостовой схемы:

$$R_m(T) = \frac{(R1(T) + R2(T)) \cdot (R3(T) + R4(T))}{R1(T) + R2(T) + R3(T) + R4(T)}. \quad (13)$$

Выходное напряжение мостовой схемы рассчитываем для двух случаев:

– при питании током:

$$U_{\text{вых}}(T) = I_0 \cdot \frac{R1(T) \cdot R4(T) - R2(T) \cdot R3(T)}{R1(T) + R2(T) + R3(T) + R4(T)}, \quad (14)$$

– при питании напряжением:

$$U_{\text{вых}}(T) = U_0 \cdot \frac{R1(T) \cdot R4(T) - R2(T) \cdot R3(T)}{(R1(T) + R2(T)) \cdot (R3(T) + R4(T))}. \quad (15)$$

6. Для обоих случаев строятся графики зависимости выходного сигнала от температуры (рис. 4, 5).

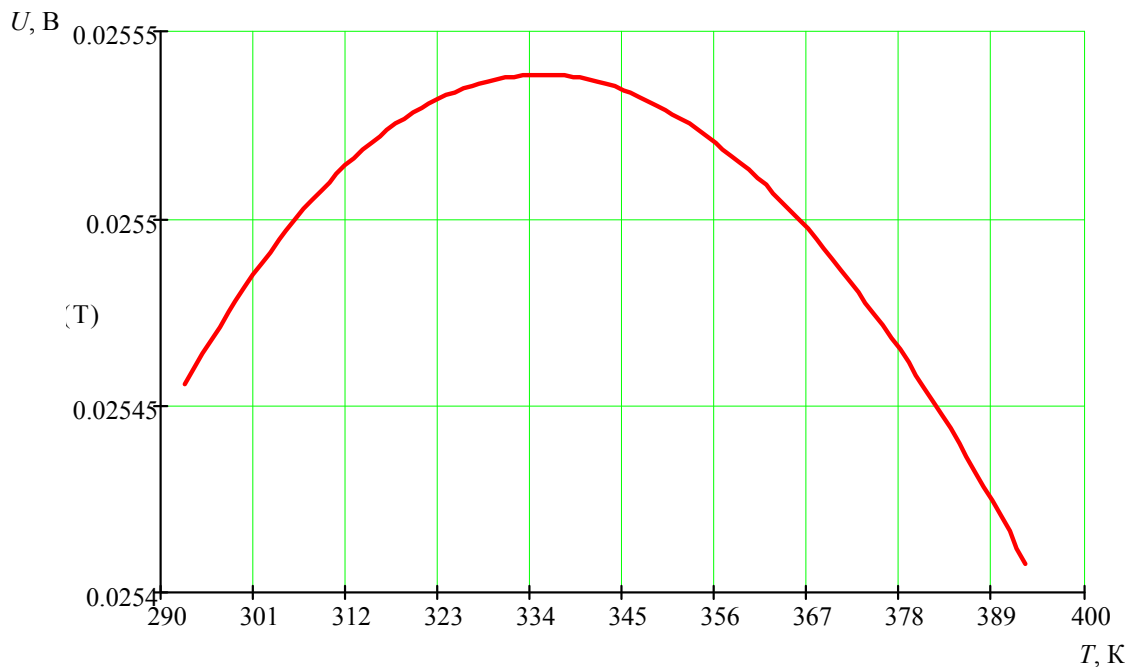


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения мостовой схемы от температуры при питании напряжением

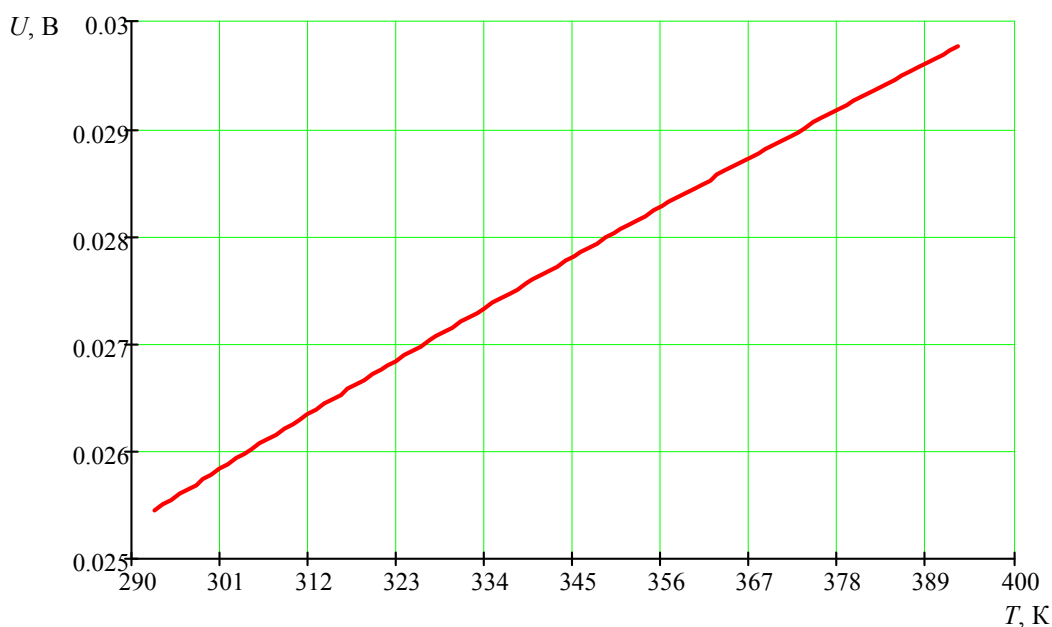


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения мостовой схемы от температуры при питании током

7. Рассчитывается температурный коэффициент ухода чувствительности:

$$\alpha_s = \frac{U_{\max(T_{\max})} - U_{\max(T_{\min})}}{U_{\max(T_0)} \cdot \Delta T} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где $U_{\max(T_{\max})}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и максимальной температуре, B ; $U_{\max(T_{\min})}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и минимальной температуре, B ; $U_{\max(T_0)}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и номинальной температуре, B ; ΔT – разность температур, К.

Числовое значение температурного коэффициента ухода чувствительности при питании напряжением $\alpha_s = -1,892 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/^\circ\text{C}$, при питании током $\alpha_s = 0,169 \cdot \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

В ходе исследования приближенно было найдено графическим способом значение концентрации легирующей примеси, при котором температурная зависимость коэффициента тензочувствительности является минимальной, также были рассчитаны значения сопротивлений тензорезисторов, выходной сигнал мостовой и температурный коэффициент ухода чувствительности схемы при питании током и напряжением. Результаты моделирования показали, что при заданных номиналах тензорезисторов и параметрах питания при одинаковой чувствительности схема, питаемая напряжением, характеризуется на два порядка меньшей температурной погрешностью тензочувствительности, чем схема, питаемая напряжением.

Дальнейшей задачей исследования является определение оптимальной концентрации легирующей примеси по критериям минимальной температурной погрешности и максимальной чувствительности аналитическим методом.

Библиографический список

1. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
4. Баринов, И. Н. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин, И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 24–27.
5. Баринов, И. Н. Оптимизация чувствительного элемента датчика давления с поликремниевыми тензорезисторами / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
6. Баринов, И. Н. Обеспечение долговременной стабильности параметров высокотемпературных полупроводниковых тензорезистивных датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2012. – № 9. – С. 29–35.
7. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
8. Волков, В. С. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 50–54.
9. Kanda, Y. A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon / Y. Kanda // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1982. – ED-29. – P. 64–70.
10. Фандеев, В. П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов : учеб. пособие / В. П. Фандеев, В. С. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkov Vadim Sergeevich

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

Рыблова Елизавета Анатольевна

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: distorsion@rambler.ru

Ryblova Elizaveta Anatol'evna

student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.3.032

Волков, В. С.

Исследование влияния концентрации легирующей примеси на температурную зависимость тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 40–47.

УДК 621.391.812.7

П. Г. Андреев, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЙ¹

P. G. Andreev, A. K. Grishko, I. I. Kochegarov

DETERMINATION OF THE ELECTRIC TENSION COMPOSITION OF ELECTROMAGNETIC FIELD WITH ACCOUNT OF REFLECTIONS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Решается задача определения напряженности электрической составляющей электромагнитного поля с учетом отражений. Целью работы является разработка способа, используемого в рамках метода геометрической оптики, на основе свойств элементов Гюйгенса с учетом сложной формы отражающей поверхности объектов. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используется метод геометрической оптики в его приложении для случая, когда длина электромагнитной волны сравнима с размерами поверхности ее отражения. Для представления сложной формы отражающей поверхности объектов используется метод декомпозиции, где каждый участок разбиения имеет свойства элементарных электрических диполей Герца. *Результаты и выводы.* В результате предложен подход к определению напряженности электрической составляющей электромагнитного поля с учетом отражений в рамках метода геометрической оптики, на основе свойств элементов Гюйгенса, с учетом сложной формы отражающей поверхности объектов. Получены расчетные выражения для основных плоскостей декартовой системы координат. Разработан способ, позволяющий определить напряженность электрической составляющей электромагнитного поля как результат отражения с учетом амплитуд и фаз от каждого элементарного участка поверхности сложной формы. Предложенный способ позволит уменьшить погрешности в результате расчетов, а следовательно, повысить качество проектных решений при разработке радиоэлектронных средств различного назначения.

A b s t r a c t. The problem of determining electric component of electromagnetic field taking into account reflections. The aim of this work is to provide a method used in the framework of geometrical optics, based on the properties of the elements of Huygens, given the complex shape of the reflecting surface of objects. To solve this problem we use the method of geometrical optics in its application for the case when the length of the electromagnetic wave is comparable with the size of the surface reflection. To represent complex shape of the reflecting surface of objects using a decomposition method, where each phase partitioning has the properties of elementary electric dipoles Hertz. Consequently, the proposed approach to the determination of the strength of the electric component of an electromagnetic field with account of reflections

¹ Статья написана в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ» № 8.389.2014/К по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

in the framework of geometrical optics, based on the properties of the elements of Huygens, given the complex shape of the reflecting surface of objects. The calculated expressions for the main planes of the Cartesian coordinate system. A method was developed to determine the strength of the electric component of an electromagnetic field as a result of a reflection taking into account amplitudes and phases from each elementary portion of the surface of complex shape. The proposed method will reduce errors in calculation results, and therefore increase the quality of design solutions in the development of radioelectronic means of different purposes.

К л ю ч е в ы е с л о в а: напряженность электрической составляющей электромагнитного поля, поверхность отражения, метод геометрической оптики, элемент Гюйгенса.

К e y w o r d s: the strength of the electric component of an electromagnetic field, the surface reflection, the method of geometrical optics, element Huygens.

Введение

Определение напряженности электрической составляющей электромагнитного поля с учетом отражений является сложной актуальной задачей [1, 2], решение которой позволит повысить качество проектных решений при разработке радиоэлектронных средств различного назначения. А информационное обеспечение процесса проектирования радиоэлектронных средств, наряду с пространственно-параметрическим синтезом, составляет основу их конкурентоспособности [3–5].

Одним из существующих широко используемых при решении практических задач методов определения напряженности электрической составляющей электромагнитного поля является метод геометрической оптики. Однако в ряде случаев, когда длина электромагнитной волны сравнима с размерами поверхности ее отражения, применение классического метода геометрической оптики вносит недопустимые погрешности в результаты расчетов. Это возможно вследствие амплитудных и фазовых искажений, вызванных фактом переотражения электромагнитной волны, а также свойствами отражающей поверхности.

Очевидно, что поверхность объектов сложной формы, от которых отражается электромагнитная волна, может быть представлена с определенной степенью достоверности, в виде набора поверхностей простой формы, например прямоугольной. Причем их количество ограничивается требуемой точностью вычислений, с одной стороны, и наличием вычислительных машинных ресурсов, с другой стороны.

Декомпозиция поверхности отражения электромагнитных волн

При этом каждая прямоугольная поверхность отражения электромагнитных волн при использовании метода геометрической оптики представляется в виде набора элементарных излучателей, например элементарных электрических диполей Герца. В этом случае вектор напряженности электрической составляющей электромагнитного поля будет равен геометрической сумме всех векторов напряженности полей от излучателей с учетом их амплитуд и фаз. Тогда амплитуда напряженности поля в точке пространства, достаточно удаленной от поверхности как результат суперпозиции идентичных излучателей, будет одинаковой ориентации в пространстве и может быть найдена по выражению

$$\vec{E} = \sum_{N=1}^n \vec{E}_{mN} . \quad (1)$$

Здесь $\vec{E}_{mN}$ – напряженность электрического поля как результат переотражения электромагнитных волн, пришедших от передатчика, создаваемая одиночным элементарным излучателем в рассматриваемой точке пространства.

С учетом граничных условий Шукина – Леонтовича и условий на границе идеального проводника напряженность от одиночного излучателя может быть определена по выражению

$$\dot{E}_{mN} = \frac{60k\dot{I}_{mN}h_N}{r_N} F_N(\varphi, \theta) j e^{-jkr_N}, \quad (2)$$

где $F_N(\varphi, \theta)$ – функция зависимости напряженности электромагнитного поля от азимутально-го φ и меридионального θ углов в сферической системе координат; $\dot{I}_{mN}h_N$ – момент тока одиночного излучателя; k – волновое число; $\dot{I}_{mN}$ – комплексная амплитуда тока на поверхности одиночного излучателя; h_N – линейный размер одиночного излучателя; r_N – расстояние до центра одиночного излучателя от рассматриваемой точки пространства.

Используя выражения (1) и (2) отдельно для вертикальной и горизонтальной плоскостей, учитывая поляризацию электромагнитных волн, получим нормированные функции в двух главных плоскостях:

$$\dot{E}_x = \frac{1}{n} \sum_{N=1}^n \frac{60k\dot{I}_{mNx}h_{Nx}}{r_{Nx}} F_N(\theta') j e^{-jkr_{Nx}}, \quad (3)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{n} \sum_{N=1}^n \frac{60k\dot{I}_{mNy}h_{Ny}}{r_{Ny}} F_N(\varphi') j e^{-jkr_{Ny}}, \quad (4)$$

где $F_N(\varphi')$ и $F_N(\theta')$ – функции угловой зависимости напряженности электрического поля в двух главных плоскостях декартовой системы координат.

Представление поверхности отражения электромагнитных волн в виде набора элементарных электрических диполей Герца

Пусть прямоугольная поверхность отражения электромагнитных волн длиной L_x и шириной L_y представлена в виде набора элементарных диполей Герца согласно рис. 1, где dx , dy – соответственно длина и ширина диполя; x_{0i} , y_{0j} – координаты середины диполя в глобальной системе координат; θ'' – угол между плоскостью диполя и радиусом-вектором рассматриваемой точки пространства P в сферической системе координат; θ – угол между нормалью к плоскости диполя и радиусом-вектором рассматриваемой точки пространства P в сферической системе координат; θ' , φ' – углы двух главных плоскостей (соответственно вертикальной и горизонтальной) декартовой системы координат.

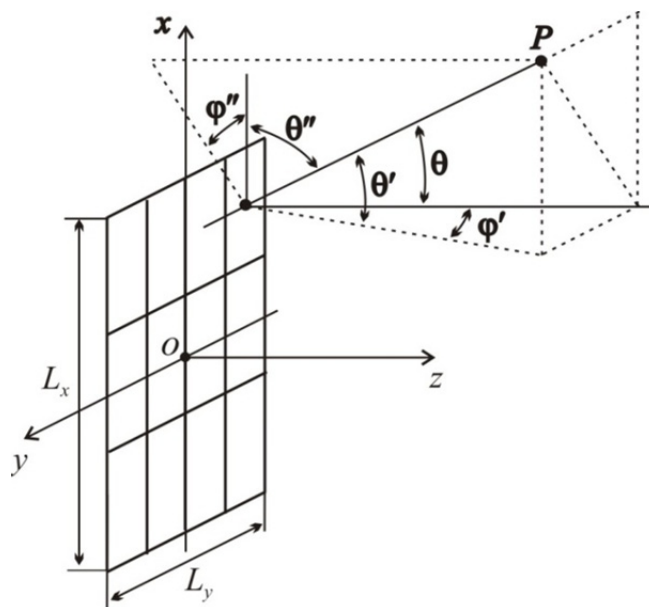


Рис. 1. Представление поверхности отражения в виде набора электрических диполей Герца

Так как элементарный электрический диполь представляет собой прямолинейный тонкий проводник длиной, много меньшей, чем длина волны, то наиболее удобно будет сначала сложить диполи по оси Ox , получив достаточно тонкие линейные переизлучатели одинаковой длины L_x . А после этого просуммировать поле каждого линейного переизлучателя по оси Oy , с учетом его поляризации, амплитуды и фазы, получив, таким образом, полное поле, созданное поверхностью отражения размерами L_x , L_y в рассматриваемой точке пространства P .

Тогда согласно предложенной методике в выражении (3), (4) в качестве $F_N(\varphi')$ и $F_N(\theta')$ используем функции угловой зависимости напряженности электрического поля от n элементарных источников – элементарных электрических диполей Герца. Каждый такой источник – это прямолинейный тонкий проводник длиной dz . Когда параметр dz много меньше длины электромагнитной волны λ , что достигается степенью разбиения прямоугольной поверхности отражения электромагнитных волн, тогда можно полагать, что вдоль dz фаза и амплитуда тока будут постоянными. В этом случае для каждого элементарного диполя Герца справедливы следующие условия [6, 7]:

$$dz \ll \lambda, \quad (5)$$

$$dx, dy \ll dz. \quad (6)$$

В случае, когда размеры диполя сопоставимы с расстоянием до рассматриваемой точки пространства в однородной неограниченной среде без потерь, составляющие комплексных амплитуд напряженности поля в данной точке могут быть найдены по выражениям [7–9]:

$$dE_\theta = \frac{Z_b k^2 I dz}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - \frac{j}{(kr)^2} - \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin \theta'' e^{-jkr}, \quad (7)$$

$$dE_r = \frac{Z_b k^2 I dz}{2\pi} \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] \cos \theta'' e^{-jkr}, \quad (8)$$

$$dH_\phi = \frac{k^2 I dz}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - \frac{j}{(kr)^2} \right] \sin \theta'' e^{-jkr}, \quad (9)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0. \quad (10)$$

Здесь dH_ϕ – азимутальная составляющая напряженности магнитного поля; dE_r , dE_θ – радиальная и меридиональная составляющие напряженности электрического поля; I – комплексная амплитуда тока диполя; $I dz$ – момент тока диполя; Z_b – волновое сопротивление среды распространения электромагнитной волны.

Известно, что в дальней зоне излучения электромагнитных волн преобладают совпадающие по фазе составляющие векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ [7–9], меняющиеся пропорционально $1/r$. В зависимости от исходных данных при решении некоторых практических задач в выражениях (7)–(9) можно пренебречь членами, пропорциональными $1/r^2$, $1/r^3$. В этом случае меридиональная и азимутальная составляющие электромагнитного поля будут основными и находиться по выражениям:

$$dE_\theta = \frac{Z_b k I dz}{4\pi r} \sin \theta'' e^{-jkr}, \quad (11)$$

$$dH_\phi = \frac{k I dz}{4\pi r} \sin \theta'' e^{-jkr} = \frac{dE_\theta}{Z_b}. \quad (12)$$

Наиболее распространенным случаем при решении практических задач является распространение электромагнитных волн в среде с волновым сопротивлением, равным $Z_B = 120\pi$ Ом. Тогда с учетом этого получим

$$dE_\theta = \frac{30k Idz}{r} \sin \theta'' j e^{-jkr}, \quad (13)$$

$$dH_\phi = \frac{dE_\theta}{Z_B}. \quad (14)$$

В этих выражениях напряженность поля при известной длине волны характерна для сферической волны в среде без потерь в дальней зоне излучения. При этом фаза независимо от угла θ'' , во всех направлениях r будет убывать по линейному закону. В этом случае поверхности равных фаз будут сферическими, а угловая зависимость напряженности электромагнитного поля, излучаемого диполем, равна [10–12]:

$$F(\theta) = \sin \theta'' = \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right), \quad (15)$$

где θ – угол относительно нормали к поверхности диполя; θ'' – угол, отсчитываемый от плоскости диполя.

Используя свойства элементарного электрического диполя Герца, с учетом приведенных выражений, предполагая, что в пределах диполя амплитуда тока постоянна, и переходя от тока к напряженности, получим выражение полного поля в точке P :

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \frac{j}{\lambda n_y n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\dot{E}_{m0}(x_{0i}, y_{0j})}{r(x_{0i}, y_{0j})} \cos(\theta(x_{0i}, y_{0j})) e^{-jkr(x_{0i}, y_{0j})} dy dx = \\ &= \frac{j}{\lambda n_y n_x} \sum_{j=1}^{n_y} dy \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\dot{E}_{m0}(x_{0i}, y_{0j})}{r(x_{0i}, y_{0j})} \cos(\theta(x_{0i}, y_{0j})) e^{-jkr(x_{0i}, y_{0j})} dx. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь параметры $\dot{E}_{m0}$, θ , r , определяемые относительно центра диполя, являются функциями координат центров диполей (x_{0i}, y_{0j}) вдоль вертикального L_x и горизонтального L_y размеров прямоугольной поверхности отражения электромагнитных волн.

С учетом того что под знаком суммы находится функция с разделяющимися переменными [13, 14], полное рассеянное поле в вертикальной и горизонтальной плоскостях декартовой системы координат соответственно равно [15, 16]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= \frac{j}{\lambda n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\dot{E}_{m0}(x_{0i})}{r(x_{0i})} \cos(\theta'(x_{0i})) e^{-jkr(x_{0i})} dy dx = \\ &= \frac{jL_y}{\lambda n_x} \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\dot{E}_{m0}(x_{0i})}{r(x_{0i})} \cos(\theta'(x_{0i})) e^{-jkr(x_{0i})} dx; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_y &= \frac{j}{\lambda n_y} \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\dot{E}_{m0}(y_{0j})}{r(y_{0j})} \cos(\varphi'(y_{0j})) e^{-jkr(y_{0j})} dy dx = \\ &= \frac{jL_x}{\lambda n_y} \sum_{j=1}^{n_y} \frac{\dot{E}_{m0}(y_{0j})}{r(y_{0j})} \cos(\varphi'(y_{0j})) e^{-jkr(y_{0j})} dy. \end{aligned} \quad (18)$$

Представленные выражения могут быть использованы при определении напряженности электрической составляющей электромагнитного поля волн, отражающихся от поверхности сложной формы, корректно разбитой на прямоугольные поверхности отражения размерами L_x , L_y . Точность вычислений повышается с увеличением значений параметров n_x , n_y . Одна-

ко чрезмерное завышение этих параметров приводит к значительным временным затратам процесса вычислений, а также к необходимости использования высокоскоростных вычислительных систем.

Заключение

В статье рассмотрен способ решения проблемы определения напряженности электрической составляющей электромагнитного поля на основе свойств элементов Гюйгенса с учетом отражений в рамках метода геометрической оптики, а также сложной формы отражающей поверхности объектов. Получены расчетные выражения для основных плоскостей декартовой системы координат. Разработанный способ позволяет определить напряженность электрической составляющей электромагнитного поля как результат отражения с учетом амплитуд и фаз от каждого элементарного участка поверхности сложной формы. Предложенный способ позволит уменьшить погрешности в результатах расчетов, а следовательно, повысить качество проектных решений при разработке радиоэлектронных средств различного назначения.

Библиографический список

1. Андреев, П. Г. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / П. Г. Андреев, Н. К. Юрков, А. С. Жумабаева // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 201–203.
2. Андреев, П. Г. Определение комплексного коэффициента отражения электромагнитных волн внутри помещений / П. Г. Андреев, А. Н., И. Ю. Наумова, О. В. Москвитина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 5–6.
3. Андреева, Т. В. Информационное обеспечение проектирования узлов на печатных платах на основе дискретно-непрерывного моделирования / Т. В. Андреева, В. Е. Курносков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2013. – № 8. – С. 130–137.
4. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
5. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
6. Айзенберг, Г. З. Антенны УКВ / Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский, О. Н. Терешин ; под ред. Г. З. Айзенберга. – М. : Связь, 1977. – Ч. 1. – 384 с.
7. Андреев, П. Г. Оценка влияния местных предметов на распространение электромагнитных волн в помещении / П. Г. Андреев, А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 6–9.
8. Дабкин, А. Л. Антенно-фидерные устройства / А. Л. Дабкин, В. Л. Зуенко, А. Г. Кислов. – М. : Сов. радио, 1974. – 536 с.
9. Гришко, А. К. Алгоритм пространственно-параметрического синтеза электромонтажа радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, П. Г. Андреев, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 181–182.
10. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
11. Якимов, А. Н. Обеспечение помехоустойчивости информационных коммуникаций в интеллектуальной радиолокационной системе / А. Н. Якимов, В. Б. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1. – С. 125–133.
12. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2. – С. 51–57.
13. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.

14. Кочегаров, И. И. Выбор оптимального варианта построения электронных средств / И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. К. Гришко // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 2 (10). – С. 153–159.
15. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow, Russia, May 12–14, 2016. – Moscow, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
16. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Mischev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow, Russia, May 12–14, 2016. – Moscow, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.

Андреев Павел Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Andreev Pavel Gennadyevich

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

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Kochegarov Igor' Ivanovich

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

УДК 621.391.812.7

Андреев, П. Г.

Определение напряженности электрической составляющей электромагнитного поля с учетом отражений / П. Г. Андреев, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 48–54.

УДК 681.586.712.019.3

С. В. Тимаков, А. В. Хошев, Д. Е. Макушкин, А. С. Храмов

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК «ХРОМ-НИКЕЛЬ», СИНТЕЗИРОВАННЫХ РАСПЫЛЕНИЕМ ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

S. V. Timakov, A. V. Khoshev, D. E. Makushkin, A. S. Khramov

ANALYSIS OF THE PROPERTIES THIN-FILMS OF CHROME-NICKEL SYNTHESIZED BY SPRAYING FROM AN INDEPENDENT SOURCE

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предложен метод уменьшения температурной погрешности в металлопленочных датчиках давления. Целью работы является снижение негативного влияния температуры на чувствительный элемент датчиков давления. Стоит задача получения тензорезистивной пленки с минимальным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). *Материалы и методы.* Реализация процесса происходит путем магнетронного распыления из отдельных источников. При этом в качестве напыляемого вещества могут использоваться как чистые материалы, так и соединения и сплавы определенного содержания. Величина ТКС при этом сильно зависит от температуры, при которой происходит процесс напыления тензорезистивных пленок «никель-хром». *Результаты.* Предложен метод напыления тензорезистивных пленок на подложку для тонкопленочных чувствительных элементов, представляющий собой качественный подход для уменьшения ТКС под воздействием внешних факторов. *Выводы.* Предложенный метод напыления позволяет при практическом использовании получить максимальный технический эффект при решении технических задач по уменьшению ТКС в тонкопленочных датчиках давления. Показана конструктивность и практическая применимость данного метода и указаны перспективные пути его совершенствования.

A b s t r a c t. *Background.* A method of reducing the temperature error in metal-film pressure sensors (DMD). The aim is to reduce the negative impact of temperature on the sensor element (SE) pressure sensors. The goal is to produce piezo-resistive film with minimal temperature coefficient of resistance (TCR). *Materials and methods.* The process of implementation takes place by means of magnetron sputtering from separate sources. Thus as the sprayed material can be used as pure materials or alloys, compounds and specific content. The quantity of TCS thus strongly depends on the temperature at which the deposition process piezoresistive films «nickel-chrome». *Results.* We propose a method of spraying piezoresistive films on a substrate for thin-film sensing element, which is a qualitative approach to reduce TCS by external factors. *Conclusion.* The proposed method allows deposition in practical use to get the maximum technical effect in solving the technical problems to reduce the TCS in thin-film pressure sensors. To show structural and practical applicability of this method and indicates promising ways to improve it.

К л ю ч е в ы е с л о в а: температурная погрешность, микроэлектромеханическая система, диффузия, рентгено-флуоресцентный спектральный анализ.

К e y w o r d s: temperature error, the micro electromechanical systems, diffusion, x-ray spectral analysis.

При модернизации и технологическом развитии систем контроля и диагностики ракетно-космической техники одним из основных направлений является совершенствование технологии изготовления датчикообразующей аппаратуры с целью повышения ее качества и надежности.

Надежность и стабильность выходных параметров металлопленочных датчиков давления зависят от надежности и стабильности тензорезисторов мостовой схемы чувствительных элементов датчиков при воздействии внешних факторов (температура, давление, вибрация).

С целью снижения негативного влияния температуры на чувствительный элемент датчиков давления стоит задача получения тензорезистивной пленки с минимальным температурным коэффициентом сопротивления [1].

Широкие возможности получения пленок из различных соединений обеспечивает метод магнетронного распыления из отдельных источников. При этом в качестве материалов мишеней отдельных источников могут использоваться как чистые материалы, так и соединения и сплавы определенного содержания. Учитывая, что скорость распыления является линейной функцией мощности магнетронного разряда, регулируя мощность подаваемых на магнетронный распылитель импульсов питания, можно обеспечить различные скорости распыления мишеней. При скорости распыления 100 нм/мин и частоте следования импульсов питания 100 Гц толщина слоя, осажденного за один импульс, составит 0,016 нм, что существенно меньше толщины монослоя. Таким образом, при распылении различных материалов мишеней в осажденной на подложке пленке реализуется соединение или сплав, состав которого определяется режимами распыления отдельных компонентов [2].

Подложка расположена на карусельном подложкодержателе и при вращении проходит над магнетронными распылителями поочередно. При скорости вращения $\omega = 50 \text{ мин}^{-1}$ и скорости распыления 100 нм/мин за один оборот подложкодержателя на подложку осаждается слой 0,31 нм. После задания режимов распыления и включения источника питания магнетронных распылителей начинается вращение карусельного подложкодержателя и происходит процесс осаждения. Так как осаждающиеся на подложку атомы обладают достаточно высокой энергией, то происходит взаимная диффузия поочередно распыляемых материалов. Получаемые пленки имеют высокую однородность состава по толщине. Используя данный метод, получили тензочувствительные резистивные хромоникелевые пленки с различным содержанием компонентов. В качестве мишеней использовались хром и никель высокой чистоты. Контроль количественного состава компонентов в тонкопленочной гетероструктуре проводился путем рентгено-флуоресцентного спектрального анализа прибором *X-MET-3000TX* +. При этом использовалась специальная калиброванная настройка для контроля никелевых сплавов. Поскольку прибор предназначен для контроля массивных образцов, то для исследования состава были приготовлены образцы достаточно большой толщины на подложках известного состава, не содержащих никель и хром. Зависимость содержания компонентов от тока распылителей имеет вид, близкий линейному, предложенная технология обеспечивает получение пленок требуемого состава.

Результаты замеров толщины пленок свидетельствуют, что толщина полученной структуры существенно (в меньшую сторону) отличается от суммарной толщины пленок хрома и никеля, полученных при аналогичных режимах распыления.

Пленки, полученные совместным распылением при температуре подложки 200 °С, имеют меньшую толщину, чем пленки, полученные на подложках при температуре 20 °С. Полученные данные по толщине пленок позволяют сделать вывод о том, что пленка, формирующаяся при совместном напылении из отдельных источников по предложенной технологии, отличается по свойствам и характеристикам от многослойной пленки и соответствует твердому раствору хрома в никеле и никеля в хrome. На рис. 1 приведены характерные изображения поверхности двухкомпонентных пленок «никель-хром» при различном содержании компонентов. Анализ морфологии поверхности пленок, проведенный посредством атомно-силовой микроскопии, показал, что пленки с содержанием до 5 % хрома имеют структуру, характерную для никеля, с крупным размером кристаллита. При содержании хрома более 5 % размер кристаллита существенно уменьшается (рис. 1,а). Однако в пленках с содержанием хрома

25–40 % наблюдается изменение структуры формирующихся пленок с существенным увеличением размера зерна до 200 нм (рис. 1,б). При дальнейшем увеличении содержания хрома размер зерна снова уменьшается (рис. 1,в) и при содержании никеля менее 10 % практически полностью соответствует структуре пленок хрома.

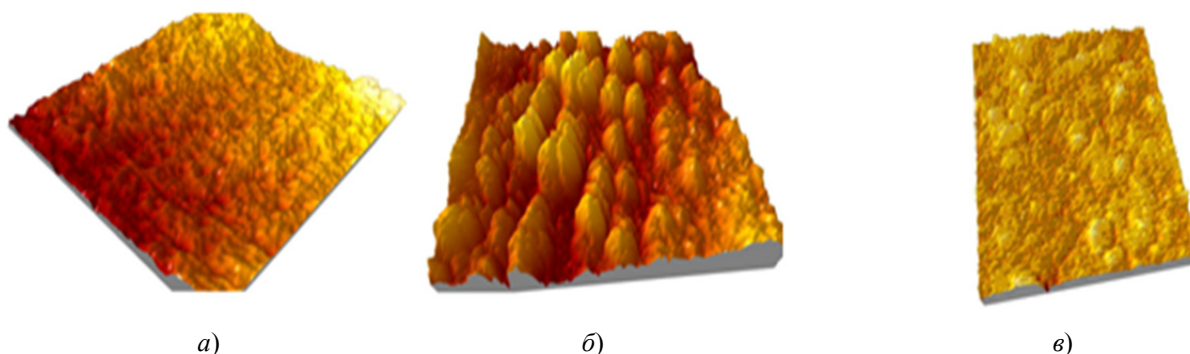


Рис. 1. Поверхности двухкомпонентной пленки:

- а* – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 90 %, хром – 10 % ;
б – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 65 %, хром – 35 %;
в – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 30 %, хром – 70 %

Уменьшение размера зерна пленки с увеличением содержания хрома происходит из-за изменения взаимодействия осаждающихся материалов с подложкой. При синтезе пленки за один оборот карусели на подложку осаждается достаточно малое количество атомов того или другого компонента: при токе распылителя 2 А – около 0,2 нм, которые не образуют сплошного покрытия. Атомы хрома, осажденные на подложку, становятся дополнительными центрами роста кристаллов. При этом создаются условия для формирования мелкозернистой структуры, соответствующей твердому раствору [3]. Температурный режим подложки в процессе осаждения на нее тонкопленочного покрытия влияет на параметры синтезированной пленки. Увеличение температуры способствует увеличению вероятности миграции осаждающихся атомов и формированию более крупнозернистой структуры из чистых элементов. При синтезе бинарных пленок увеличение температуры подложки способствует более равномерному смешению компонентов и увеличению их взаимной диффузии. Однако тенденция роста размера зерна сохраняется. На рис. 2 представлены фотографии структуры пленок состава никель – 30 %, хром – 70: полученные при температуре подложки 25 и 200 °С.

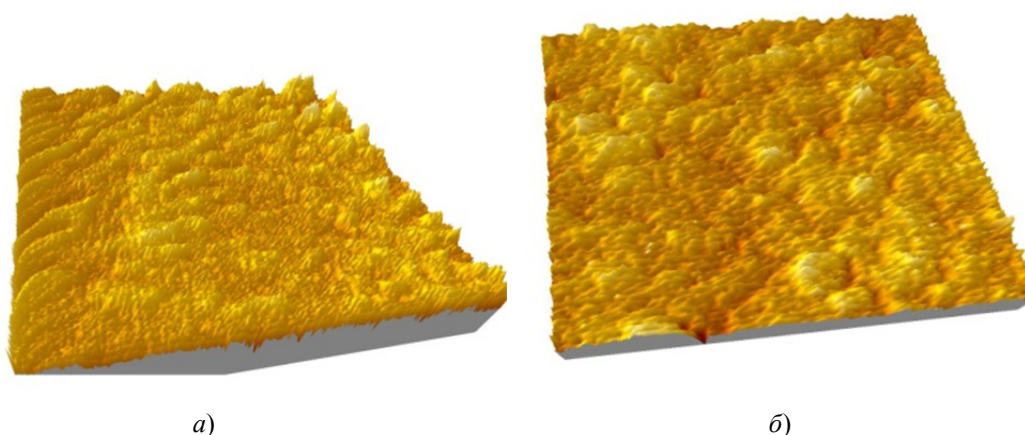


Рис. 2. Поверхность пленки с содержанием компонентов (никель – 30 %, хром 70 %):

- а* – температура подложки при осаждении 25 °С; *б* – температура подложки при осаждении 200 °С

Для пленок, синтезированных методом совместного распыления из различных источников, был проведен замер ТКС в диапазоне температур от минус 70 до плюс 100 °С. Зависимости ТКС от состава представлены на рис. 3.

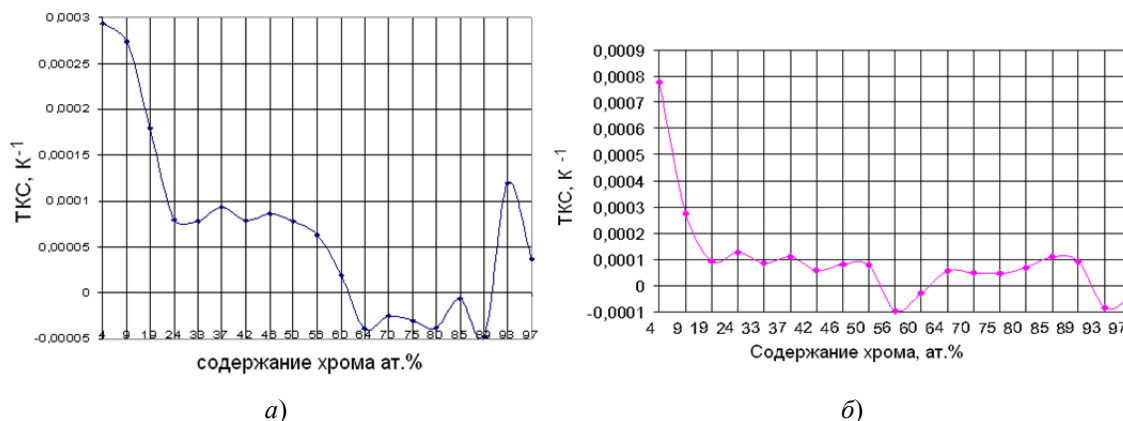


Рис. 3. Зависимость ТКС двухкомпонентных пленок «никель-хром» от состава:
 а – температура подложки при синтезе 25 °С; б – температура подложки при синтезе 200 °С

Анализируя представленные зависимости, необходимо отметить, что на обоих графиках наблюдается резкое снижение значений ТКС (практически на порядок) при увеличении содержания хрома в пленке от 0 до 10 %. При изменении содержания хрома от 15 до 50 % на обоих графиках наблюдается слабое изменение значения ТКС, которое соответствует $1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. При увеличении содержания хрома до 60 % происходит резкое снижение ТКС до отрицательных значений ($5\text{--}10 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). При дальнейшем увеличении содержания хрома до 90 % в пленке, синтезированной при 25 °С, ТКС сохраняет отрицательное значение и увеличивается до положительных значений при содержании хрома более 90 %. Для пленок, синтезированных при температуре 200 °С, при содержании хрома более 65 % наблюдается рост ТКС до положительных значений, соответствующих $0,5\text{--}1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а при содержании хрома более 90 % ТКС вновь приобретает отрицательное значение. Существенная зависимость характеристик пленок с содержанием хрома более 60 % от температурного режима подложки свидетельствует о нестабильности структуры пленки. В то же время она создает возможность регулирования значений ТКС путем подбора режима термообработки [4].

Синтезированные тензорезистивные пленки «никель-хром» с содержанием хрома 15–50 % характеризуются значением ТКС, слабо зависящим от состава и температуры подложки при осаждении. Стабильность характеристик делает эти двухкомпонентные пленки наиболее перспективными для применения в качестве резистивных и тензорезистивных элементов [5].

Тем не менее получение резистивных элементов с величиной ТКС, близкой к нулю, достаточно затруднительно, так как в области перехода через 0 характеристика резко изменяет свои значения. Использование резистивных элементов с градиентом состава по толщине дает возможность получения желаемого результата. На основании сделанного предположения был изготовлен резистивный элемент, 70 % толщины которого состояло из 50 % хрома, а 30 % толщины из 60 % хрома. Изменение состава обеспечивалось программным регулированием скорости распыления хромовой мишени. Полученные резистивные элементы имели значение ТКС $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Предложенная методика получения тонкопленочных элементов с градиентом состава по толщине позволяет расширить технологические возможности магнетронного распыления.

Таким образом, магнетронный метод распыления из отдельных источников позволяет получить тензорезистивные пленки с минимальным ТКС, что приводит к увеличению надежности и стабильности работы металлопленочных датчиков давления под воздействием внешних факторов.

Библиографический список

1. Двухканальная система управления технологическими режимами синтеза тензорезистивных пленок / С. В. Тимаков, И. Н. Чебурахин // Датчики и системы-2011 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : АО «НИИФИ». – С. 74–76.
2. Рентгено-флюороаресцентный анализатор сплавов на рентгеновской трубке X-MET-3000TA. Техническое описание.

3. Совершенствование тензорезисторных тонкопленочных датчиков давления / Е. А. Мокров, Д. В. Лебедев, В. П. Базаев, Е. В. Ефремов, И. А. Семина, П. А. Колчин // Мир измерений. – 2008. – № 4. – С. 41–46.
4. Метод уменьшения температурной погрешности в микроэлектромеханической системе датчика / Е. М. Белозубов, Н. Е. Белозубова, В. А. Васильев, Ю. А. Козлова // Современные научные исследования и инновации. – 2011. – № 8. – С. 15–23.
5. Белозубов, Е. М. Тонкопленочные микроэлектромеханические системы и датчики на их основе / Е. М. Белозубов, Н. Е. Белозубова, В. А. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 2. – С. 23–26.

Тимаков Сергей Владимирович

заместитель главного технолога,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Timakov Sergey Vladimirovich

deputy chief technologist,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Хошев Александр Вячеславович

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

Khoshev Aleksandr Vyacheslavovich

candidate of technical sciences, engineer,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Макушкин Денис Евгеньевич

регулирующий радиоэлектронной аппаратуры
и приборов,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Makushkin Denis Evgen'evich

adjuster radio-electronic equipment and devices,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Храмов Андрей Сергеевич

регулирующий радиоэлектронной аппаратуры
и приборов,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Khramov Andrey Sergeevich

adjuster radio-electronic equipment and devices,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.712.019.3

Тимаков, С. В.

Анализ свойств тензорезистивных пленок «хром-никель», синтезированных распылением из независимых источников / С. В. Тимаков, А. В. Хошев, Д. Е. Макушкин, А. С. Храмов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 55–59.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.396

*Д. Ю. Поленов*СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОРТОВЫХ
РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*D. Yu. Polenov*COMPARATIVE EVALUATION OF ADVANCED METHODS
OF EFFICIENCY BOARD TELEMETRIC SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследований является эффективность бортовых радиотелеметрических систем контроля ракет-носителей. Предметом исследований являются методы повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем. Целью исследований является проведение сравнительной оценки предлагаемых перспективных методов повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем с существующими. **Результаты.** Для оценки предлагаемых методов введено понятие эффективности бортовых радиотелеметрических систем, под которым понимается повышение точности принятой на Земле телеметрической информации (ТМИ) и сокращение расхода как частотных, так и энергетических ресурсов радиолинии. В статье проведено сравнение характеристик существующих телеметрических систем с системами, создаваемыми на основе применения рассматриваемых методов. В результате чего показана целесообразность и эффективность применения вторых для организации систем радиосвязи Борт–Земля. **Выводы.** Предлагаемые в статье методы позволяют: повысить достоверность принятой ТМИ и снизить значение отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума за счет использования многопозиционного кодирования; сузить ширину полосы Найквиста за счет применения квадратурной амплитудной манипуляции.

A b s t r a c t. Background. The object of research is the efficiency of onboard telemetry launch vehicle control systems. The subject of research are methods of improving the efficiency of on-board telemetry system (BRTS). The purpose of research is to conduct a comparative assessment of proposed advanced methods of increasing the efficiency of onboard telemetry systems with existing ones. **Results.** To evaluate the proposed methods introduce the concept of efficiency BRTS, which is understood to increase the accuracy adopted in the world of telemetry information (TMI) and reducing consumption of both frequency and power the radio resources. The article compared the characteristics of the existing telemetry systems with system created on the basis of application of these methods. As a result, it shows the feasibility of the second radio communication systems for the organization Launch-Earth. **Conclusions.** The proposed Article methods allow: to increase the accuracy of the adopted TMI and reduce the value

of the bit energy-to noise power spectral density through the use of multi-point encoding; to narrow the width of the Nyquist bandwidth through the use of quadrature amplitude modulation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиосвязь, телеметрическая информация, бортовая радио-телеметрическая система, манипуляция несущей частоты.

Key words: radio, telemetric information, board radio telemetry system, carrier frequency shift keying.

Постоянное повышение требований к информационно-телеметрическому обеспечению (ИТО) перспективных ракет-носителей (РН) в части объема передаваемой с борта РН и точности принимаемой телеметрической информации (ТМИ) подталкивает разработчиков бортовых радиотелеметрических систем (БРТС) к поиску:

- а) путей совершенствования существующих БРТС;
- б) новых методов повышения эффективности ИТО запусков РН в части передачи ТМИ с борта РН.

Проведенные исследования позволили предложить ряд возможных методов решения задачи повышения эффективности БРТС [1]. К наиболее перспективным методам совершенствования ИТО РН по показателям «ожидаемый результат внедрения» и «оперативность внедрения» целесообразно отнести следующие [2]:

- 1) применение квадратурной амплитудной манипуляции несущей частоты;
- 2) применение многопозиционного кодирования;
- 3) применение обоих методов одновременно.

Оценим эффективность указанных выше методов. В нашем случае под эффективностью БРТС РН будем понимать повышение точности принятой на Земле ТМИ и сокращение расхода как частотных, так и энергетических ресурсов радиолинии.

Для проведения такой оценки сравним значения основных характеристик создаваемой на основе указанных выше методов ТС с аналогичными характеристиками существующих ТС, созданных на основе применения в качестве БРТС широко распространенных БРТС «Скут-40» (применяется, например, на РН «Протон-М») и «Орбита IV» (применяется на РН семейства «Ангара» и других изделиях).

Для подтверждения целесообразности применения многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляции (КАМн) проведем сравнительный анализ ее применения с фазовой манипуляцией (ФМн), применяемой в БРТС «Орбита IV», и частотной манипуляции (ЧМн). Анализ будет осуществляться в сравнении приведенных манипуляций по показателям зависимости значения битовой ошибки (P_b) от отношения энергии бита к спектральной плотности

мощности шума $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$, а также значению евклидова расстояния ($d_{\text{ФМн}}$ и $d_{\text{КАМн}}$) между соседними точками созвездия передаваемого сигнала.

Отметим, что вероятность битовой ошибки для ФМн с основанием кода M определяется выражением [3, с. 470]:

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erf}(z), \quad (1)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибки,

$$z = \sin \frac{\pi}{M} \left(\sqrt{\log_2 M} \right) \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right). \quad (2)$$

Вероятность битовой ошибки для М-ЧМн определяется выражением [4, с. 257]:

$$P(e) \leq (M-1)Q\left(\sqrt{\frac{E_b \log_2 M}{N_o}}\right), \quad (3)$$

где $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

Выражение для вероятности ошибки для L -уровневой КАМ имеет вид [3, с. 473]:

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 L} \left(\frac{L-1}{L} \right) \operatorname{erfc}(z), \quad (4)$$

где $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительная функция ошибок,

$$z = \frac{\sqrt{\log_2 L}}{L-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}}. \quad (5)$$

На основе выражений (1)–(5) построим соответствующие графики (рис. 1–3) указанных зависимостей.

На рис. 1 представлены графические зависимости $\frac{E_b}{N_o}$ от позиционности кода для M -ФМн.

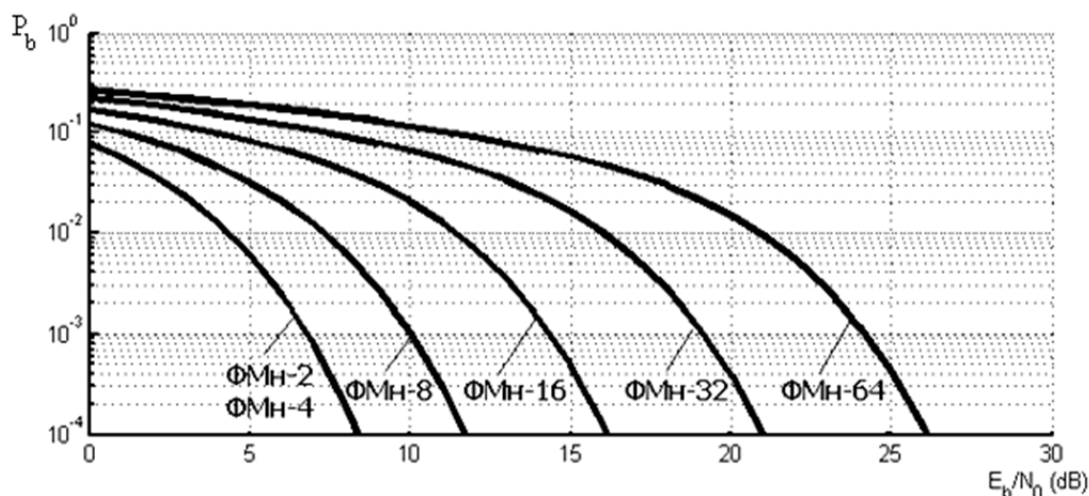


Рис. 1. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_o}$ для M -ФМн

На рис. 2 представлены графические зависимости $\frac{E_b}{N_o}$ от позиционности кода для M -ЧМн.

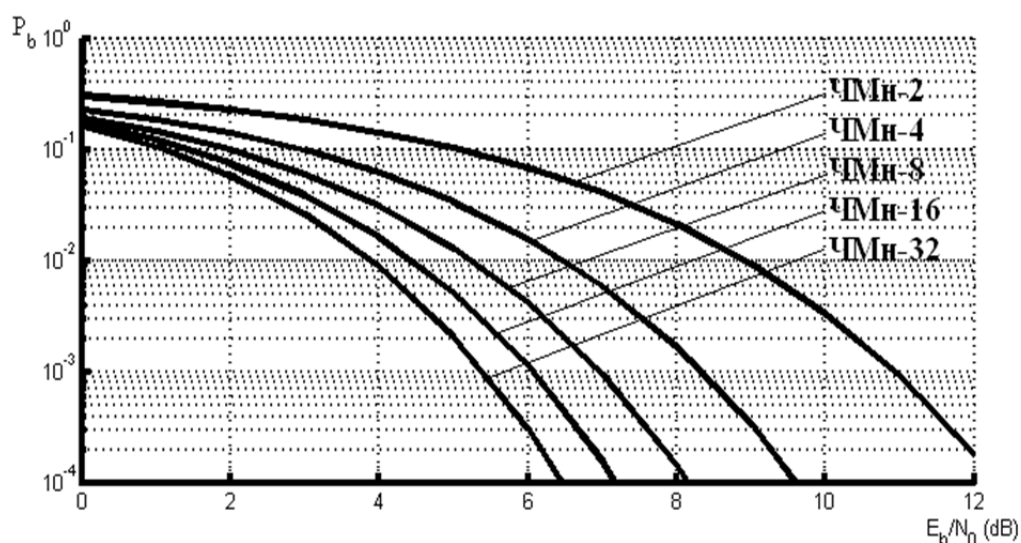


Рис. 2. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_o}$ для M -ЧМн

На рис. 3 представлены графические зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_0}$ для КАМн при различной позиционности кода.

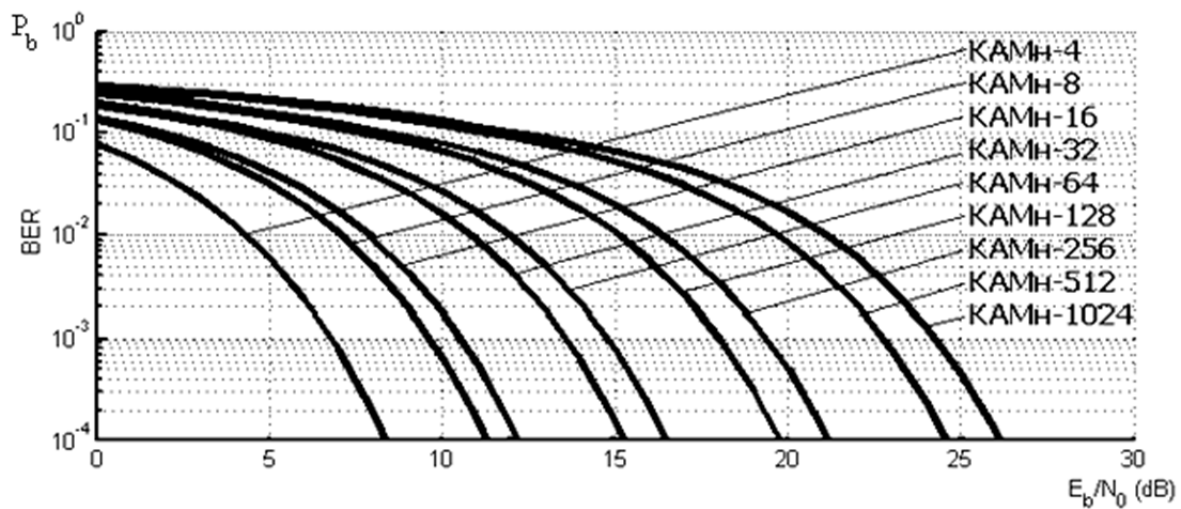


Рис. 3. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_0}$ для М-КАМн

Анализ графиков рис. 1–3 показывает, что при увеличении позиционности кода при ЧМн заметна тенденция к снижению требуемого значения отношения $\frac{E_b}{N_0}$ для поддержания требуемого (как правило, для систем радиосвязи (СРС) Борт–Земля $P_b = 10^{-4}$) уровня вероятности P_b . Это обусловлено тем, что при увеличении основания кода пропорционально увеличивается расход полосы частот радиолинии. В свою очередь повышение позиционности при ФМн и КАМн требует повышения отношения $\frac{E_b}{N_0}$ в СРС при неизменном расходе полосы частот радиолинии (рис. 4).

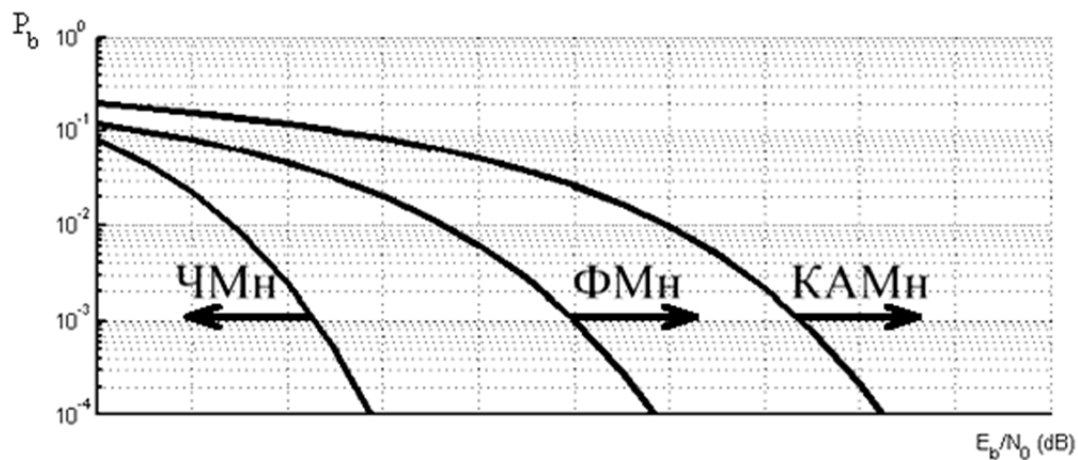


Рис. 4. Направления изменения значения $\frac{E_b}{N_0}$ для различных видов манипуляций при росте позиционности кода

В табл. 1 приведены соответствующие значения зависимости вероятности $P_b=10^{-4}$ от отношения $\frac{E_b}{N_o}$, а также значения минимальной ширины полосы Найквиста для разного вида манипуляций несущей.

Таблица 1

Значения отношения $\frac{E_b}{N_o}$ и ширины полосы Найквиста для различных видов манипуляций и значениях позиционности кода

Позиционность кода (M)	Вид манипуляции несущей					
	ЧМн		ФМн		КАМн	
	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц
2	12,2	2480	8,4	640	—	—
4	9,5	2480	8,4	320	8,3	320
8	8,2	2480	11,7	160	11,3	160
16	7,2	2480	16,1	80	12,2	80
32	6,5	2480	21	40	15,3	40
64	—	—	26,1	20	16,5	20
128	—	—	—	—	19,7	10
256	—	—	—	—	21	5
512	—	—	—	—	24,5	2,5
1024	—	—	—	—	26	1,25

П р и м е ч а н и е. В качестве примера используются значения $f_b=640$ кбит/с и $\Delta f=600$ кГц, соответствующие БРТС «Скут-40».

Значение ширины полосы частот Найквиста для ФМн и КАМн определяется выражением [3, с. 415]:

$$B = \frac{f_b}{\log_2 M}, \quad (6)$$

где f_b – скорость передачи, бит/с.

Значение ширины полосы частот Найквиста для ЧМн определяется выражением [3, с. 419]:

$$B = 2(\Delta f + f_b), \quad (7)$$

где Δf – отклонение (девиация) частоты.

Анализ значений табл. 1 показывает, что в случае использования M -ЧМн при повышении позиционности кода ($M \uparrow$) снижается необходимое для точного приема ТМИ значение отношения сигнал/шум $\left(\frac{E_b}{N_o} \downarrow\right)$. Однако в случае дальнейшего ($M \geq 16$) повышения позиционности кода при использовании M -ЧМн резко увеличивается ширина полосы частот (B). Тем самым существенно повышается вероятность искажения сигнала на «особых участках» полета РН, что является недопустимым [5]. Необходимо отметить и большие требуемые значения

$\frac{E_b}{N_o}$ и B для передачи ТМИ на уровнях позиционности кода $M \leq 4$ для ЧМн в сравнении с ФМн и КАМн. Что касается сравнения M -ФМн с M -КАМн, то по значению ширины полосы они всегда равнозначны. Что касается значений $\frac{E_b}{N_o}$, то до значения позиционности кода

$M = 8$ оба вида манипуляций сопоставимы по значениям $\frac{E_b}{N_o}$, несмотря на незначительный

выигрыш M -КАМн. Дальнейшее же повышение позиционности ($M=16, 32, \dots, 1024$) показывает существенную разницу в минимально необходимых для точного приема ТМИ значениях $\frac{E_b}{N_o}$ у КАМн. Вышесказанное позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение M -ЧМн при малых значениях позиционности кода ($M=2 \dots 4$) проигрывает M -ФМн и M -КАМн как по требуемому для точного приема ТМИ значению $\frac{E_b}{N_o}$ в $\sim 1,45$ и $\sim 1,1$ раза соответственно, так и по ширине полосы B в 3,875 и 7,75 раза соответственно.

2. Применение M -ЧМн при дальнейшем повышении позиционности кода ($M \geq 8$) снижает требуемый уровень $\frac{E_b}{N_o}$, однако при этом резко увеличивается полоса B , что существенно повышает вероятность искажения сигнала на «особых участках» полета РН, что является недопустимым.

3. Сравнение применения M -ФМн и M -КАМн по характеристикам $\frac{E_b}{N_o}$ и B при малых значениях позиционности кода ($M \leq 8$) существенной разницы между указанными видами манипуляции не выявило.

4. Повышение позиционности ($M=16, 1024$) показывает существенную разницу в минимально необходимых для точного приема ТМИ значениях $\frac{E_b}{N_o}$ у M -КАМн в сравнении с M -ФМн.

Для проведения дальнейшей оценки эффективности указанных методов сравним СРС на основе предела Шеннона. Как известно, пределом Шеннона является зависимость, представленная выражением [6, с. 122]:

$$\beta^2 = f(\alpha_f), \quad (8)$$

где β^2 – показатель удельного расхода энергии E_b , затрачиваемой на передачу одного символа цифрового сообщения (одного бита); α_f – удельный расход необходимой полосы частот на передачу одного бита цифрового сообщения.

Выражение для β^2 равно [6, с. 123]:

$$\beta^2 = \alpha_f \left(2^{\frac{1}{\alpha_f}} - 1 \right), \quad (9)$$

где

$$\alpha_f = \frac{1}{\log_2 \left(1 + \frac{R_1 E_b}{\Delta f_{\text{пр}} N_o} \right)}, \quad (10)$$

где $R_1 = \frac{\log_2 M}{\tau_c}$ – скорость передачи ТМИ; M – основание кода; τ_c – длительность многоосновного символа; E_b – энергия бита; N_o – односторонняя спектральная плотность мощности шума на входе приемника; $\Delta f_{\text{пр}}$ – полоса пропускания канала связи.

На основе полученных значений табл. 1 вычислим с учетом выражений (8)–(10) соответствующие значения α_f и β^2 для рассматриваемых методов манипуляции несущей. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения α_f и β^2 для М-ЧМн, М-ФМн и М-КАМн

Позиционность кода (M)	ЧМн		ФМн		КАМн	
	α_f	β^2	α_f	β^2	α_f	β^2
2	0,574	1,346	0,335	2,318	–	–
4	0,648	1,240	0,335	2,318	0,335	2,318
8	0,711	1,174	0,251	3,715	0,259	3,497
16	0,761	1,131	0,186	7,567	0,242	4,011
32	0,811	1,095	0,143	18,017	0,195	6,612
64	–	–	0,115	46,967	0,181	8,102
128	–	–	–	–	0,152	14,227
256	–	–	–	–	0,143	18,017
512	–	–	–	–	0,123	34,608
1024	–	–	–	–	0,116	46,074

Анализ значений, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждается вывод, полученный при анализе табл. 1 в части применения М-ЧМн, а именно – при повышении позиционности кода растет удельный расход полосы частот и снижается удельный расход энергии.
2. Для методов манипуляций М-ФМн и М-КАМн при позиционности кода 4 и 8 значения β^2 сопоставимы в случае применения обоих видов манипуляций.
3. Для методов манипуляций М-ФМн и М-КАМн на следующих уровнях позиционности кода $M = 16, 32, 64$ заметно прогрессивное снижение скорости увеличения показателя β^2 для М-КАМн при близких значениях показателя α_f .

Необходимо также отметить и повышение достоверности передаваемой информации в случае использования многопозиционного кодирования передаваемой ТМИ М-позиционным кодом [7]. В этом случае нивелируется действие на передаваемую цифровую последовательность ТМИ импульсной помехи, которая приводит к искажению принимаемой информации.

Сказанное подтверждает вывод о перспективности повышения позиционности кода для передачи ТМИ с борта РН в условиях ракетного радиоканала.

Перейдем к следующему этапу сравнения – сравним М-ФМн и М-КАМн по значению евклидова расстояния d между соседними точками сигнального созвездия. Стоит отметить, что чем больше евклидово расстояние между соседними точками сигнального созвездия, тем ниже вероятность неправильного определения значения передаваемого символа.

Для вычисления евклидова расстояния между соседними точками ФМн и КАМн построим модель системы радиосвязи в программе Matlab, изображение которой приведено на рис. 5. Данная модель содержит основные части – генератор символов, модулятор/демодулятор, канал связи, анализатор количества переданных и принятых символов, а также блок для отображения построенного сигнального созвездия [8, 9].

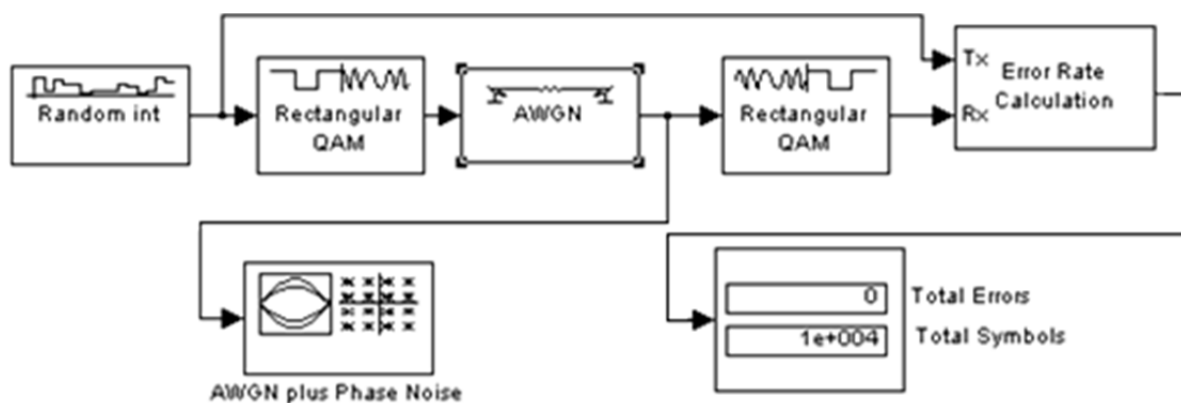


Рис. 5. Модель системы радиосвязи

Исходные данные для указанной системы радиосвязи:

- уровень шума: 30 дБ;
- количество переданных символов: 10 000;
- позиционность кода: 16.

Результатом моделирования характеристик построенной модели СРС являются созвездия точек для 16-КАМн и 16-ФМн, которые показаны на рис. 6.

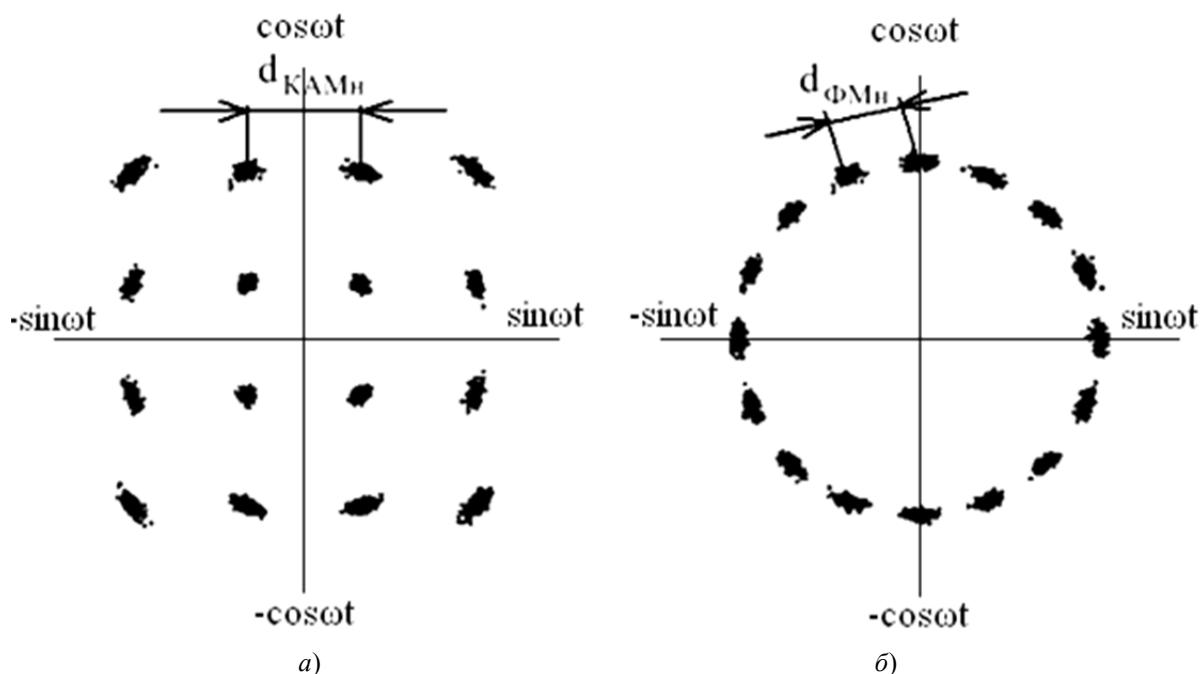


Рис. 6. Сигнальное созвездие:
а – 16-КАМн; б – 16-ФМн

Вычислим значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$ для M -КАМн и M -ФМн. Ниже приведены выражения для соответствующих вычислений [10]:

$$d_{\text{КАМн}} = \frac{\sqrt{2}}{L-1}, \quad (16)$$

$$d_{\text{ФМн}} = \sqrt{2 - 2 \cos \frac{2\pi}{M}}. \quad (17)$$

В табл. 3 приведены соответствующие значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$.

Таблица 3

Евклидово расстояние между точками сигнального созвездия M -КАМн и M -ФМн

Позиционность (M)	КАМн	ФМн	Отношение $\frac{d_{\text{КАМн}}}{d_{\text{ФМн}}}$
4	~1,41	~1,41	1
8	~1,41	~0,76	~1,85
16	~0,47	~0,39	~1,2
32	~0,28	~0,2	~1,4
64	~0,2	~0,1	~2
128	~0,13	~0,05	~2,6
256	~0,094	~0,024	~3,9
512	~0,061	~0,012	~5
1024	~0,045	~0,006	~7,5

В целом анализ данных, представленных в табл. 3, свидетельствует о большей устойчивости *М*-КАМн к помехам по сравнению с *М*-ФМн. Кроме этого, стоит отметить зависимость в повышении помехоустойчивости сигнала во время роста позиционности кода при сравнении КАМн и ФМн.

На рис. 7 приведено графическое изображение тенденции увеличения разности между значениями евклидова расстояния для КАМн и ФМн при повышении позиционности кода.

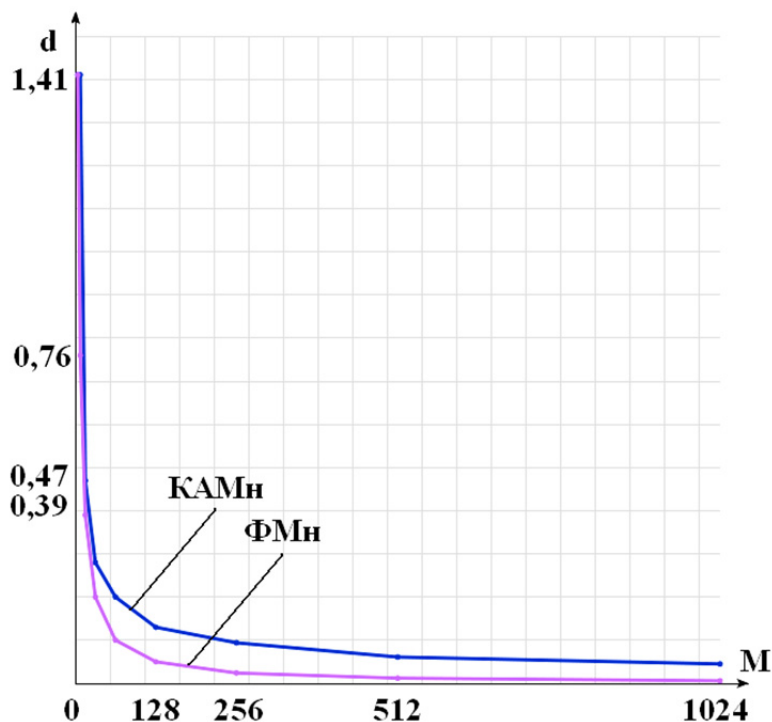


Рис. 7. Значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$ при различной позиционности кода

Следовательно, применение КАМн в СРС Борт–Земля и увеличение позиционности кода позволит повысить помехоустойчивость создаваемых СРС Борт–Земля и сократить требуемые энергетические и частотные ресурсы.

Заключение

Проведена сравнительная оценка применения методов повышения эффективности БРТС:

- внедрение квадратурной амплитудной манипуляции несущей частоты;
- применение многопозиционного кодирования;
- применение обоих методов одновременно.

Проведенная оценка позволяет сделать следующие выводы:

1. Возможно повышение помехоустойчивости передаваемого телеметрического сигнала к импульсным помехам за счет увеличения позиционности кода в БРТС.

2. Метод манипуляции несущей *М*-КАМн в сравнении с *М*-ФМн обеспечивает более высокую достоверность приема ТМИ из-за большего значения евклидова расстояния между соседними точками сигнального созвездия.

3. В БРТС возможно сузить ширину полосы Найквиста при изменении вида манипуляции с ЧМн (БРТС «Скут-40») на КАМн или ФМн. Данная особенность приемлема при создании космических радиополос. Однако в этом случае необходимо будет увеличивать отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

4. В БРТС возможно снизить значения отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума в обмен на повышение значения ширины полосы Найквиста. Данная особенность приемлема при создании СРС с ракетным радиоканалом.

Приведенные выводы свидетельствуют о целесообразности применения рассматриваемых методов в БРТС для организации СРС Борт–Земля.

Библиографический список

1. Поленов, Д. Ю. Направления повышения эффективности существующих телеметрических систем ракет-носителей тяжелого класса / Д. Ю. Поленов, А. П. Мороз // *Авиация и космонавтика* : 15-я Междунар. конф. Москва, 14–18 ноября 2016 г. – М. : Люксор, 2016. – С. 129–130.
2. Мороз, А. П. Обоснование перспективных направлений повышения эффективности передачи телеметрической информации с ракет-носителей / А. П. Мороз, Д. Ю. Поленов // *Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники* : сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – Т. 1. – С. 486.
3. Томаси, У. Электронные системы связи / У. Томаси. – М. : Техносфера, 2007. – 1360 с.
4. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. / Бернард Скляр. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
5. Поленов, Д. Ю. Особенности ракетного радиоканала. Теоретические и прикладные аспекты современной науки / Д. Ю. Поленов // *Теоретические и прикладные аспекты современной науки* : сб. науч. тр. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. (31 марта 2015 г.). – Белгород, 2015. – Ч. 2. – С. 104–109.
6. Современная телеметрия в теории и на практике : учеб. курс / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов, В. П. Обрученков, А. В. Дрелин, В. Б. Кравкин, С. Г. Кудряков, А. И. Петров, С. М. Соколов, В. Л. Якимов, А. И. Лоскутов. – СПб. : Наука и Техника, 2007. – 672 с.
7. Поленов, Д. Ю. Метод передачи ТМИ с изделий РКТ с использованием многопозиционного кодирования / Д. Ю. Поленов // *Гагаринские чтения – 2016* : сб. тезисов докладов XLII Междунар. молодеж. науч. конф. – М. : Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2016. – Т. 1. – 534 с.
8. Поленов, Д. Ю. Определение основных средств построения и моделирования систем радиосвязи с использованием Matlab / Д. Ю. Поленов // *Вестник Ижевского государственного университета*. – 2016. – № 2 (70). – С. 74–77.
9. Носов, В. И. Моделирование систем связи в среде Matlab : учеб. пособие / В. И. Носов. – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2007. – 177 с.
10. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/2289/589/lecture/12640?page=4> (дата обращения: 10.11.2016).

Поленов Дмитрий Юрьевич

аспирант, начальник группы,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Пионерская, 2)
E-mail: polenoff.mitya@yandex.ru

Polenov Dmitriy Yur'evich

postgraduate student, chief of the group,
Scientific-Production Association
Measuring Equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev,
Moscow region, Russia)

УДК 621.396

Поленов, Д. Ю.

Сравнительная оценка перспективных методов повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем / Д. Ю. Поленов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2017. – № 2 (20). – С. 60–69.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 004.75: 616.12-07

С. А. Балахонова

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
СИСТЕМЫ КАРДИОДИАГНОСТИКИ

S. A. Balakhonova

IMPLEMENTATION FEATURES OF DISTRIBUTED
CARDIO DIAGNOSIS SYSTEM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является разработка структуры распределенной системы кардиодиагностики, обеспечивающей своевременность и качество медицинской помощи при снижении затрат на аппаратное обеспечение. **Материалы и методы.** Рассмотрены возможности оптимизации оказания медицинской помощи, особенности и проблемы построения распределенных систем. Особое внимание уделено необходимости повышения надежности и отказоустойчивости системы для противодействия DDoS-атакам. Предложен подход к построению распределенной системы кардиодиагностики, учитывающий требования к высоким показателям эксплуатационных характеристик. **Результаты.** Предложен подход к организации распределенной системы кардиодиагностики. Разработанная структура системы обеспечивает следующие преимущества: высокую степень доступности, возможность аппаратного масштабирования, защищенность от воздействия злоумышленников, надежность, отказоустойчивость. Предложенный подход к построению распределенной системы кардиодиагностики позволяет снизить себестоимость затрат на защиту от DDoS-атак. **Выводы.** Предложенный подход к построению структуры распределенной системы кардиодиагностики позволяет снизить ее себестоимость при сохранении высоких эксплуатационных характеристик.

A b s t r a c t. Background. The aim is to develop a structure of a distributed cardio diagnosis system, ensuring the timeliness and quality of care while reducing costs on hardware. **Materials and methods.** The article discusses the possibility of optimizing patient care. The features and problems of building distributed systems is considered. Particular attention is paid to need to improve reliability and fault tolerance of system to counter DDoS-attacks. Approach to construction of distributed cardio diagnosis system is offered. **Results.** The organization of distributed heart state diagnosis system is offered. Advantages of distributed system implementing are proved: high degree of availability, possibility of hardware scaling, protection from malicious impact, reliability, fault tolerance. The proposed approach to the construction of distributed system reduces the cost of protection against DDoS-attacks. **Conclusions.** The proposed approach to building distributed cardio diagnosis system structure reduces cost of system, while maintaining high performance.

К л ю ч е в ы е с л о в а: медицинская информационная система, распределенная система, облачный сервис, надежность, доступность.

Key words: medical information system, distributed system, cloud service, fault tolerance, availability.

Введение

Важнейшими показателями уровня жизни населения являются доступность и качество медицинского обслуживания. В последние годы на государственном уровне уделяется особое внимание развитию здравоохранения. Одним из направлений реформирования системы медицинского обслуживания стало повсеместное внедрение информационных технологий. Компьютеризация, проведение высокоскоростного Интернета в больницах и поликлиниках, использование медицинских информационных систем (МИС) в работе персонала – неотъемлемые части современного здравоохранения. В течение ближайших двух лет планируется стопроцентная информатизация лечебных учреждений [1]. В итоге данное реформирование призвано повысить качество оказания медицинской помощи, оптимизировать использование трудовых ресурсов, повысить уровень жизни населения.

Одним из возможных путей повышения доступности и качества оказания медицинской помощи, по мнению автора, является построение технологического процесса обмена данными между персональным портативным устройством кардиодиагностики, службой экстренной медицинской помощи и лечебно-профилактическим учреждением (ЛПУ). Реализовать данный технологический процесс предлагается в рамках распределенной системы кардиодиагностики.

При реализации распределенной системы особое внимание необходимо уделить надежности системы, отказоустойчивости, возможности масштабирования, защищенности от несанкционированного воздействия [2].

Одной из нерешенных проблем современных МИС является недостаточная устойчивость к DDoS-атакам. Это связано с высокой стоимостью оборудования, необходимого для противодействия DDoS-атакам. Ограниченность бюджета при развертывании МИС учреждениями здравоохранения приводит к снижению устойчивости перед хакерскими атаками. По мнению автора, необходимо искать пути снижения себестоимости разрабатываемой распределенной кардиодиагностической системы (РКДС) с сохранением эксплуатационных характеристик.

В данной статье автором предложены концептуальные особенности построения медицинской системы на примере построения РКДС «Кардиовид».

На рис. 1 представлена схема организации облачного сервиса РКДС «Кардиовид» [3].

Как видно из рис. 1, сервис РКДС «Кардиовид» представляет собой сложную распределенную систему, состоящую из множества серверов, одни из которых являются внутренними (функциональными) и недоступными для сетевых обращений из «внешнего» мира, а другие серверы являются внешними (транзитными) и служат для организации сетевого взаимодействия между клиентами и активным функциональным сервером. Клиентами РКДС являются портативные кардиоанализаторы (ПКА), лечебно-профилактические учреждения и др. Приведенная схема организации облачного сервиса РКДС «Кардиовид» обладает следующими преимуществами: распределенность, аппаратная масштабируемость, высокая степень доступности, защищенность каналов связи [3].

Обладание свойством распределенности позволяет РКДС использовать ресурсы множества серверов и МИС ЛПУ для организации хранения и обработки медицинской информации. При этом реализуется фундаментальный принцип построения распределенной базы данных (БД): для пользователя распределенная система должна выглядеть как нераспределенная [4]. Это обеспечивается путем организации асинхронного доступа к данным за счет использования трехзвенной клиент-серверной архитектуры и распределенной БД [5].

Среди указанных преимуществ одним из наиболее важных, с точки зрения автора, является высокая степень доступности. Данное преимущество достигается в результате применения следующих технологических приемов:

1. Защита функциональных серверов от DDoS-атак, что достигается благодаря отсутствию известных злоумышленнику доменных имен и IP-адресов.

2. Защита транзитных серверов (ТС) от DDoS-атак, что достигается за счет использования значительного количества «внешних» серверов, вероятность организации одновременной успешной DDoS-атаки на которые близка к нулю.

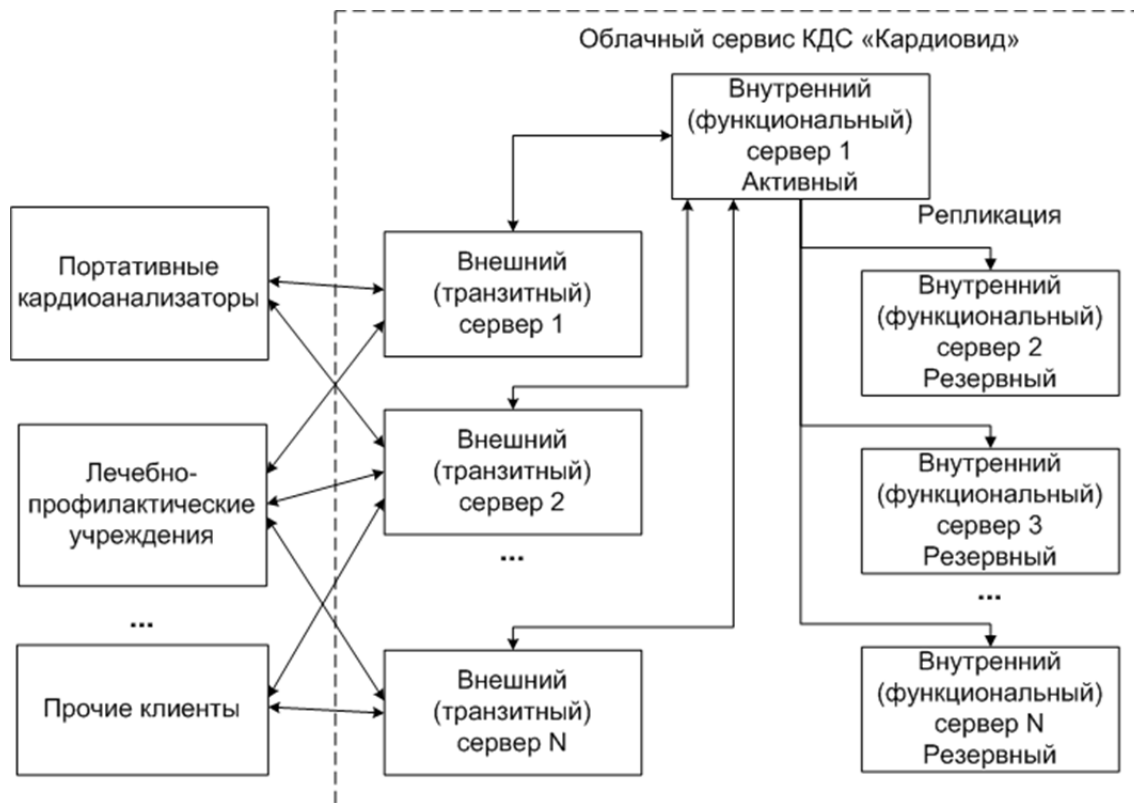


Рис. 1. Схема организации облачного сервиса РКДС «Кардиовид»

Одновременное использование множества транзитных серверов, обладающих различной степенью устойчивости к DDoS-атакам, повышает доступность облачного сервиса РКДС (P):

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (1)$$

где p_i – вероятность доступности i -го ТС при организации на него DDoS-атаки; при $p_1 = p_2 = p_3 = 0,5$, $P = [1 - (1 - p)^3] = 1 - 0,125 = 0,875$.

Очевидно, что при увеличении количества транзитных серверов n и их устойчивости к DDoS-атакам максимальная доступность сервиса РКДС: $P \rightarrow 1$.

3. Использование резервных функциональных серверов, каждый из которых готов в любой момент принять роль активного сервера. При этом актуальность информации на резервных функциональных серверах обеспечивается благодаря использованию механизма репликации данных.

4. Размещение транзитных и функциональных серверов в разных data-центрах, что позволяет сервису РКДС оставаться доступным даже в случае организации DDoS-атаки непосредственно на data-центр либо при возникновении технических неполадок в его работе.

Защищенность канала связи в РКДС обеспечивается благодаря использованию технологии организации защищенного соединения TLS (Transport Layer Security) [6].

Для снижения количества сетевых запросов, требуемых для установки и поддержания защищенного соединения, автором разработан алгоритм установки защищенного соединения между клиентом и транзитным сервером, представленный на рис. 2.

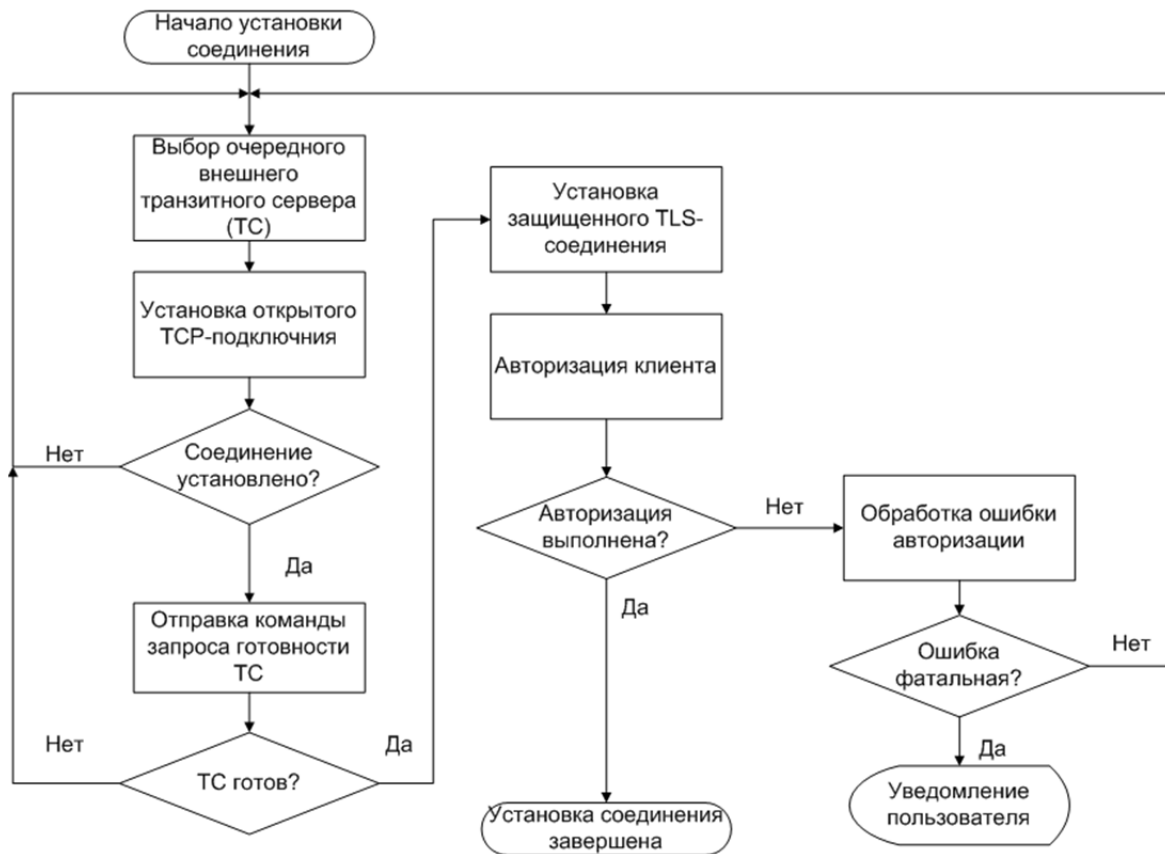


Рис. 2. Алгоритм установки защищенного соединения между клиентом и транзитным сервером

Алгоритм, представленный на рис. 2, учитывает специфику работы транзитных серверов и включает следующие этапы установки защищенного соединения между клиентом и ТС:

1. **Выбор очередного внешнего транзитного сервера.** Предполагается, что в памяти клиента (ПКА, ЛПУ и др.) сохранена таблица всех доступных ТС с указанием их доменного имени (или IP-адреса) и номера TCP-порта. При отсутствии таблицы транзитных серверов с актуальными данными клиент должен запросить ее у известного ТС, который задан в программном обеспечении клиента по умолчанию. При выборе очередного транзитного сервера предпочтение должно отдаваться тому ТС, с которым ранее было успешно установлено защищенное соединение.

2. **Установка открытого TCP-соединения.** Осуществляется установка TCP-соединения [7] с транзитным сервером, выбранным на предыдущем этапе. В случае отказа в установке соединения осуществляется переход к п. 1, иначе переход к п. 3.

3. **Отправка команды запроса готовности транзитного сервера.** Данная команда позволяет оценить наличие у ТС ресурсов, необходимых для установки защищенного соединения и дальнейшего взаимодействия между клиентом и функциональным сервером в рамках этого соединения. Транзитный сервер возвращает ответ «готов» при наличии следующих факторов:

- а) установлено соединение между транзитным и функциональным сервером;
- б) транзитный сервер запущен в режиме готовности приема и обработки запросов от клиентов;
- в) ограничение на максимальное количество подключений не достигнуто;
- г) у транзитного сервера достаточно ресурсов для обслуживания запросов от клиента (отсутствует пиковая загрузка процессора, жесткого диска или SSD, а также памяти оперативного запоминающего устройства).

В случае приема от транзитного сервера ответа «готов» осуществляется переход к п. 4, иначе переход к п. 1.

4. **Установка защищенного TLS-соединения.** При этом используются стандартные протоколы установки TLS-соединения с использованием серверного сертификата [6]. Клиен-

там (ЛПУ), предоставляющим функциональному серверу запрашиваемую медицинскую информацию, должны выдаваться клиентские сертификаты, служащие гарантией того, что сервис РКДС получает информацию от доверенного источника.

5. Авторизация клиента. Осуществляется в рамках установленного TLS-соединения. При наличии идентификатора сессии, сформированного сервером в ходе предыдущей авторизации, клиент передает его транзитному серверу, который проверяет актуальность идентификатора. В том случае если идентификатор сессии актуален, сервер находит в своей памяти необходимую информацию о клиенте и передает ответ «авторизован», не запрашивая логин и пароль. В противном случае (идентификатор сессии на клиенте не сохранен либо сервер передал ответ «необходима авторизация») клиент должен передать транзитному серверу логин и пароль, после чего ТС должен сформировать новый идентификатор сессии и передать клиенту результат авторизации («авторизован» либо «ошибка авторизации» с указанием кода и расшифровки ошибки).

После успешного завершения этапа «авторизация клиента» сервис РКДС переходит в состояние готовности к обмену с клиентом медицинской информацией.

Необходимо отметить, что информация, передаваемая в ходе обмена между транзитными серверами и функциональным сервером, также надежно защищена от возможных деструктивных действий злоумышленника. Это достигается благодаря использованию технологии VPN (Virtual Private Network). Особенность VPN заключается в том, что, несмотря на организацию коммуникации по сетям с меньшим или неизвестным уровнем доверия (например, по публичным сетям), уровень доверия к построенной логической сети не зависит от уровня доверия к базовым сетям благодаря использованию средств криптографии (шифрования, аутентификации, инфраструктуры открытых ключей, средств для защиты от повторов и изменений, передаваемых по логической сети сообщений) [8].

Возможность аппаратного масштабирования также является немаловажным преимуществом. Это достигается благодаря использованию технологии «виртуальный выделенный сервер» (VDS), которая предоставляется современными data-центрами. Преимущество использования данной технологии заключается в том, что на начальном этапе работы РКДС можно использовать недорогой VDS со скромными аппаратными возможностями, которые в дальнейшем можно наращивать по мере появления потребностей и соответствующего финансирования.

При разработке современного программного обеспечения (ПО) немаловажное значение имеет выбор среды разработки ПО. Современная среда разработки должна обладать огромным количеством возможностей и особенностей, среди которых автор выделяет следующие:

- 1) поддержка современных технологий в области разработки ПО;
- 2) возможность разработки кроссплатформенных приложений, которые могут работать одинаковым образом в разных операционных системах;
- 3) современный развитый язык программирования;
- 4) наличие собственной библиотеки компонентов и возможность использования библиотек от сторонних разработчиков;
- 5) генерация машинного кода, отличающегося высокой производительностью и низкими требованиями к аппаратным ресурсам компьютера;
- 6) стоимость среды разработки, простота ее развертывания и высокая скорость компиляции и сборки программных проектов;
- 7) наличие сообщества разработчиков ПО, осуществляющих активное развитие среды разработки и устранение выявленных ошибок.

Анализ современных средств разработки ПО показал, что указанными возможностями и особенностями обладает свободно доступная интегрированная среда разработки программного обеспечения Lazarus IDE, использующая язык программирования Object Pascal и кроссплатформенный компилятор Free Pascal [9]. Использование Lazarus IDE позволяет снизить издержки при разработке РКДС и реализовать кроссплатформенное ПО, работающее под управлением различных операционных систем, таких как Windows и Linux. Одна из экранных форм реализации распределенной системы кардиодиагностики представлена на рис. 3.

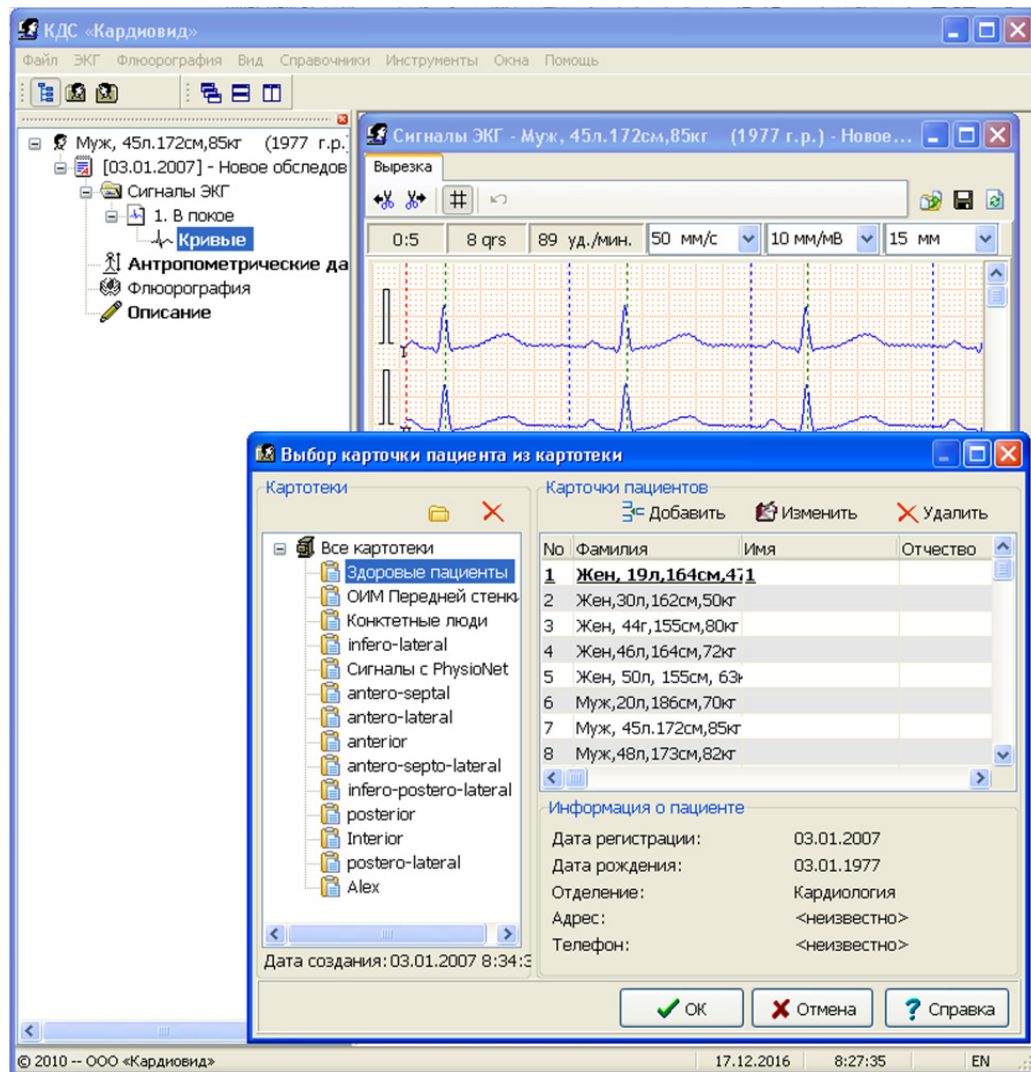


Рис. 3. Экранная форма распределенной системы кардиодиагностики

Заключение

Благодаря предложенному подходу к организации распределенной системы кардиодиагностики обеспечивается необходимый уровень надежности системы, отказоустойчивости, аппаратного масштабирования, защищенности от несанкционированного воздействия. Предложенный подход позволяет снизить себестоимость РКДС с сохранением эксплуатационных характеристик.

Библиографический список

1. Доклад министра здравоохранения РФ. — URL: <https://www.rosminzdrav.ru/news/2016/12/14/3334-rabochaya-vstrecha-prezidenta-s-ministrom-veroniko-skvortsovoy> (дата обращения: 25.12.2016).
2. Медицинские информационные системы: Теория и практика / Г. И. Назаренко, Я. И. Гулиев, Д. Е. Ермаков ; под ред. Г. И. Назаренко, Г. С. Осипова. — М. : Физматлит, 2005. — 320 с.
3. Организация распределенной системы диагностики состояния сердца / С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, Д. С. Логинов, Е. А. Ломтев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2016. — № 2. — С. 129–136.
4. Распределенные системы, принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стеен. — СПб. : Питер, 2003. — 877 с.
5. Пат. 2586854 Российская Федерация. Способ предоставления данных, относящихся к пациентам медицинского учреждения / Бодин О. Н., Балахонова С. А., Иванчуков А. А.,

- Касимов А. О., Ожикенов К. А., Полосин В. Г., Рахматуллов Ф. К., Сафронов М. И., Сергеев А. С. – №2015100793/14 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16.
6. Спецификация протокола TLS. Версия 1.2. – URL: <http://www.webcitation.org/65JSRyvms> (дата обращения: 20.12.2016).
 7. Спецификация протокола TCP. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc793> (дата обращения: 23.12.2016).
 8. Virtual Private Network. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/VPN> (дата обращения: 23.12.2016).
 9. Среда разработки программного обеспечения Lazarus. – URL: <http://www.lazarus-ide.org> (дата обращения: 27.12.2016).

Балахонова Светлана Александровна

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: svetlanapage@mail.ru

Balakhonova Svetlana Aleksandrovna

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.75: 616.12-07

Балахонова, С. А.

Особенности реализации распределенной системы кардиодиагностики / С. А. Балахонова //
Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 70–76.

*Г. К. Бердибаева, О. Н. Бодин, Н. В. Громков,
В. В. Козлов, К. А. Ожикенов, Я. А. Пижонков*

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД

*G. K. Berdibaeva, O. N. Bodin, N. V. Gromkov,
V. V. Kozlov, K. A. Ozhikenov, Ya. A. Pizhonkov*

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR VOICE RECOGNITION

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью работы является оценка применения искусственных нейронных сетей для распознавания речевых команд в системах голосового управления. *Материалы и методы.* Применяемый метод основан на анализе голосовых команд нейронными сетями, каждая из которых обучена на соответствующие фонемы естественного языка. Выделенные сегменты речевых команд параллельно подаются на вход каждой сети. В случае распознавания фонемы соответствующая сеть выдаст сигнал, затем группа распознанных фонем анализируется и сравнивается с базовым словарем речевых команд. *Результаты.* Рассмотрены современные методы и средства голосового управления, анализ которых показал необходимость использования метода фонемного декодирования при распознавании речевых команд. Приведено описание примера работы программы разделения голосового сообщения на составляющие фонемы, в результате преобразования речевая команда разделяется на фонемы, являющиеся входными данными для нейросетевого анализа. *Выводы.* Предлагаемый авторами подход при построении систем голосового управления повышает достоверность распознавания речевых команд за счет выявления частотных признаков фонем и последующего их нейросетевого анализа. При этом повышается восприимчивость нейронной сети к входным данным по сравнению с непосредственной подачей на вход нейронной сети речевых команд.

A b s t r a c t. *Background.* It is considered a possibility application of artificial neural networks for voice recognition in voice control applications. *Materials and methods.* The applied method is based on the analysis of the voice commands, neural networks, each trained on respective phonemes of a natural language. Selected segments of speech commands in parallel applied to the input of each network. In the case of the recognition of phonemes corresponding to the network emit a signal, then a group of recognized phonemes are analyzed and compared with the basic vocabulary of voice commands. *Results.* The article considers modern methods and means of voice control, the analysis of which showed the need to use phonemic decoding method in the speech recognition. It is provided, an example, of the work of separation of a voice message into its phonemes. By converting a voice command is divided into phonemes, which are the input to the neural network analysis. *Conclusions.* The proposed approach in the construction of systems increases the accuracy of voice recognition by identifying the frequency characteristics of phonemes and their subsequent neural network analysis. This increases the susceptibility of the neural network to the input data in comparison with the direct input of the neural network speech commands.

К л ю ч е в ы е с л о в а : голосовое управление, распознавания речевых команд, искусственная нейронная сеть, классификация, фонема.

К e y w o r d s : voice control, voice recognition, artificial neural network, classification, phoneme.

Обзор современных методов и средств голосового управления

Системы голосового управления занимают важное место в разработках таких гигантов ИТ-индустрии, как Google, Microsoft, IBM, Intel. Область применения систем голосового управления постоянно расширяется: только в европейском сообществе объем продаж систем голосового управления составляет несколько миллиардов долларов [1]. Решение задачи распознавания речевых команд является центральным элементом системы голосового управления и одним из самых приоритетных в направлениях исследования искусственного интеллекта. Типичная структурная схема системы голосового управления приведена на рисунке 1.

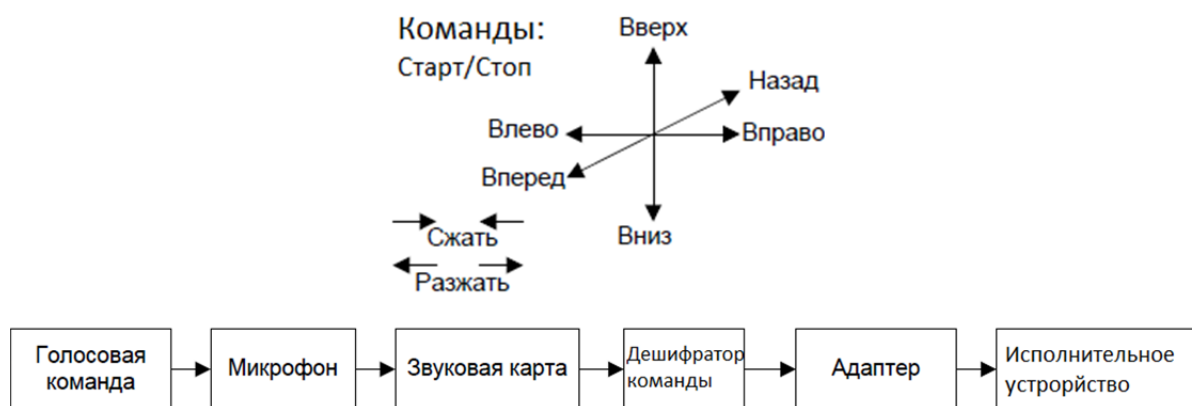


Рис. 1

Как следует из анализа рис. 1, процесс голосового управления включает четыре основных действия:

- *регистрация* речевой команды, реализуемая с помощью микрофона и звуковой карты персонального компьютера;
- *обработка и распознавание* речевой команды, реализуемые с помощью дешифратора команды;
- *исполнение* речевой команды, реализуемое с помощью исполнительного механизма.

Кратко опишем эти действия. На этапе регистрации речевая команда в виде звукового потока данных через микрофон поступает на вход звуковой карты, в которой стандартными средствами осуществляется фильтрация и аналого-цифровое преобразование (АЦП). Критерием фильтрации является изменение уровня громкости. Известно, что во время произношения речевых команд громкость постоянно изменяется, например, гласные звуки громче согласных, при произношении человек делает паузы между слогами. Таким образом, по колебаниям уровня громкости можно отделить речь от шума. При фильтрации речи от шума весь спектр воспринимаемых звуков делится на частотные диапазоны – каналы. В каждом из каналов находится анализатор громкости, отличающий речь от шума, и если в каком-то из каналов появляется звук, по характеристикам похожий на шум, то усиление в этом канале уменьшается. Если же характеристики звука говорят о том, что это речь, то усиление достигает необходимого уровня.

Полученный после фильтрации достаточно «чистый» поток полезной информации поступает на вход АЦП. Количество разрядов АЦП n определяется по формуле

$$D = 6n + 1,8,$$

где $D = 50$ дБ – динамический диапазон (в дБ), изменяющийся от шепота (20 дБ) до громкого разговора (70 дБ);

Очевидно, что обработка и распознавание речевой команды – это основные действия, определяющие функциональные возможности системы голосового управления. Обработка и распознавание речевой команды осуществляются цифровыми средствами обработки сигналов. Разработка эффективной системы голосового управления в настоящее время является важной задачей, требующей создания методов, позволяющих получать высокую достоверность распознавания речевых команд [2, 3].

Предлагаемый подход к построению систем голосового управления

Целью настоящей статьи является оценка применения искусственных нейронных сетей (НС) для распознавания речевых команд.

Для распознавания речевых команд используют различные методы детектирования команд (ДК) [4–6]. При этом алгоритм ДК обеспечивает классификацию сегментов речевого сигнала по типу «речь» или «не речь». В большинстве случаев используют простые и быстрые алгоритмы, построенные на основе пороговых сравнений кратковременных энергий, количества переходов через ноль, корреляционных параметров, энергий спектральных подполос и т.п. На практике чаще имеют дело с нестационарными фоновыми шумами (паразитные хлопки, шелчки и др.), иногда – с шумами значительной интенсивности, например, шум в кабине самолета, автомобиля. В этих случаях задача правильной сегментации речевого сигнала на команды значительно усложняется [7]. Установлено, что простой детектор речевой активности на основе пороговой классификации не способен достоверно детектировать команду.

Задача распознавания речевых команд схожа с задачей классификации, поэтому для решения поставленной задачи наиболее подходят НС, решающие задачи классификации данных [8, 9]. Одной из таких структур является сеть Кохонена, которая может распознавать кластеры в данных, а также устанавливать близость классов [10]. Таким образом, можно улучшить понимание структуры данных, чтобы затем уточнить нейросетевую модель. Если в данных распознаны классы, то их можно обозначить, после чего сеть сможет решать задачи классификации. Сети Кохонена можно использовать и в тех задачах классификации, где классы уже заданы, тогда преимущество будет в том, что сеть сможет выявить сходство между различными классами и должна будет отнести, к какому классу относятся входные данные.

Авторами предлагается алгоритм распознавания речевых команд на основе нейросетевого анализа фонем как минимальных смысловых различительных единиц языка. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем: в системе голосового управления реализуется N НС, каждая из которых обучена на соответствующие фонемы естественного языка. Выделенные сегменты речевых команд параллельно подаются на вход каждой из обученных на «свою» фонему НС. В случае распознавания фонемы соответствующая НС выдаст сигнал, и распознанная фонема будет помещена в стек фонем. Стек работает по принципу *FIFO* (*first in – first out*). Группа распознанных фонем анализируется и сравнивается с базовым словарем речевых команд. При совпадении группы распознанных фонем с командой из базового словаря речевых команд, принимается решение о выполнении речевой команды, и она подается на исполнение исполнительному механизму. На основе вышесказанного авторами разработан алгоритм распознавания речевых команд, схема которого приведена на рис. 2.

Для того чтобы можно было подавать большой набор данных напрямую на вход НС, необходимо провести предварительную обработку этих данных с целью уменьшения их объема, а также для выявления участков, по которым будет производиться классификация.

Для этого голосовое сообщение разделяется на составляющие – фонемы, по которым можно выделить пики возрастания и спада уровня сигнала. Предварительная обработка производится в системе MATLAB [9] с помощью функции *envelope()*, которая возвращает верхние и нижние пределы входной последовательности, от величины его аналитического сигнала. Аналитический сигнал находится путем дискретного преобразования Фурье и преобразования Гильберта. Используемая функция *envelope()* сначала удаляет среднее значение, а затем добавляет его обратно после вычисления максимальных и минимальных значений.

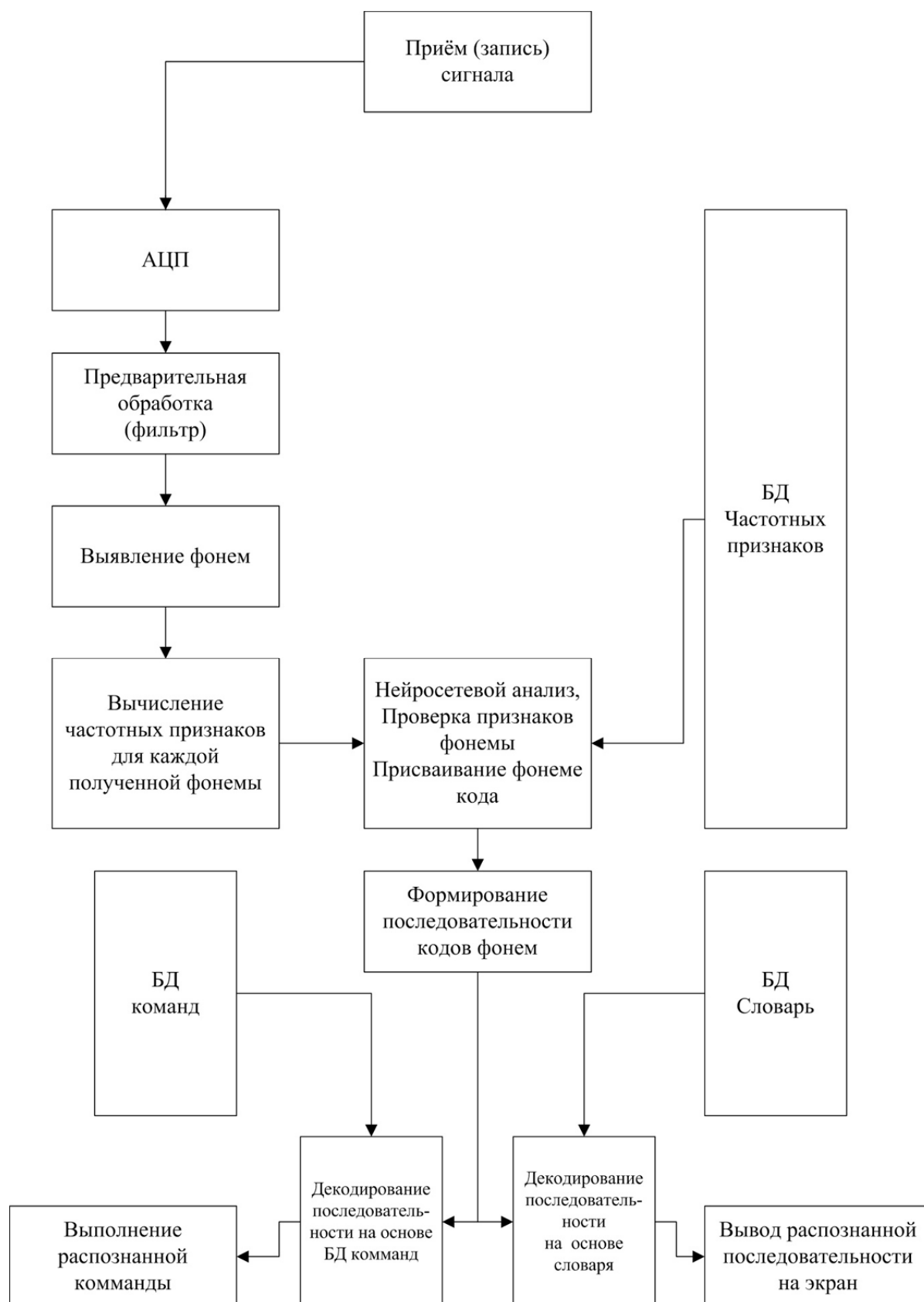


Рис. 2

Исходный сигнал речевой команды «вправо» (см. рис. 1), «оцифрованный» частотой дискретизации 8 кГц, показан на рис. 3.

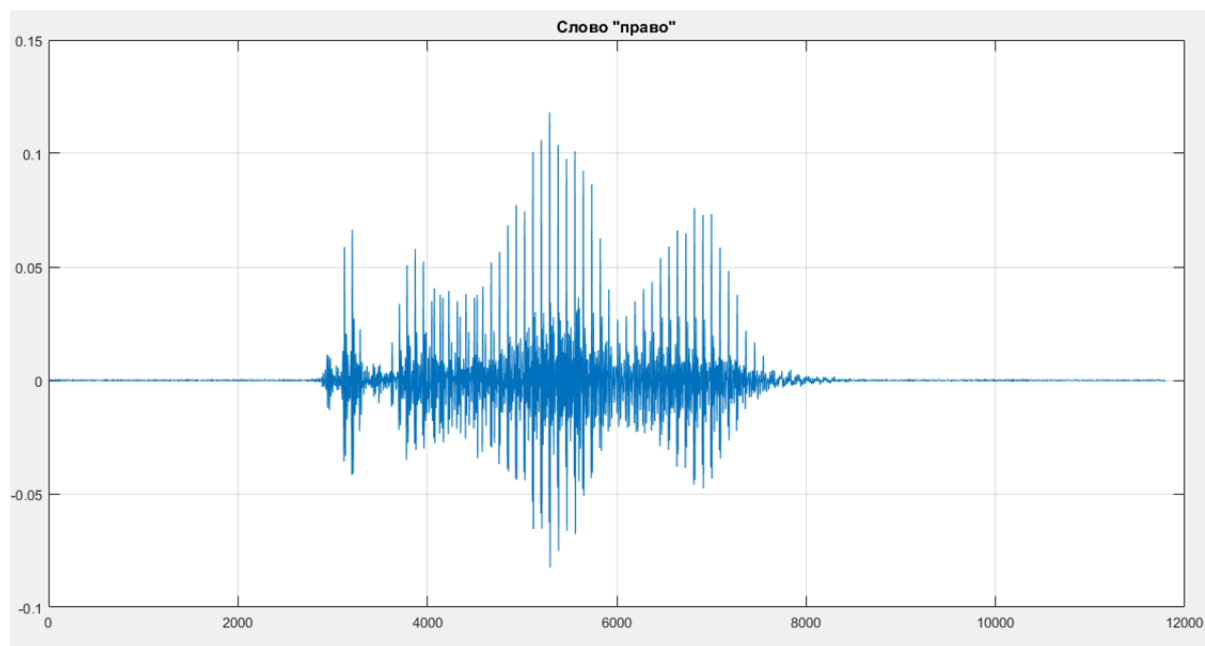


Рис. 3

Затем выделяется огибающая сигнала речевой команды. Первая огибающая строится на среднеквадратичных значениях сигнала. При использовании функции

envelope(nsignal,ceil(length(nsignal)/27.2),'rms');

получается огибающая сигнала речевой команды, представленная на рис. 4.

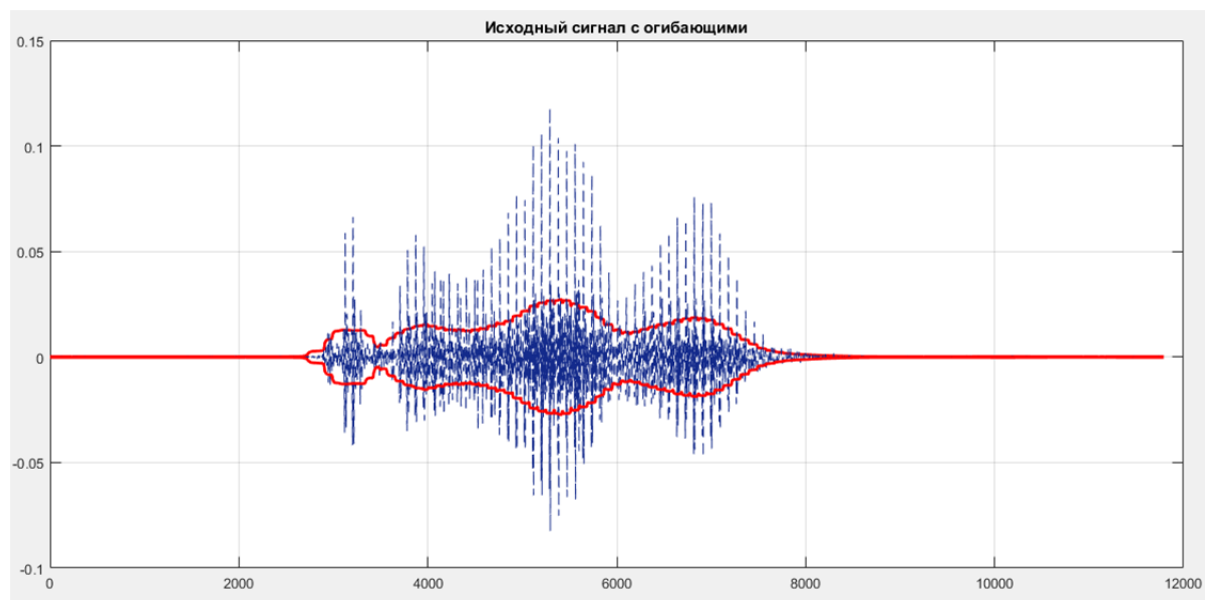


Рис. 4

Затем находится вторая огибающая сигнала речевой команды, которая строится по пикам полученной ранее огибающей. При использовании функции

envelope(up,ceil(length(nsignal)/12.2),'peak');

получается огибающая, представленная на рис. 5.

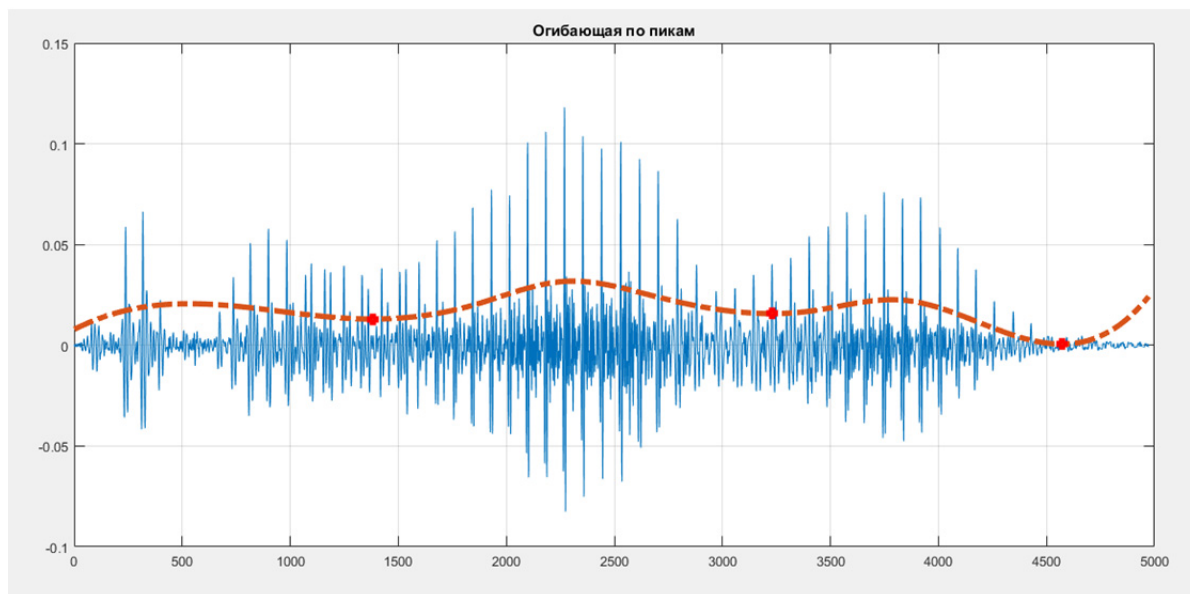


Рис. 5

На рис. 6 точками отмечены координаты, по которым будет происходить разделение на составляющие, т.е. выделение фонем, по которым будет происходить классификация голосового сообщения. Пример работы программы разделения голосового сообщения на составляющие фонемы представлен на рис. 6.

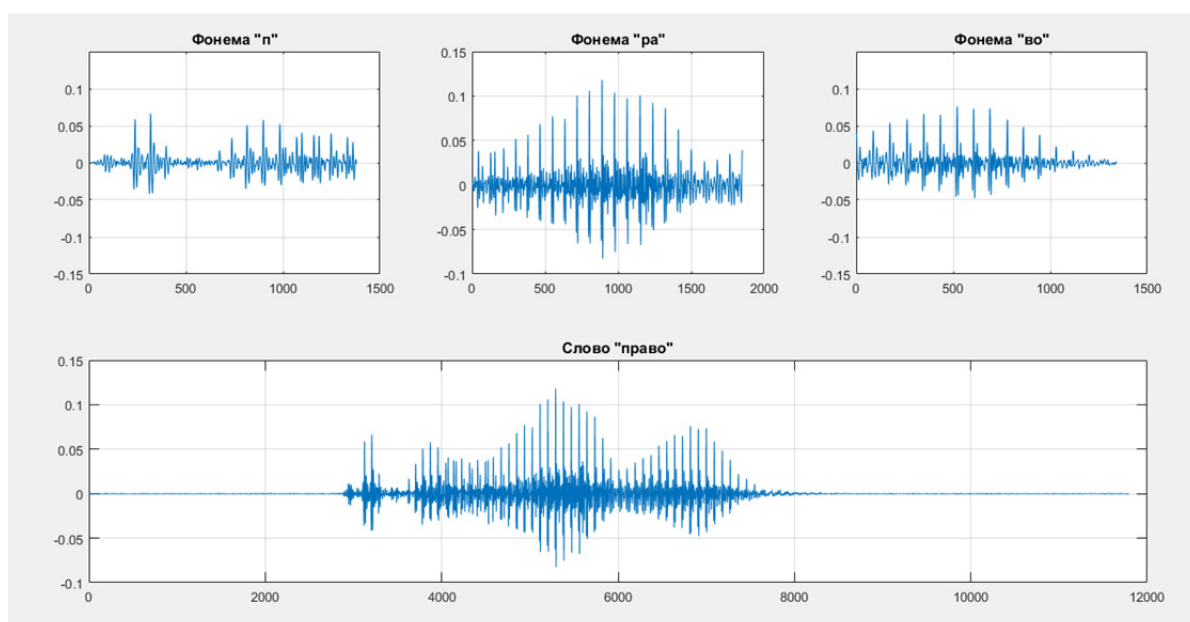


Рис. 6

В результате указанного преобразования речевая команда разделяется на фонемы, являющиеся входными данными для нейросетевого анализа.

Заключение

Проведен критический анализ современных методов и средств голосового управления, который показал необходимость использования метода фонемного декодирования при распознавании речевых команд.

Предлагаемый авторами подход при построении систем голосового управления повышает достоверность распознавания речевых команд за счет выявления частотных признаков

фонем и последующего их нейросетевого анализа. При этом повышается восприимчивость нейронной сети к входным данным по сравнению с непосредственной подачей на вход нейронной сети речевых команд.

Библиографический список

1. Schuster, M. Speech Recognition for Mobile Devices at Google / M. Schuster // LNCS. – 2010. – Vol. 6230. – P. 8–10.
2. Козлов, В. В. Определение параметров гармонических сигналов в условиях действия шумов и помех на основе метода разложения сигнала на собственные числа / В. В. Козлов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/113-10860>.
3. Козлов, В. В. Исследование погрешности определения параметров гармонического сигнала на основе метода разложения на собственные числа / В. В. Козлов, Б. Н. Маньжов, Е. А. Ломтев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 50–55.
4. Пат. 2466468 Российская Федерация. Система и способ распознавания речи / Кочаров Д. А., Хомяков А. Б. – заявл. 30.06.2011 ; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31.
5. Pat. US 8175883 B2, Int. C1 G10L21/00 (2006.01). Speech recognition system and method / Inventor: Grant R., Gregor P. – Assignee: Nuance Communications Inc. – Pub. Date 08.05.2012.
6. Вишнякова, О. А. Алгоритм фонемной сегментации на основе анализа скорости изменения энергии дискретного вейвлет-преобразования / О. А. Вишнякова, Д. Н. Лавров // Информационные технологии. – 2011. – № 4. – С. 146–152.
7. Савченко, В. В. Распознавание речевых команд методом фонетического декодирования слов с подавлением фонового шума / В. В. Савченко // Информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 76–80.
8. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика : пер. с англ. / Ф. Уоссермен. – М. : Мир, 1992. – 118 с.
9. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин ; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М. : Диалог-МИФИ, 2002. – 496 с.
10. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.

Бердибаева Гульмира Куанышбаевна

докторант,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22)
E-mail: horli@mail.ru

Berdibaeva Gul'mira Kuanyshbaevna

doctoral student,
Kazakh National Technical University
named after K. I. Satpayev
(22 Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Бодин Олег Николаевич

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

Громков Николай Валентинович

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

Gromkov Nikolay Valentinovich

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

Козлов Валерий Валерьевич

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

Ожикенов Касымбек Адилбекович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой робототехники
и автоматизации оборудования,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22)
E-mail: horli@mail.ru

Пижонков Ярослав Андреевич

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

Kozlov Valeriy Valer'evich

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

Ozhikenov Kasymbek Adilbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of robotics and automation
equipment,
Kazakh National Technical University
named after K. I. Satpayev
(22 Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Pizhonkov Yaroslav Andreevich

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

УДК 004.934

Применение искусственных нейронных сетей для распознавания речевых команд /
Г. К. Бердибаева, О. Н. Бодин, Н. В. Громков, В. В. Козлов, К. А. Ожикенов, Я. А. Пижонков // Изме-
рение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 77–84.

УДК 612.173; 536.758

*О. Н. Бодин, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных,
Ф. К. Рахматуллов, А. С. Сергеенков, М. Н. Крамм*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕРДЦА

*O. N. Bodin, V. G. Polosin, A. G. Ubiennykh,
F. K. Rakhmatullov, A. S. Sergeenkov, M. N. Kramm*

MODELING AND VISUALIZATION OF THE ELECTRICAL ACTIVITY OF THE HEART

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование электрической активности сердца на основе модели Алиева – Панфилова и визуализация распространения волны возбуждения в сердечной мышце в течение кардиоцикла. **Материалы и методы.** Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды в области неинвазивной кардиодиагностики и математической физики. В ходе исследований проанализированы методы математического моделирования электрических процессов в миокарде. При проведении исследований использовались методы кардиологии, численного дифференцирования и информационных систем. **Результаты.** Построена и исследована модель распространения возбуждения в сердечной мышце, проведен анализ параметров модели, получен профиль импульса возбуждения модели Алиева – Панфилова, осуществлена визуализация электрической активности сердца в течение кардиоцикла. **Выводы.** Полученные результаты моделирования и визуализации электрической активности сердца позволят повысить эффективность диагностики сердечно-сосудистой системы пациента.

A b s t r a c t. Background. The aim is to study the electrical activity of the heart based on the Aliev – Panfilov model and visualization of the propagation of excitation waves in the myocardium during cardiac. **Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of research works made in the field of non-invasive cardio diagnosis and the mathematical physics. The studies analyzed the methods of the mathematical modeling of electrical processes in the myocardium. In conducting research were used methods cardiology, numerical differentiation and information systems. **Results.** Constructed and investigated a model of the propagation of excitation in the heart muscle, the analysis of the model parameters, obtained by the excitation pulse profile Aliev-Panfilov model, performed visualization of electrical activity of the heart during the cardiac cycle. **Conclusions.** The results of modeling and visualization of the electrical activity of the heart will improve the diagnostic efficiency of the cardiovascular system of the patient.

К л ю ч е в ы е с л о в а: неинвазивная кардиодиагностика, электрическая активность сердца, модель Алиева – Панфилова, математическое моделирование.

Key words: noninvasive, diagnostics of heart, the electrical activity of the heart, Aliev-Panfilov model, mathematical modeling.

Изучение электрической активности сердца (ЭАС) по сигналам стандартных электрокардиографических отведений остается одной из фундаментальных проблем теоретической и практической электрокардиографии. Деятельность сердца носит автоволновый, колебательный характер, связанный со спонтанным возникновением импульсов возбуждения в синусовом узле. Сигналы стандартных отведений электрокардиограммы (ЭКГ) пациента фиксируют три волны ЭАС: две волны возбуждения в предсердиях (Р зубец на ЭКГ) и желудочках (QRS комплекс на ЭКГ) и одна волна расслабления желудочков (Т зубец на ЭКГ).

Моделирование ЭАС имеет большое значение, поскольку диагностические признаки привлекаются врачом-кардиологом как непосредственно при анализе кардиографической информации пациента, так и при анализе косвенных параметров, определяемых на основе модели электрических процессов в миокарде. Использование результатов моделирования ЭАС является *условием повышения* эффективности диагностики сердечно-сосудистой системы (ССС).

Моделирование распространения возбуждения в сердечной мышце

В рамках концепции компьютерной диагностики ССС электрическая активность сердца представлена рядом моделей:

- моделями иннервации сердца, включая модель кардиостимуляции [1];
- ионными и автоволновыми моделями распространения возбуждения в сердце [1];
- моделями эквивалентного электрического генератора сердца [2].

В работе рассматриваются модели второй группы (ионные и автоволновые). С позиций функциональной диагностики наименьшим неделимым элементом ССС является клетка миокарда, электрическая активность которой определяет ЭАС. Форма трансмембранного потенциала действия (ТМПД) клетки миокарда у каждого отдела сердца различна. Исторически *первой* математической моделью, описывающей электрическую активность мембраны, является модель **Ходжкина – Хаксли** (Hodgkin – Huxley) [3]. Модель Ходжкина – Хаксли описывает скорость распространения импульса возбуждения, правильно воспроизводит его форму, учитывает порог срабатывания возбуждения, рефрактерность и аккомодацию, воспроизводит периодику Венкебаха [4]. Применительно к процессам распространения возбуждения модель Ходжкина – Хаксли в значительной мере реализует те цели, которые преследует математическое моделирование вообще: на основании небольшого числа исходных постулатов количественно описать и объяснить достаточно широкий круг явлений, прежде воспринимавшихся как несвязанные между собой. В этом смысле модель Ходжкина – Хаксли близка к таким физическим моделям, как уравнения Максвелла, которые дают единое описание разнообразных электрических и магнитных явлений [5].

В ходе дальнейшего развития математического моделирования и исследований модели Ходжкина – Хаксли были предложены ее различные модификации:

- **Б. Франкенхаузером** (B. Frankenhaeuser) предложена модификация уравнений Ходжкина – Хаксли, соответствующая распространению возбуждения в миелинизированных волокнах [6];
- **Д. Ноблом** (D. Noble) предложена модификация уравнений Ходжкина – Хаксли, описывающая распространение возбуждения в волокнах сердечной мышцы [7].

Упомянутые модели относятся к ионным моделям распространения возбуждения. Они точно воспроизводят большинство основных свойств сердечной ткани, включая фазы деполяризации и реполяризации, динамические изменения ионной концентрации и т.д. Однако из-за излишней громоздкости ионные модели не подходят для моделирования ряда важных особенностей сердечной деятельности, например сердечных аритмий. В этом случае используются автоволновые модели распространения возбуждения.

Наиболее известными автоволновыми моделями распространения возбуждения в сердце являются модели **Винера – Розенблюта**, **Фитц Хью – Нагумо**, **Зимана**, **Алиева – Панфилова** [1]. Модель Винера – Розенблюта задает определенное поведение волн возбуждения в сердце, в основу этой модели положены автоволновые аксиомы [8]. Она объясняет сердечные аритмии, но так как является аксиоматической, то не устанавливает количественные соотно-

шения между параметрами модели и физиологическими параметрами миокарда. Модель ФитцХью – Нагумо является развитием автоволнового подхода и представляет собой упрощенную модель, воспроизводящую основные свойства волн возбуждения в мембране нейрона. Данная модель построена на основе модели Ходжкина – Хаксли. Она содержит две переменные: быструю переменную u , соответствующую мембранному потенциалу в полной модели, и медленную переменную v , характеризующую свойства среды. Свойства модели позволяют исследовать спиральные волны. Модель Зимана предназначена для учета различной крутизны переднего и заднего фронтов импульса возбуждения. Модель описывается тремя переменными, что является необходимым условием для обеспечения различной крутизны фронтов.

Модель Алиева – Панфилова предназначена для упрощенного описания волн возбуждения в сердечной мышце. Модель содержит две переменные: быструю переменную u , соответствующую мембранному потенциалу, и медленную переменную v , характеризующую свойства среды. При этом связи между клетками миокарда – точками автоволновой среды (сердечной мышцы) – описываются диффузионными членами уравнений, а динамика отдельной клетки миокарда – реакционными нелинейными членами уравнений. Уравнения модели Алиева – Панфилова имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -ku(u-a)(u-1) - uv + \Delta u; \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\left(\varepsilon_0 + \frac{\mu_1 v}{u + \mu_2}\right)(v + ku(u-a-1)),\end{aligned}\quad (1)$$

где u, v, t – безразмерные переменные; $\varepsilon, k, a, \mu_1, \mu_2$ – параметры модели, причем параметр ε предполагается малым: $\varepsilon \ll 1$. Состояние равновесия модели: $u_0 = 0, v_0 = 0$.

Фактические трансмембранный потенциал (E) и время (t_Φ) могут быть получены из модели по формулам:

$$E = (100u - 80) [mV], t_\Phi = 12,9t [ms].$$

Другое деление моделей электрической активности сердца – концептуальные и детальные (именно их в англоязычной литературе называют ионными) [1]. Модели первой группы описывают суть, концепцию явления, отличаются простотой в понимании и применении, низкой требовательностью к вычислительным ресурсам. Все рассмотренные выше автоволновые модели распространения возбуждения в сердце являются концептуальными. Однако количественно описать динамику мембранного потенциала эти модели не могут, поскольку в клетке кардиомиоцита он формируется согласованной работой более десятка различных ионных токов. Для этого предназначены детальные (ионные) модели, которые содержат большое число (до нескольких десятков) дифференциальных уравнений и требуют для своей реализации значительных вычислительных затрат.

Непосредственное решение уравнений (1) типа «реакция-диффузия» с нелинейным реакционным членом – сложная математическая задача. Подобные задачи описываются дифференциальными уравнениями в частных производных с дополнительными уравнениями, выражающими граничные и начальные условия. Нахождение точного аналитического решения, к сожалению, возможно лишь для весьма ограниченного круга одномерных задач при использовании целого ряда допущений. Например, до сих пор неизвестно их точных решений в виде спиральных волн. Для решения подобных уравнений в случае нескольких измерений используют численные методы, позволяющие преобразовать дифференциальные уравнения или их системы в системы алгебраических уравнений. Точность решения определяется шагом координатной сетки, количеством итераций и разрядной сеткой компьютера [9].

Для решения задачи моделирования распространения возбуждения в сердечной мышце необходимо:

- построить численную схему для решения модели распространения возбуждения в сердечной мышце;
- исследовать решения модели распространения возбуждения в сердечной мышце и провести анализ параметров модели.

Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений, применимым для широкого класса уравнений математической физики, является метод конечных разностей (или метод сеток) [10].

Начальные и граничные условия для системы уравнений модели Алиева – Панфилова заменяются разностными начальными и граничными условиями для сеточной функции. Начальные и граничные условия задаются в виде

$$u(x, y, t+1) = C + \alpha u(x, y, t) + \beta u(x + s_x, y, t) + \gamma u(x, y + s_y, t). \quad (2)$$

Структура уравнения (2) позволяет задавать основные типы граничных и начальных (для этого надо указать ограниченный временной интервал) условий.

Для того чтобы при уменьшении шага сетки решение сходилось к решению модели Алиева – Панфилова, необходимо выполнение условия устойчивости. Модель Алиева – Панфилова представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа. Для параболических уравнений с частными производными условие устойчивости разностной схемы в случае использования равномерной сетки имеет вид

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{4}. \quad (3)$$

В результате исследования численной модели для решения задачи распространения возбуждения в сердечной мышце получен профиль импульса возбуждения модели Алиева – Панфилова, представленный на рис. 1.

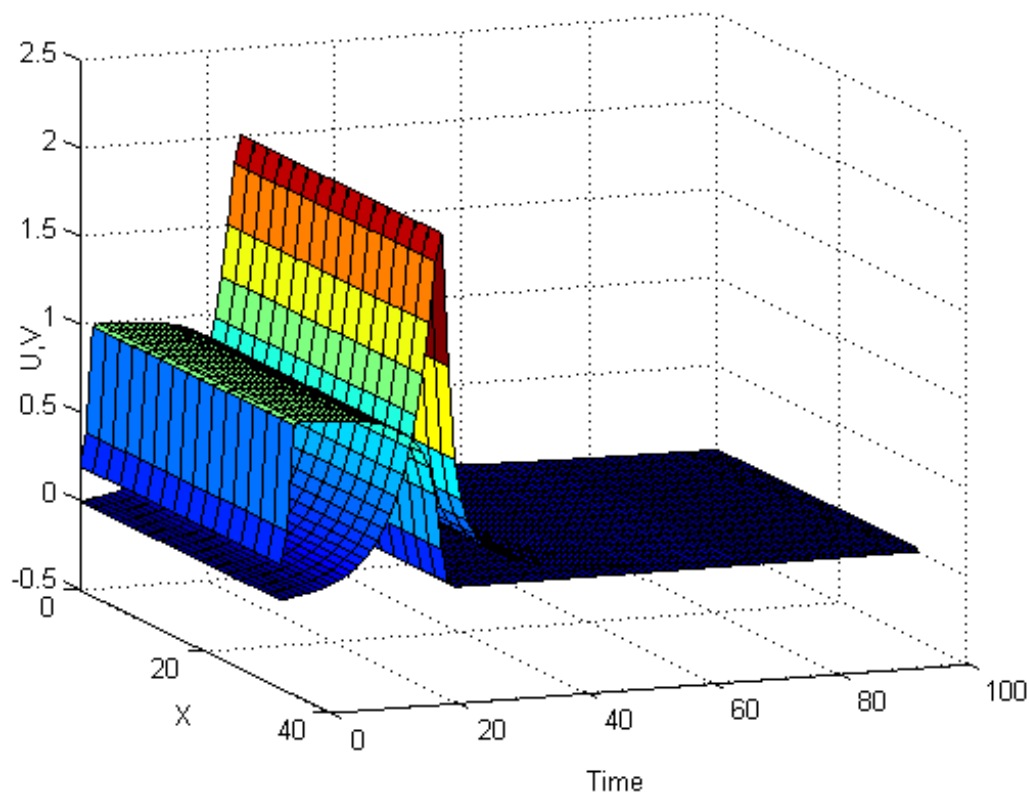


Рис. 1. Профиль импульса возбуждения модели Алиева – Панфилова

Проведенное исследование модели Алиева – Панфилова показало зависимость переменных u и v от параметров модели. Из анализа модели следует, что для возникновения импульса возбуждения необходимо для клеток водителей ритма в качестве начальных условий модели задавать:

$$u_0 > a. \quad (4)$$

***Изменение формы волны распространения возбуждения
при наличии поврежденного участка миокарда***

Для целей функциональной диагностики необходимо представление процесса распространения возбуждения при наличии поврежденного участка миокарда. Для определения формы волны распространения возбуждения (рис. 1) при наличии поврежденного участка миокарда на сетку решений модели Алиева – Панфилова помещаются области с отличающимися от (4) начальными условиями. Результаты моделирования волны распространения возбуждения при наличии поврежденного участка миокарда приведены на рис. 2–6.

На рис. 2 изображено направление распространения волны возбуждения.

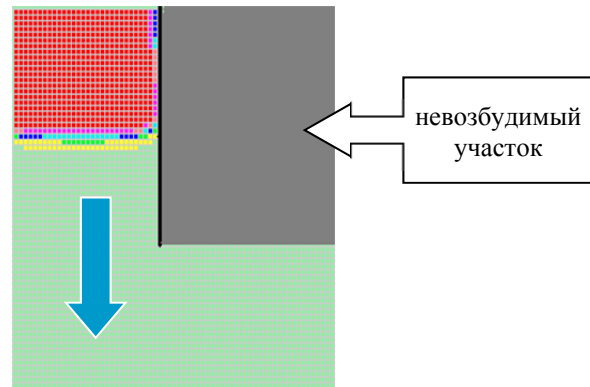


Рис. 2. Распространение волны возбуждения

Предположим, что в момент, когда волна возбуждения огибает заторможенную область, последняя выходит из заторможенного состояния (рис. 3). При этом волна возбуждения начнет распространяться внутрь вышедшей из торможения области.

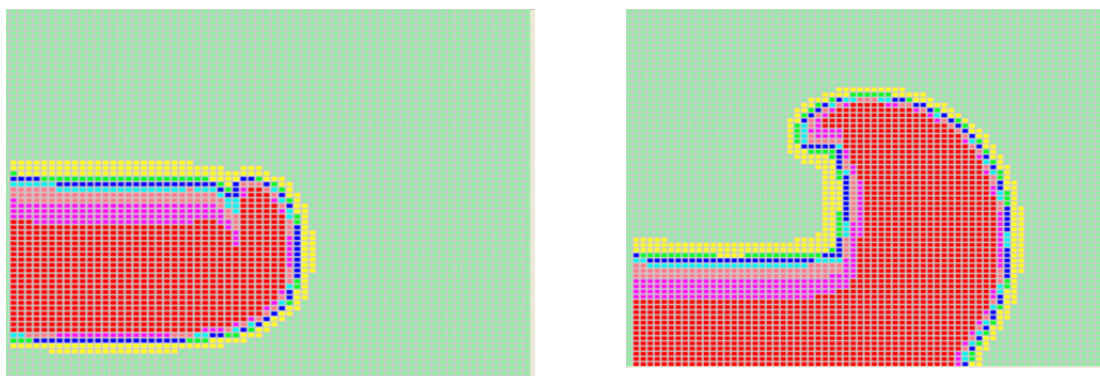


Рис. 3. Огибание волной возбуждения рефрактерного участка

Если размеры этой области достаточно велики, то волна возбуждения, пройдя по ней, обогнет рефрактерный участок и начнет его периодически огибать. Такие спирали получили название ревербераторов. Профили импульса возбуждения и возникновение ревербератора для различных параметров модели Алиева – Панфилова приведены на рис. 4.

Таким образом, использование в обобщенной модели ЭАС автоволновой модели Алиева – Панфилова и изменение параметров этой модели при моделировании волны распространения возбуждения позволяет осуществить для целей функциональной диагностики:

- моделирование различных режимов распространения возбуждения в сердце;
- изменение формы ТМПД для различных анатомических частей сердца;
- изменение скорости распространения возбуждения по миокарду;
- построение «электрического портрета» сердца пациента.

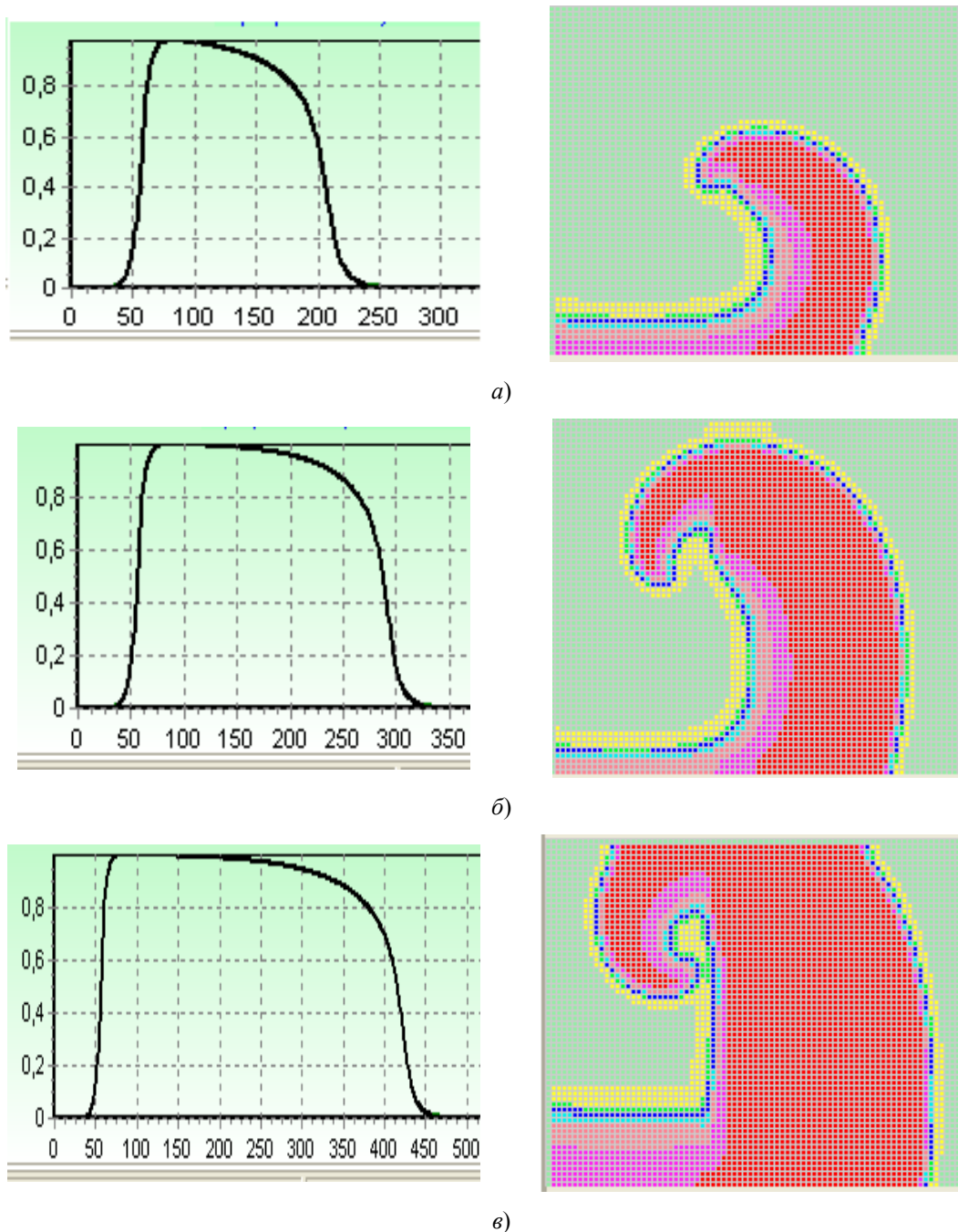


Рис. 4. Профили импульса возбуждения и возникновение ревербератора для различных значений параметров модели Алиева – Панфилова:
 а – параметры модели: $\epsilon_0 = 0,01$; $k = 8$; $a = 0,15$; $\mu_1 = 0,2$; $\mu_2 = 0,3$;
 б – параметры модели: $\epsilon_0 = 0,002$; $k = 8$; $a = 0,15$; $\mu_1 = 0,2$; $\mu_2 = 0,3$
 в – параметры модели: $\epsilon_0 = 0,002$; $k = 8$; $a = 0,1$; $\mu_1 = 0,2$; $\mu_2 = 0,3$

Визуализация электрической активности сердца

При визуализации моделирования распространения возбуждения учитывается пространственно-временная организация процесса возбуждения в миокарде. Первоначально проводится визуализация моделирования распространения возбуждения в миокарде на плоскости. Для этого поверхность модели сердца проецируется на плоскость, т.е. получается «развертка» поверхности модели сердца пациента на сетку решений модели Алиева – Панфилова (рис. 5).

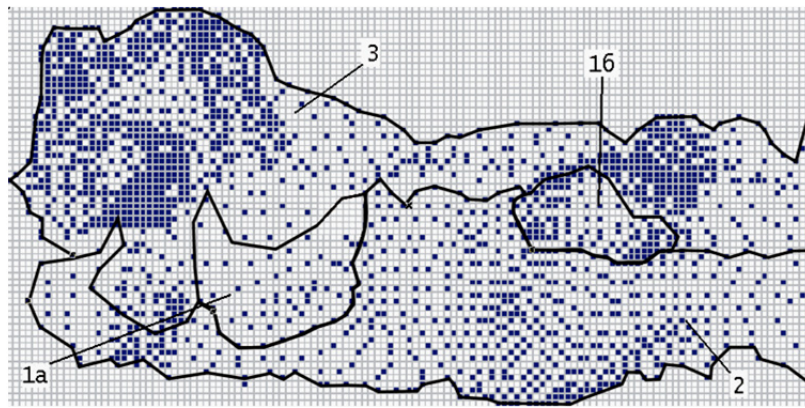


Рис. 5. Проекция поверхности сердца на плоскость

Область точек предсердий на рис. 5 обозначена цифрой 1. Область точек желудочков обозначена цифрой 2. Соответственно моделирование распространения возбуждения по предсердиям осуществляется в области 1, а по желудочкам – в области 2.

Суть проекции состоит в том, чтобы наилучшим образом «спроектировать» реальную поверхность модели сердца на плоскость, учитывая при этом все искажения и сводя их к минимуму. Главное при построении «развертки» поверхности модели сердца пациента на сетку решений модели Алиева – Панфилова, чтобы каждой исходной точке на поверхности модели сердца пациента соответствовала только одна точка на сетке решений модели Алиева – Панфилова.

Для визуализации процесса распространения возбуждения используется трехмерная модель сердца пациента и полученное в результате моделирования распределение ТМПД на поверхности сердца. В соответствии со шкалой цветового кодирования каждой вершине модели сердца присваивается цвет, соответствующий значению потенциала в этой точке. Поверхность сердца состоит из треугольных пластин, и цвет этих пластин получается путем интерполяции цветов вершин. Для этого может использоваться метод Гуро, линейно интерполирующий значения цвета в вершинах многоугольных граней объекта [11]. На рис. 6 приведена визуализация возбуждения сердца.

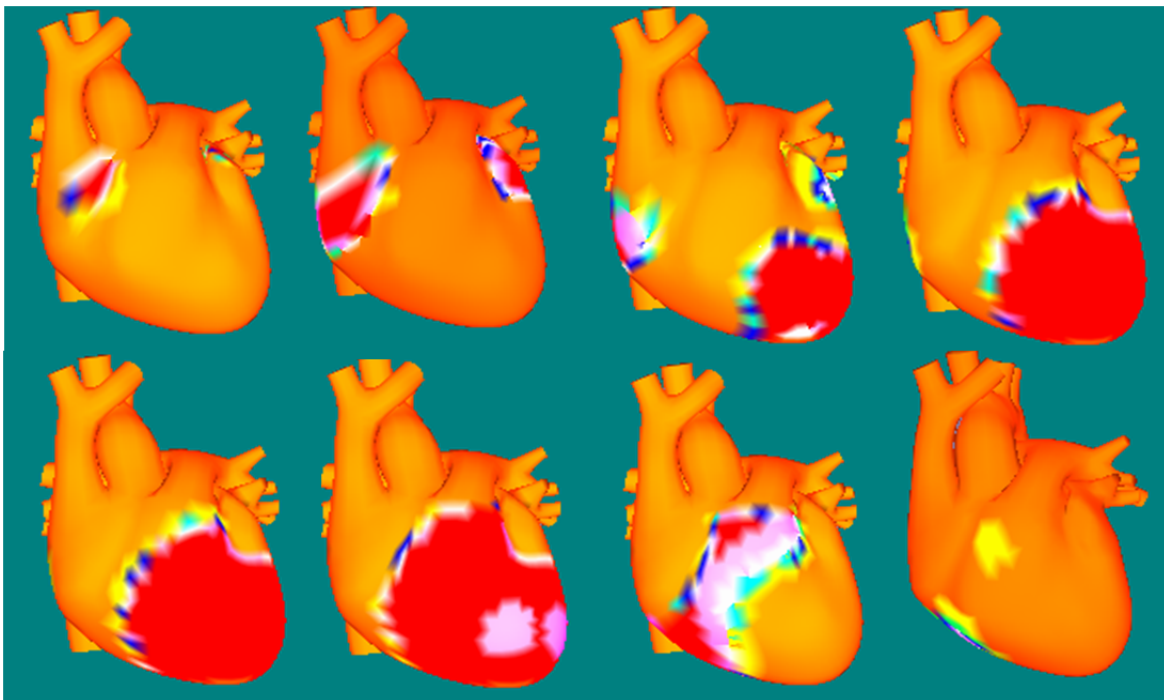


Рис. 6. Визуализация возбуждения сердца в течение кардиоцикла

На рис. 6 показаны распределения ТМПД по поверхности сердца, соответствующие следующим стадиям возбуждения миокарда (слева направо сверху вниз):

- начало поляризации правого предсердия;
- полная поляризация правого предсердия, начало поляризации левого предсердия;
- окончание поляризации предсердий, начало поляризации желудочков от верхушки сердца;
- поляризация желудочков;
- окончание поляризации желудочков;
- начало деполяризации желудочков;
- деполяризация желудочков;
- окончание деполяризации желудочков.

Таким образом, на основе реалистичного трехмерного изображения модели сердца пациента, построенной по данным анализа электрокардиографии и флюорографии, осуществляется моделирование и визуализация распространения волны возбуждения в течение кардиоцикла.

Библиографический список

1. Алиев, Р. Р. Концептуальные и детальные математические модели электрической активности миокарда : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Р. Р. Алиев. – Пушкино, 2007. – 46 с.
2. Титомир, Л. И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – М. : Наука, 1999. – 448 с.
3. Hodgkin, A. L. A quantitative description of membrane current and its application conduction and excitation in nerve / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley // J. Physiol. – 1952. – Vol. 117. – P. 500–544.
4. Кечкер, М. И. Руководство по клинической электрокардиографии / М. И. Кечкер. – М. : 2000. – 395 с.
5. Фомин, С. В. Математические проблемы в биологии / С. В. Фомин, М. Б. Беркинблит. – М. : Наука, Глав. ред. Физматлит, 1973. – 200 с.
6. Frankenhaeuser, B. The action potential in the myelinated nerve fibre of *Xenopus Laevis* as computed on the basis of voltage clamp data / B. Frankenhaeuser, A. Huxley // J. Physiol. – 1964. – Vol. 134, № 2. – P. 302–315.
7. Noble, D. A modification of the Hodgkin – Huxley equations applicable to Purkinje fibre action and pace – maker potentials / D. Noble // J. Physiol. – 1962. – Vol. 160. – P. 317–352.
8. Антонов, В. Ф. Биофизика мембран / В. Ф. Антонов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 4–12.
9. Рындин, Е. А. Методы решения задач математической физики / Е. А. Рындин. – М. : Наука, 2003. – 119 с.
10. Годунов, С. К. Разностные схемы (введение в теорию) : учеб. пособие / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М. : Наука, 1973. – 400 с.
11. Херн, Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL : пер. с англ. / Д. Херн, М. П. Бейкер. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2005. – 1168 с.

Бодин Олег Николаевич

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

Полосин Виталий Германович

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

Убиенных Анатолий Геннадьевич

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

Рахматуллов Фагим Касымович

доктор медицинских наук, профессор,
заведующий кафедрой внутренних болезней,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40),
E-mail: pgu-vb2004@mail.ru

Сергеенков Антон Сергеевич

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

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет
«Московский энергетический институт»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17)
E-mail: krammmn@mail.ru

Polosin Vitaly Germanovich

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

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

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

Rakhmatullov Fagim Kasymovich

doctor of medical sciences, professor,
head of sub-department of the internal diseases,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergeenkov Anton Sergeevich

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

Kramm Mikhail Nikolaevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of fundamentals of the radiotechnics,
National Research University
«Moscow Power Engineering Institute»
(17 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

УДК 612.173; 536.758

Моделирование и визуализация электрической активности сердца / О. Н. Бодин, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных, Ф. К. Рахматуллов, А. С. Сергеенков, М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 85–93.

УДК 621.317

Б. А. Свистунов

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

B. L. Svistunov

MEASURING TRANSDUCERS FOR PARAMETRIC SENSORS USING ANALYTICAL REDUNDANCY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются измерительные преобразователи выходных величин параметрических датчиков в унифицированные сигналы, которые широко используются в информационно-измерительных и управляющих системах, в частности, для измерения состава крови и биологических растворов, являясь важнейшим узлом этих систем с точки зрения обеспечения требуемых метрологических и эксплуатационных характеристик. Важным аспектом является необходимость обеспечения независимости результата преобразования от неинформативных в данном измерительном эксперименте параметров исследуемого объекта и собственно параметрического датчика (т.е. инвариантности результата преобразования к этим параметрам и их неконтролируемым изменениям). Предметом исследования является поиск способов построения измерительных преобразователей с использованием базовых положений технической кибернетики, в частности принципа инвариантности акад. Б. Н. Петрова. **Материалы и методы.** Предложено при разработке измерительных преобразователей реализовать указанный принцип инвариантности путем организации в структуре и/или алгоритме измерительного преобразования избыточности, конкретно – аналитической. **Результаты.** Предложена обобщенная структурная схема измерительных преобразователей с избыточностью и составлена соответствующая ей математическая модель. Рассмотрены варианты реализации предложенного подхода к синтезу измерительных преобразователей. **Выводы.** Полученные теоретические результаты и опыт практического применения разработанных измерительных преобразователей различного назначения позволяют сделать вывод о перспективности использования избыточности, в частности аналитической, при построении измерительных преобразователей для параметрических датчиков, прежде всего для снижения погрешностей от влияния неинформативных параметров исследуемого объекта и датчика.

A b s t r a c t. Background. The object of the study are measuring converters of the output values of parametric sensors into unified signals, which are widely used in information-measuring and control systems, in particular, for measuring the composition of blood and biological solutions, being the most important node of these systems in terms of providing the required metrological and operational characteristics. An important aspect is the need to ensure the independence of the result of the conversion from data in this measuring experiment, the parameters of the parametric object and the actual sensor (the invariance of the result of the

conversion to these options and their uncontrolled change) the subject of the research is to find methods to build transducers with the use of the basic provisions of technical cybernetics, in particular, of the Acad. Belberov invariance principle. **Materials and methods.** Proposed with the development of transducers to implement the invariance principle by the structure and / or algorithm of measuring conversion of redundancy, specifically analytical. **Results.** A general structure of measuring converter redundancy and the corresponding mathematical Model are worked out. The considered variants of implementation of the proposed approach to the synthesis of the measuring converters. **Conclusions.** The theoretical results and the experience of practical application of the developed transducers of different purposes allow to make a **Conclusion** About the prospects of the use of redundancy, in particular, the analytical, the construction of transducers for sensors parametric primarily to reduce bias from the influence of uninformative parameters of the studied object and sensor.

К л ю ч е в ы е с л о в а: параметрический датчик, измерительный преобразователь, аналитическая избыточность.

Key words: parametric sensor, measuring transducers, analytical redundancy.

Введение

Измерительные преобразователи выходных величин параметрических датчиков в унифицированные сигналы широко применяются в различных информационно-измерительных и управляющих системах и автономных устройствах. Одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками измерительных преобразователей данного назначения, является необходимость обеспечения независимости результата преобразования по главному, информативному выходному параметру датчика, связанному нормированной зависимостью с контролируемым параметром объекта исследования (изделия, среды и др.) от ряда второстепенных, неинформативных (мешающих, паразитных) параметров объекта, самого датчика и собственно измерительного преобразователя. В научно-производственной литературе указанная задача трактуется как задача раздельного независимого измерения, а также обеспечения взаимной инвариантности результатов преобразования [1]. Пути решения сформулированной задачи предлагались и предлагаются многими учеными и научно-техническими школами и описаны в обширной литературе по данной тематике.

Одна из попыток обобщения способов построения так называемых инвариантных измерительных преобразователей (преобразователей, обеспечивающих независимость результата преобразования к неинформативным в данном измерительном эксперименте параметрам различной локализации и природы, инвариантность результата преобразования к этим параметрам) связана с применением методологии и инструментария теории систем автоматического регулирования, более конкретно – адаптивных систем координатно-параметрического управления, одного из перспективных направлений развития систем управления, которое активно развивается в Институте проблем управления РАН. Теоретическим фундаментом упомянутого направления является теория инвариантности систем автоматического управления, создание которой связано с именами советских ученых А. Г. Ивахненко, В. С. Кулебакина, А. И. Кухтенко, Б. Н. Петрова, Г. В. Щипанова и др.

Определяющая идея координатно-параметрического управления (КПУ) применительно к ее использованию для совершенствования средств измерений, в том числе измерительных преобразователей (ИП) для параметрических датчиков (ПД), заключается в реализации согласованного управления как собственно комплексом «датчик – вторичный преобразователь», так и объектом исследования [2, 3].

Применение КПУ в ИП для ПД приводит к усложнению алгоритмов измерительного преобразования и структур ИП, введению дополнительных узлов и/или тактов преобразования, т.е. созданию избыточности. В литературе выделяют аппаратную и аналитическую избыточность. В работе [4] аналитическая избыточность понимается как «создание на основе априорной информации математической модели ИП и ее использование для корректировки реальной функции преобразования последнего». В работе [5] аналитическая избыточность

определяется как «учет известных соотношений между сигналами нескольких датчиков или их связь с параметрами модели контролируемого технологического процесса и анализ дополнительных сигналов или дополнительных величин, например параметров и режимов цепей».

Указанные виды избыточности имеют особенности при их использовании в ИП [6–8]. Избыточность в смысле, рассматриваемом в настоящей статье, реализуется увеличением количества каналов восприятия и обработки информации, усложнением их структуры и алгоритмов функционирования с целью адаптации ИП к изменению информативных и неинформативных (в данном измерительном эксперименте) параметров исследуемого объекта (ИО) и ПД, а также к изменяющимся параметрам среды, линии связи и, в широком смысле, к изменяющимся задачам измерительного эксперимента.

Реализация аналитической избыточности в ИП

Теоретическим основанием использования аналитической избыточности, в частности в ИП, является классический принцип многоканальности акад. Б. П. Петрова. Аналитическая избыточность предполагает наличие математической модели, связывающей системой уравнений результаты итогового и промежуточных преобразований информативного сигнала в ИП [9]. Аналитическая избыточность учитывает связь параметров информативного сигнала с параметрами модели ИО и, собственно, ПД, представляемого эквивалентной электрической схемой (ЭС). Наиболее часто используется ЭС ПД в виде двухэлементной пассивной электрической цепи, что объясняется оптимальным сочетанием адекватности такой модели ИО и простоты построения ИП. Обозначим параметры ЭС как x_1, x_2 , тогда необходимо организовать в ИП не менее двух каналов распространения информативного сигнала.

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема ИП параметров двухэлементных ЭС ПД, построенного по принципу двухканальности [10] (рассмотрение наиболее простого случая не снижает общности выводов).

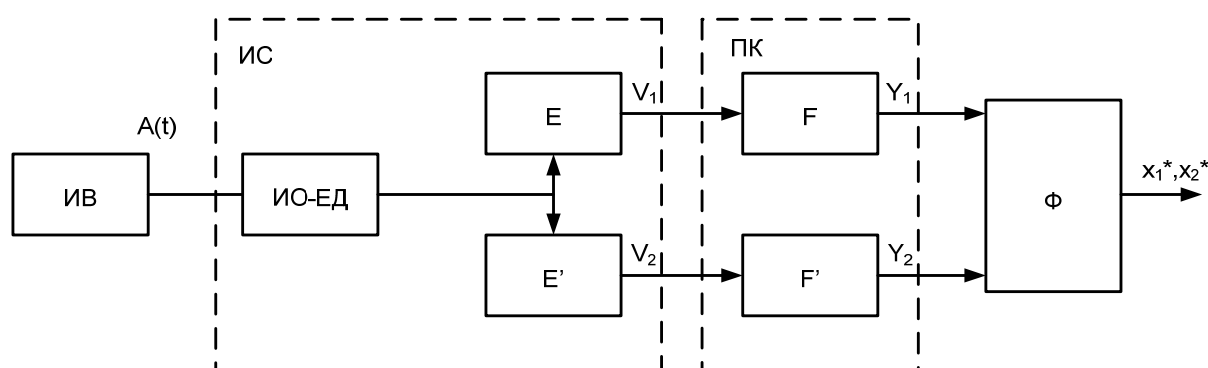


Рис. 1

На рис. 1 через E, E' обозначены операторы измерительной схемы (ИС); F, F' – операторы узлов, входящих в промежуточные каналы (ПК); $A(t)$ – возбуждающее воздействие на комплекс ИО-ПД, включаемый в измерительную схему; электрическое воздействие формируется источником воздействия (ИВ); $y_{1,2}(t)$ – выходные величины промежуточных каналов преобразования ПК, содержащие информацию об искомых параметрах $x_{1,2}$; x_1^*, x_2^* – результаты преобразования, полученные обработкой значений y_1, y_2 посредством узла с оператором Φ .

Работа ИП описывается системой операторных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} V &= E(x, A, U_1, t), \\ Y &= F(x, U_2, t), \\ X^x &= \Phi(Y, U_3, t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U_1, U_2, U_3 – управления, определяющие алгоритмы функционирования узлов ИП.

ИП должен обеспечить взаимную инвариантность результатов преобразования.

Условием, при котором поставленная задача решается, является неидентичность «сквозных» операторов ИС-ПК по параметрам x . Это условие реализуется путем создания асимметрии ПК. Способы обеспечения асимметрии рассмотрены, например, в [11]. Структуры промежуточных каналов ПК могут быть стационарными или адаптивными, «приспосабливающимися» к обрабатываемому сигналу, а соответственно, алгоритмы функционирования каналов – жесткими, априори заданными или гибкими. В соответствии с этим определяющим признаком выделяются две обширных группы ИП параметров ПД; обе группы используют аналитическую избыточность.

Адаптивные ИП с моделью ЭС ПД

Группа адаптивных ИП базируется на реализации в дополнительных ПК модели исследуемой ЭС (физической или математической) на основе априорной информации о ее топологии, номенклатуре и диапазонах изменения параметров из соответствующего тезауруса. С учетом оговоренной выше специфики измерения параметров пассивных ЭС практически моделируется электрический сигнал – реакция ЭС ПД на возбуждающее воздействие.

Промежуточные каналы служат для получения дополнительной информации об искоемых параметрах ЭС. Формально алгоритмы этой групп также приводят к системе уравнений вида (1); результаты преобразования получаются как решения этой системы путем проведения по заданной программе вычислительных операций со значениями промежуточных величин – выходных величин ПК. Возможность решения исходно неопределенной системы уравнений вида (1) предложено обеспечивать введением в один из параллельных каналов некоторой дополнительной калиброванной величины, являющейся моделью изменения (вариации) параметра ЭС [10]. Практически эта вариация может быть задана как энергетически – путем введения в один из ПК заданного изменения опорного сигнала, совпадающего с изменением одного из составляющих выходного сигнала измерительной схемы, так и параметрически – путем задания в ИС калиброванной вариации пассивного параметра. ПК могут быть разделены в пространстве или во времени. Очевидно, что использование временного разделения позволяет обеспечить практически полную идентичность ПК, однако обуславливает необходимость проведения по меньшей мере двух тактов преобразования (временная (алгоритмическая) избыточность). Обобщенная структурная схема ИП, реализующих данный подход (рис. 1), также предусматривает наличие в ИП по меньшей мере двух каналов, описываемых операторами F_1 и F_2 . С учетом этого базовая система уравнений (1) может быть представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} F_1 V(x_1, x_2, A, t) &= 0 \\ F_2 V(x_1, x_2, A, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $V(x_1, x_2, A, t)$ – уравнение преобразования параметров ЭС и ИО в ИС. Физически решения уравнений, входящих в систему (2), суть выходные величины ПК; по значениям этих величин, названных промежуточными, с помощью вычислений по заданной программе определяются значения искоемых параметров x_1 и x_2 . Характер промежуточных величин определяется характером преобразования в каналах, т.е. видом операторов F_1 и F_2 . Условие инвариантности результатов измерения при использовании для синтеза ИП методов рассматриваемой группы формально совпадает с условием разрешимости системы (2) относительно искоемых параметров x_1 и x_2 , формулируемым в виде неравенства тождественно нулю якобиана последней. Анализ показал, что имеются различные способы удовлетворения данному условию, обуславливающие разнообразие способов построения ИП в рамках рассматриваемого подхода. Первый способ, наиболее очевидный, состоит в задании различных по характеру операторов ПК F ; при этом вид преобразования информации в ПК различен, т.е. реализуются разнотипные уравнения промежуточного преобразования. Второй способ основан на использовании одина-

ковых по характеру операторов ПК (как правило, с временным разделением последних); при этом вид преобразования информации в ПК одинаков. Для выполнения условия инвариантности при этом необходимо, как следует из (2), реализовать различные уравнения преобразования в ИС (т.е. различные операторы E).

Из принципа двухканальности непосредственно следует, что с целью улучшения характеристик ИП наиболее целесообразно осуществлять разделение каналов непосредственно от входа ИП. В этом случае реализация различных операторов ПК при пространственном разделении последних приводит к необходимости использования двух отдельных ИС, а при временном разделении – одной ИС с изменяемым характером оператора. Тот и другой путь с успехом применяются для решения, например, некоторых задач измерения состава и свойств веществ, однако использование их для синтеза ИП параметров ПД существенно ограничено. Это связано с неочевидностью в настоящее время возможности одновременного включения ПД в различные ИС. Реализация ИС с изменяемым характером оператора также представляется нецелесообразной, так как необходимость функционирования ИС в различных режимах неизбежно приводит к их существенному усложнению и снижению точности. Вследствие сказанного на практике приходится ограничиваться разделением ПК. Анализ известных решений, основанных на рассмотренном принципе, показал, что построение ИП с разнотипными операторами ПК оказалось целесообразным лишь для ряда специфических задач измерения неэлектрических величин.

ИП с однотипными промежуточными каналами преобразования

Более перспективным оказывается построение ИП с одинаковыми по характеру операторами ПК (т.е. с однотипными каналами). Такие ИП используют, как правило, одну ИС с неизменным характером оператора, что существенно упрощает практическую реализацию последней.

Условие взаимной инвариантности результатов преобразования при этом может быть удовлетворено двумя путями, формально связанными с заданием: первый – количественно различных коэффициентов уравнений преобразования в ПК, второй – калиброванных приращений преобразуемых параметров ЭС ПД [11]. Первый путь непосредственно вытекает из анализа условия разрешимости исходной системы уравнений. Записывая последнюю в канонической форме

$$\left. \begin{aligned} a_{11}(D)x_1 + a_{12}(D)x_2 &= 0 \\ a_{12}(D)x_1 + a_{22}(D)x_2 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

получим данное условие в виде неравенства нулю ее определителя:

$$a_{11}(D)a_{22}(D) - a_{21}(D)a_{12}(D) \neq 0, \quad (4)$$

где $a_{ij}(D) = \sum_{k,v} m_k D^v$ – полиномы, описывающие процесс преобразования информации в ИС и

ПК. Синтез ИП, основанных на данном принципе, в качестве основного этапа включает качественно и/или количественно различное задание операторов ИС и КП.

Второй путь подразумевает задание однотипных операторов КП с одинаковыми параметрами, т.е. $a_{11}(D) = a_{21}(D)$ и $a_{12}(D) = a_{22}(D)$. Как следует из (4), решение системы (3) при этом может быть получено с помощью ее доопределения. Последнее предложено реализовать введением в один из ПК некоторой калиброванной величины Δ_0 , являющейся моделью приращения некоторого параметра ЭС (x_1 или x_2 в системе уравнений (3)). Учитывая, что последняя при сформулированных выше условиях вырождается в уравнение с двумя неизвестными, а также предполагая, что вид уравнений преобразования ПК в диапазонах, включающих x_1 , x_2 и Δ_0 , известен, алгоритм измерения для рассматриваемого случая может быть представлен в виде

$$\left. \begin{aligned} a_1(D)x_1 + a_2(D)x_2 &= 0 \\ a_1(D)\Delta_0^{x_1} &= 0 \\ \text{или} \\ a_2(D)\Delta_0^{x_2} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Таким образом, исходно неразрешимое уравнение измерения аппаратурно доопределяется. Решения системы (5) (т.е. искомые результаты преобразования) могут быть получены через промежуточные величины Θ – корни уравнений и величину Δ_0 как

$$x_1 = \Phi_1(\Delta_0, \theta_1, \theta_2); x_2 = \Phi_2(\Delta_0, \theta_1, \theta_2). \quad (6)$$

Практически калиброванное приращение Δ_0 может быть задано как энергетически – путем введения в один из каналов калиброванного сигнала A_0 в частном случае, совпадающего по форме с одной из составляющих сигнала ИС, так и параметрически – путем создания на входе ИП калиброванного приращения пассивного параметра Π_0 в частном случае, того же характера, что и один из параметров ЭС ПД π , значения которых x_1 (x_2) подлежат измерению (рис. 2).

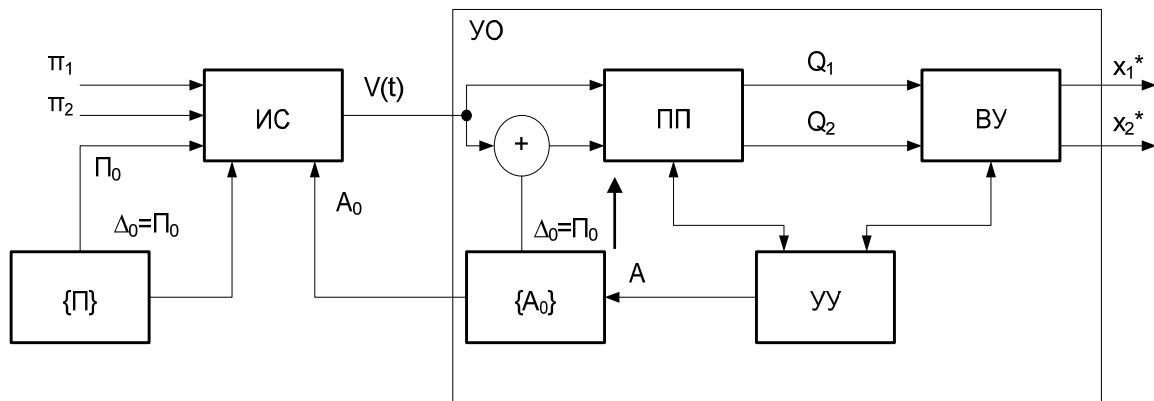


Рис. 2

Формально способ задания калиброванной величины Δ_0 , как следует из (5), безразличен, однако анализ показывает, что он во многом определяет точностные характеристики ИП. Действительно, при параметрическом задании Δ_0 («варьируемый объект») разделение каналов осуществляется непосредственно от входа ИП, что позволяет обеспечить их практически полную идентичность и тем самым существенно снизить погрешность, обусловленные различием характеристики каналов и отклонением их параметров от номинальных. При использовании энергетического доопределения сказанное справедливо лишь для узлов ИП, расположенных от выхода ИС до выхода ИП, т.е. требования к ИС более жесткие. С другой стороны, практическая реализация энергетического доопределения оказывается существенно более простой. Задание Δ_0 в виде электрического сигнала универсально, так как одно и то же возбуждающее воздействие может быть использовано при преобразовании различных параметров ЭС, включаемых в ИС одного класса; немаловажно то обстоятельство, что электрическая величина Δ_0 при этом может быть задана весьма точно.

Заключение

Разработка ИП с организацией аналитической избыточности, вводимой посредством составления математической модели ЭС ПД путем аппаратурного составления и решения системы уравнений, связывающих искомые параметры ЭС ПД и опорные параметры ИП, представляется перспективной, так как данный подход позволяет свести к минимуму и предельно

упростить аналоговые преобразования в ИП и тем самым повысить точность измерительного преобразования при сохранении, а в ряде случаев и при снижении требований к узлам ИП. При этом относительно просто реализуется высокая степень инвариантности результатов измерения. Перспективность исследований в данном направлении обусловлена также расширяющимся применением микропроцессорных узлов информационно-измерительных и управляющих систем, развитием интеллектуальных ИП.

С использованием рассмотренных выше способов разработан ряд ИП для параметрических (в частности емкостных) датчиков, ориентированных на применение в информационно-измерительных управляющих системах различного назначения [12].

Библиографический список

1. Петров, Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике. / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Наука, 1976. – 242 с.
2. Петров, Б. Н. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами / Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков. – М. : Наука, 1980. – 218 с.
3. Рутковский, В. Ю. Некоторые новые направления развития теории и применения адаптивного координатно-параметрического управления / В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков, В. М. Суханов, В. М. Глумов // Проблемы управления. – 2003. – № 2. – С. 2–10.
4. Henry, M. P. Thesels – valicating sensor: rationale, desinitions and examples / M. P. Henry, D. W. Clarke // Control Engineering Practice. – 1993. – Vol. 1, № 4. – P. 585–610.
5. Feng, Z. A review of self-validating sensor technology / Z. Feng // Sensor Review. – 2007. – Vol. 27, № 1. – P. 48–56.
6. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1976. – 285 с.
7. Батищев, В. И. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики / В. И. Батищев, В. С. Мелентьев. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 392 с.
8. Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
9. Taymanov, R. Metrological self-check and evolution of metrology / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Measurement. – 2010. – Vol. 43, № 7. – С. 869–877.
10. Свистунов, Б. Л. Пути реализации принципа двухканальной инвариантности в средствах измерений параметров электрических цепей / Б. Л. Свистунов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 31–37.
11. Свистунов, Б. Л. Классификация способов построения инвариантных средств измерения параметров электрических цепей / Б. Л. Свистунов // Датчики и системы. – 2003. – № 2 (45). – С. 14–17.
12. Артамонов, П. И. Использование структурной и временной избыточности в преобразователях емкости датчиков / П. И. Артамонов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2016. – № 5 (34). – С. 82–89.

Свистунов Борис Львович

доктор технических наук, профессор,
кафедра физики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: sbl@penzgtu.ru

Svistunov Boris L'vovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of physics,
Penza State Technology University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Свистунов, Б. Л.

Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности / Б. Л. Свистунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 94–100.