

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Горячев В. Я., Шатова Ю. А., Абдирашев О. К.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО ДАТЧИКА

5

Гусейнова М. В.

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂
В ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

12

Годнев А. Г.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГРАДУИРОВКА РЕЗЕРВУАРОВ
С ПОМОЩЬЮ ШТАТНЫХ УЗЛОВ УЧЕТА ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АЗС И НЕФТЕБАЗ

19

Годнев А. Г.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА НЕФТЕПРОДУКТОВ

25

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Михайлов П. Г., Соколов А. В., Аналиева А. У.,

Михайлов А. П., Фадеев Е. Д.

САМОДИАГНОСТИКА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

33

Суровцев Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ
РЕЗОНАНСНОГО ВИБРОСТЕНДА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
ВИБРОУСКОРЕНИЙ АМПЛИТУДОЙ ДО 100 000 м/с²

42

Кострикина И. А., Макаркин А. А.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБЪЕКТОВ
ВЫСОКОГО КЛАССА ЧИСТОТЫ

48

Шулепов А. В., Пьей Сони Вин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦВЕТА ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ
В ЛАЗЕРНЫХ СКЕНИРУЮЩИХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

55

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

Савицкий В. Я., Семенов А. А., Серский С. С.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАЛИВКИ И ЗАРЯДКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ
БАТАРЕЙ В ВОЙСКАХ

63

Гришанович Ю. В., Потехин Д. С., Потехин С. Д., Тарасов И. Е.

ОБРАБОТКА МИОСИГНАЛОВ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ
ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИИ МОРАЕ

71

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Бодин О. Н., Баусова З. И., Безбородова О. Е., Убиенных А. Г.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ «КАРДИОВИД»

78

Кузьмин А. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИПОЛЬНЫХ МОМЕНТОВ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
СЕРДЦА С МОДИФИКАЦИЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

87

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Свистунов Б. А., Зубков А. Ф., Гусынина Ю. С.

МЕТОД ВЫБОРА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ
ВЕЛИЧИНЫ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА
МАКСИМУМА ЭНТРОПИИ

95

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Goryachev V. Ya., Shatova Yu. A., Abdirashev O. K.

THE ELECTRIC EQUIVALENT CIRCUIT OF THE LINEAR MOTION
INFORMATION AND MEASURING SYSTEM
BASED ON THE PHASE SENSOR

5

Guseynova M. V.

QUESTIONS ON DEVELOPMENT OF MEASURING SYSTEM
FOR DETERMINATION OF CONCENTRATION OF CO₂
IN VENTILATED ROOMS

12

Godnev A. G.

AUTOMATED GRADUATION OF TANKS WITH USE
OF STAFFING UNITS ACCOUNTING INFORMATION
AND MEASURING SYSTEMS OF GAS AND OIL BASES

19

Godnev A. G.

TECHNIQUE OF DESIGNING A WIDE-BAND BAND
CAPACITIVE LEVEL SENSOR FOR AUTOMATED INFORMATION
AND MEASURING SYSTEMS OF PETROLEUM PRODUCTS

25

MECHANICAL MEASUREMENTS

Mikhailov P. G., Sokolov A. V., Analieva A. U., Mikhailov A. P., Fadeev E. D.

SELF DIAGNOSTICS IN INTELLECTUAL CONVERTERS
OF PHYSICAL VALUES

33

Surovtsev D. A.

STUDY THE POSSIBILITY OF CREATING A RESONANCE SHAKER
TO REPRODUCE THE AMPLITUDE OF VIBRATION
ACCELERATION UP TO 100 000 m/s²

42

Kostrikina I. A., Makarkin L. A.

METHOD OF MEASURING ROUGHNESS OBJECTS
OF HIGH CLASS OF PURITY

48

Shulepov A. V., Pyae Sone Win

INVESTIGATION OF MEASUREMENT ERROR OF GEOMETRIC
PARAMETERS OF PARTS DEPENDING ON THE COLOR
OF THE SURFACE COATING IN LASER SCANNING
OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEMS

55

INFORMATION TECHNOLOGY IN MEASUREMENTS

Savitsky V. J., Semenov A. A., Serskiy S. S.

AUTOMATION OF FILL AND BATTERY CHARGING IN THE ARMY

63

Grishanovich U. V., Potehin D. S., Potehin S. D., Tarasov I. E.

MIOSIGNALS PROCESSING BY SPECTRAL ANALYSIS METHODS
USING MODIFIED THE MORLE WAVELET FUNCTIONS

71

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

Bodin O. N., Bausova Z. I., Bezborodova O. E., Ubiennykh A. G.

IMITATION MODELING OF MULTIAGENT TECHNOLOGY
IN COMPUTER DIAGNOSTIC SYSTEM «CARDIOVID»

78

Kuzmin A. V.

DIPOLE MOMENTS ESTIMATION FOR MODELING
OF ELECTRICAL ACTIVITY OF HEART
WITH MODIFICATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS

87

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Svistunov B. L., Zubkov A. F., Gusynina Y. S.

METHOD OF SELECTING THE DENSITY OF DISTRIBUTION
OF A RANDOM VALUE OF EVALUATING THE VALUE
OF THE MEASUREMENT RESULT ON THE BASIS
OF THE PRINCIPLE OF THE MAXIMUM OF ENTROPY

95

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 53.084.2

DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-1

В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО ДАТЧИКА

V. Ya. Goryachev, Yu. A. Shatova, O. K. Abdirashev

THE ELECTRIC EQUIVALENT CIRCUIT OF THE LINEAR MOTION INFORMATION AND MEASURING SYSTEM BASED ON THE PHASE SENSOR

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Неотъемлемой частью процесса проектирования информационно-измерительных систем (ИИС) является этап определения рабочих характеристик ее элементов, на основании которого в дальнейшем возможно получение передаточной функции и определение погрешности ИИС. Целью представленного расчета и анализа элементов электрической схемы замещения является определение влияния перемещения магнитного шунта датчика на параметры электромагнитной системы (ЭМС) фазового датчика. **Материалы и методы.** В качестве метода исследования использовалось математическое моделирование, при котором реальные физические процессы были описаны соответствующими аналитическими зависимостями. **Результаты.** В ходе исследования определены аналитические выражения для расчета электрических параметров обмоток ЭМС; доказано, что обмотки фазового датчика, расположенные на информационной линейке, при однородной удельной магнитной проводимости линейки имеют взаимную индуктивность, равную нулю; установлены закономерности изменения параметров элементов электрической схемы замещения ИИС при перемещении магнитного шунта по информационной линейке датчика. **Выводы.** Заложенные конструктивные решения фазового датчика линейных перемещений обеспечивают линейную зависимость аргумента выходного сигнала от измеряемого перемещения, что является очевидным достоинством исследованной ИИС.

A b s t r a c t. Background. The stage of determining the performance of information and measuring system elements is an integral part of the design process, on the basis of this stage it is possible to obtain a transfer function and determine the error of the information and measuring system (IMS). The purpose of the presented calculation and analysis of the electrical equivalent circuit elements is to determine the effect of the sensor magnetic shunt on the parameters of the phase sensor electromagnetic system (EMS). **Materials and methods.** As a research

method the mathematical modeling was used, in which real physical processes were described by corresponding analytical dependences. **Results.** During the research the analytical expressions for the calculation of the EMC windings electrical parameters are determined, it is proved that the phase sensor windings located on the information line do not have an inductive connection with each other, the values changing relations of the electrical circuit elements when moving the magnetic shunt along the information line of the sensor are established. **Conclusions.** The put design solutions of the linear motion phase sensor provide the linear dependence of the equivalent circuit inductive parameters on the measured displacement, which is an obvious advantage of the investigated IMS.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фазовый датчик, линейные перемещения, информационно-измерительная система, схема замещения.

К e y w o r d s: phase sensor, linear motion, information and measuring system, equivalent circuit.

Введение

В последние годы в мире активно развивается такая отрасль промышленности, как робототехника, вследствие чего остаются актуальными проблемы сопутствующих отраслей наук – построение информационно-измерительных и управляющих комплексов, отвечающих предъявляемым высоким требованиям к точности перемещений механизмов, позволяющих работать в условиях загрязненных сред без потери в точности измерений перемещений. Таким требованиям удовлетворяют информационно-измерительные системы (ИИС) линейных перемещений, построенные на базе электромагнитных датчиков. Характеристики электромагнитных датчиков практически не изменяются при работе в условиях внешних агрессивных сред в отличие от оптических и ультразвуковых датчиков, существенным недостатком которых является нелинейность метрологических характеристик, а также зависимость работоспособности от наличия посторонних примесей в среде [1, 2].

Таким образом, задача проектирования и определения характеристик ИИС перемещений на базе электромагнитных датчиков продолжает оставаться актуальной.

Конструкция фазового датчика линейных перемещений

Для измерения линейных перемещений практически в любых средах наиболее эффективным является использование фазовых электромагнитных датчиков с продольным бегущим магнитным полем.

Авторами разработан фазовый датчик линейных перемещений, конструкция которого подробно описана в источнике [3]. В фазовом датчике линейных перемещений использована информационная линейка круглого сечения, длина которой определяет измеряемое перемещение. Она имеет цилиндрическую форму и состоит из трех частей. Верхний и нижний каркасы представляют собой разрезанный по продольной оси цилиндр, изготовленный из немагнитного материала, с пазами для размещения обмотки. Между ними расположен магнитопровод статора, состоящий из нескольких пластин электротехнической стали и обеспечивающий формирование магнитного поля датчика. В пазы информационной линейки уложены три обмотки, число витков которых распределено в зависимости от номера зубца линейки по синусному, косинусному и равномерному законам соответственно.

Элементом, который нарушает однородность магнитного поля датчика, является так называемый магнитный шунт, представляющий собой полый цилиндр, состоящий из пластин магнитного материала и перемещающийся вдоль информационной линейки. Длина этого цилиндра составляет 15–20 % длины информационной линейки. Положение середины этого шунта относительно информационной линейки определяет начальную фазу выходного сигнала.

Электрическая схема замещения ИИС линейных перемещений

Представим генератор в виде источника ЭДС с внутренним активным сопротивлением и, пренебрегая емкостными составляющими сопротивлений обмоток датчика, получим электрическую схему замещения ИИС линейных перемещений (рис. 1).

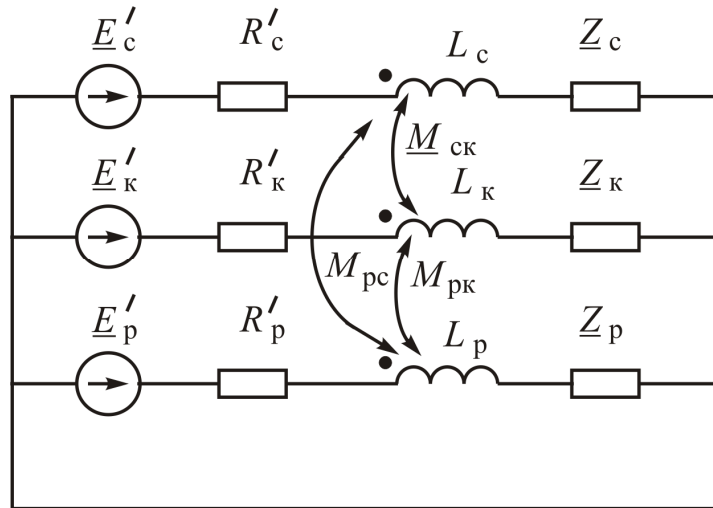


Рис. 1. Электрическая схема замещения ИИС линейных перемещений

Схема замещения состоит из следующих элементов:

$\underline{E}_c$, $\underline{E}_к$, $\underline{E}_p$ – ЭДС источников питания контуров синусной, косинусной и равномерной обмотки соответственно;

R'_c , $R'_к$, R'_p – внутренние активные сопротивления источников ЭДС синусной, косинусной обмотки и равномерной обмотки;

$\underline{Z}_c$, $\underline{Z}_к$, $\underline{Z}_p$ – полные комплексные сопротивления синусной обмотки, косинусной обмотки и равномерной обмотки при отсутствии магнитного шунта;

L_c , $L_к$, L_p – составляющие индуктивности синусной обмотки, косинусной обмотки и равномерной обмотки, учитывающие влияние шунта;

$\underline{M}_{рс}$, $\underline{M}_{рк}$, $\underline{M}_{ск}$ – взаимные индуктивности равномерной и синусной, равномерной и косинусной, синусной и косинусной обмотки, обусловленные влиянием магнитного шунта.

Возможны два режима работы системы. В однофазном режиме $\underline{E}_c$ и $\underline{E}_к$ равны нулю. В двухфазном режиме работы $\underline{E}_p$ равна нулю.

При работе системы в однофазном режиме в равномерной обмотке протекает ток, создающий пульсирующее магнитное поле, которое наводит ЭДС в синусной и косинусной обмотке.

Основные параметры датчика линейных перемещений

Система уравнений для расчета токов для схемы замещения, изображенной на рис. 1, при некоторой угловой частоте питающего напряжения ω будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{I}_p (\underline{Z}_p + R'_p + j\omega L_p) + j\omega \underline{L}_c \underline{M}_{рс} + j\omega \underline{L}_к \underline{M}_{рк} = \underline{E}_p, \\ j\omega \underline{L}_p \underline{M}_{рс} + \underline{I}_c (\underline{Z}_c + R'_c + j\omega L_c) + j\omega \underline{L}_к \underline{M}_{ск} = \underline{E}_c, \\ j\omega \underline{L}_p \underline{M}_{рк} + j\omega \underline{L}_c \underline{M}_{ск} + \underline{I}_к (\underline{Z}_к + R'_к + j\omega L_к) = \underline{E}_к. \end{cases}$$

Параметры источников ЭДС (ЭДС питания синусной обмотки $\underline{E}_c$, косинусной обмотки $\underline{E}_к$ и равномерной обмотки $\underline{E}_p$ и их внутренние активные сопротивления R'_c , $R'_к$ и R'_p), изображенные на схеме замещения, при необходимости задаются в идеализированном виде или определяются экспериментально.

Пренебрегая на данном этапе сопротивлением проводов и индуктивностями рассеяния и зная закон распределения удельной магнитной проводимости от перемещения магнитного шунта $\underline{y}_m = f(x)$, удельной собственной индуктивности, удельной взаимной индуктивности [4], можно определить электрические параметры обмоток электромагнитной системы.

В общем случае согласно работе [5] собственная индуктивность катушки, количество проводников которой распределено по оси x по закону $W_1(x)$, может быть вычислена по формуле

$$\underline{L} = \int_0^l W_1(x)^2 \underline{y}_m(x) dx,$$

где l – длина ЭМС.

Составляющие индуктивности при наличии и отсутствии магнитного шунта будут различны, что обусловлено изменением магнитных свойств среды. Полное значение индуктивности будет определяться на основе принципа суперпозиции суммой индуктивностей в зоне влияния шунта и без него.

Анализ параметров датчика линейных перемещений представлен в работе [4] более подробно, ниже приведены лишь результаты анализа магнитной системы датчика.

Индуктивность равномерной обмотки

$$\underline{L}_p = W_p^2 \underline{\mu} \mu_0 h \left(\frac{l}{l_{cp} - \delta - h + \underline{\mu}(\delta + h)} + \frac{l}{l_{cp} - \delta - h - z + \underline{\mu}(\delta + h + z)} + \frac{g}{l_{cp} + \delta(\underline{\mu} - 1)} + \frac{g}{l_{cp} - \delta - z + \underline{\mu}(\delta + z)} \right),$$

где W_p – число витков равномерной обмотки; $\underline{\mu}$ – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; h – ширина магнитного шунта; l_{cp} – длина средней линии магнитопровода в поперечном сечении; δ – воздушный зазор между магнитным шунтом и магнитопроводом; z – высота паза магнитопровода; g – длина шунта.

Отметим, что индуктивность равномерной обмотки не зависит от положения шунта на информационной линейке, а определяется только геометрическими параметрами электромагнитной системы.

Индуктивность синусной обмотки

$$\underline{L}_c = \frac{1}{2} W_m^2 \underline{\mu} \mu_0 h \left(\frac{l}{l_{cp} - \delta - h + \underline{\mu}(\delta + h)} + \frac{l}{l_{cp} - z - \delta - h + \underline{\mu}(\delta + z + h)} + \left(\frac{1}{l_{cp} + \delta(\underline{\mu} - 1)} + \frac{1}{l_{cp} - z - \delta + \underline{\mu}(\delta + z)} \right) \left(g - \frac{l}{4\pi} \cos \frac{4\pi x_m}{l} \sin \frac{2\pi g}{l} \right) \right),$$

где W_m – максимальное или теоретическое амплитудное количество витков синусной и косинусной обмоток; x_m – координата, определяющая положение шунта на информационной линейке.

Эквивалентная индуктивность синусной обмотки при перемещении шунта изменяется по синусному закону. Причина этого заключается в соотношении удельных магнитных проводимостей шунта и магнитопровода, которое выбрано таким образом, чтобы магнитная проводимость шунта значительно превышала проводимость магнитопровода в зоне, свободной от влияния шунта. Данное соотношение позволяет получить максимальное значение выходного тока и одновременно способствует снижению погрешности ИИС.

Индуктивность косинусной обмотки

$$\underline{L}_k = \frac{1}{2} W_m^2 \underline{\mu} \mu_0 h \left(\frac{l}{l_{cp} - \delta - h + \underline{\mu}(\delta + h)} + \frac{l}{l_{cp} - z - \delta - h + \underline{\mu}(\delta + z + h)} + \left(\frac{1}{l_{cp} - \delta + \underline{\mu}\delta} + \frac{1}{l_{cp} - z - \delta + \underline{\mu}(\delta + z)} \right) \left(g + \frac{l}{2\pi} \cos \frac{4\pi x_m}{l} \sin \frac{2\pi}{l} g \right) \right).$$

Эквивалентная индуктивность косинусной обмотки при перемещении шунта изменяется по косинусному закону.

Следует отметить, что соответствующие аналитические выражения для индуктивностей синусной и косинусной обмоток отличаются только знаком перед функцией $\frac{l}{2\pi} \cos \frac{4\pi x_{ш}}{l} \sin \frac{2\pi}{l} g$. Постоянная составляющая этой функции определяется суммой индуктивностей обмотки при отсутствии шунта и дополнительной индуктивности, зависящей от магнитного сопротивления шунта.

Взаимная индуктивность объясняется наличием единого для всех обмоток магнитного потока, сопровождающегося процессом наведения ЭДС в одной обмотке путем изменения тока в другой. В общем случае согласно работе [5] взаимная индуктивность обмоток, количество проводников которых распределено по оси x по законам $W_1(x)$ и $W_2(x)$ соответственно, может быть вычислена по формуле

$$\underline{M} = \int_0^l W_1(x) W_2(x) \underline{y}_m(x) dx.$$

Для равномерно распределенного и распределенного по синусному закону количества витков обмотки удельная взаимная индуктивность

$$\underline{M}_{pc} = W_p W_c \underline{y}_m l,$$

где W_p – количество витков равномерно распределенной обмотки; W_c – количество витков синусной обмотки.

Взаимная индуктивность обмоток в зоне отсутствия магнитного шунта и в зоне его влияния будут различны.

Полная взаимная индуктивность равномерной и синусной обмоток изменяется при изменении длины шунта по синусоидальному закону:

$$\underline{M}_{pc} = \frac{\mu \mu_0 h}{\pi} W_p W_m \left(\frac{1}{l_{cp} - \delta + \underline{\mu} \delta} + \frac{1}{l_{cp} - z - \delta + \underline{\mu} (\delta + z)} \right) \sin \frac{\pi g}{l} \sin \frac{2\pi x_{ш}}{l}.$$

Максимальным значение коэффициента взаимной индуктивности будет при условии равенства длины шунта половине длины рабочей части информационной линейки ЭМС.

Для равномерно распределенного и распределенного по косинусному закону количества витков W_k обмотки удельная взаимная индуктивность

$$\underline{M}_{pk} = W_p W_k \underline{y}_m l.$$

Взаимная индуктивность зависит от длины шунта по косинусоидальному закону:

$$\underline{M}_{pk} = \frac{\mu \mu_0 h}{\pi} W_p W_m \left(\frac{1}{l_{cp} - \delta + \delta \underline{\mu}} + \frac{1}{l_{cp} - z - \delta + \underline{\mu} (\delta + z)} \right) \sin \frac{\pi g}{l} \cos \frac{2\pi x_{ш}}{l}.$$

Максимальное значение взаимной индуктивности имеет место тогда, когда шунт расположен в середине информационной линейки $x = \frac{l}{2}$ и его величина

$$\underline{M}_{pk\max} = \frac{\mu \mu_0 h}{\pi} W_p W_m \left(\frac{1}{l_{cp} - \delta + \delta \underline{\mu}} + \frac{1}{l_{cp} - z - \delta + \underline{\mu} (\delta + z)} \right) \sin \frac{\pi g}{l}.$$

Для распределенных по косинусному и синусному закону количества витков обмоток удельная взаимная индуктивность

$$\underline{M}_{\text{ск}} = W_{\text{с}} W_{\text{к}} \underline{y}_m l.$$

Синусная и косинусная обмотки связаны взаимной индуктивностью, изменяющейся по косинусоидальному закону в функции расстояния от начала рабочей части магнитопровода:

$$\underline{M}_{\text{ск}} = \frac{\mu_0 h}{4\pi} W_m^2 \left(\frac{1}{l_{\text{ср}} - \delta + \delta \underline{\mu}} + \frac{1}{l_{\text{ср}} - z - \delta + \underline{\mu}(\delta + z)} \right) \sin \frac{2\pi g}{l} \cos \frac{4\pi x_{\text{ш}}}{l}.$$

Индуктивная связь между обмотками будет максимальной, если длина шунта будет равна четверти длины информационной линейки.

Заключение

В итоге математического анализа зависимостей, описывающих элементы электрической схемы замещения ИИС линейных перемещений, получены следующие результаты:

- определены аналитические выражения для расчета значений элементов электрической схемы замещения ИИС;
- доказано, что эквивалентная взаимная индуктивность всех трех обмоток, расположенных на информационной линейке, при отсутствии шунта равна нулю. Это явление вызвано тем, что электродвижущие силы, наводимые одной обмоткой в двух «полуволнах» другой обмотки, находятся в противофазе и их влияние в итоге компенсируется;
- установлены законы изменения параметров элементов электрической схемы замещения ИИС при перемещении магнитного шунта по информационной линейке датчика.

Полученные аналитические зависимости в дальнейшем будут использованы для определения функции преобразования фазового датчика линейных перемещений и соотношений между токами и напряжениями всех обмоток, что позволит провести анализ работы ИИС линейных перемещений.

Библиографический список

1. Шабуров, П. О. Использование оптического датчика для измерения линейных перемещений / П. О. Шабуров, Е. А. Маргацкая, М. В. Большаков, Б. Д. Шумаков // Наука ЮУрГУ : материалы 66-й науч. конф. Секции технических наук. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – С. 1272–1276. – URL: <http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/4533/36.pdf?sequence=1>
2. Avago technologies. HSDL-9100. Surface – Mount Proximity Sensor. Data Sheet, 2009. – URL: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2259EN>
3. Горячев, В. Я. Фазовый датчик линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев, Т. Ю. Бростилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2 – С. 7–9.
4. Горячев, В. Я. Индуктивные параметры фазовых датчиков линейных перемещений / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // Традиции и инновации в современной науке : XXXII Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Олимп, 2018. – С. 66–68. – URL: http://olimpiks.ru/d/1340546/d/sbornik_tis-32.pdf
5. Горячев, В. Я. Фазовые датчики механических величин с бегущим магнитным полем : монография / В. Я. Горячев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 307 с.

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Шатова Юлия Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yulia-shatova@yandex.ru

Shatova Yuliya Anatol'evna

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

Абдирашев Омирзак Коптилеулы

преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Астана, ул. Мунайпасова, 11)
E-mail: omeke_92@mail.ru

Abdirashev Omirzak Koptileuuly

lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilev
(11 Munaitpasova street, Astana, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Горячев, В. Я. Электрическая схема замещения ИИС линейных перемещений на основе фазового датчика / В. Я. Горячев, Ю. А. Шатова, О. К. Абдирашев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 5–11. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-1.

М. В. Гусейнова

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ В ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

M. V. Guseynova

QUESTIONS ON DEVELOPMENT OF MEASURING SYSTEM FOR DETERMINATION OF CONCENTRATION OF CO₂ IN VENTILATED ROOMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Измерение концентрации CO₂ в производственных и жилых помещениях является одной из важных задач обеспечения в них качества воздуха. Увеличение концентрации CO₂ в помещениях чревато тяжелыми последствиями для здоровья людей, так как это ухудшает качество воздуха, и как результат – ухудшаются условия труда. Концентрация CO₂ в помещениях пропорциональна количеству работающих в них людей. Это обстоятельство требует проведения постоянного точного контроля уровня концентрации CO₂ и осуществления непрерывной вентиляции. Целью является исследование точности и информативности системы определения концентрации CO₂ в вентилируемых помещениях. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач в работе применены методы теории погрешностей, а также методы вариационной оптимизации. С помощью данных методов исследованы точность и информативность измерительной системы определения концентрации CO₂. **Результаты.** Определено, что для оперативного контроля концентрации CO₂ в помещениях наиболее оптимальным методом является двухволновый метод, предусматривающий измерения оптической толщины воздуха на длинах волн 4,3 и 3,6 мкм. Определено, что погрешность дискретизации измерения концентрации CO₂ в вентилируемых помещениях имеет максимум, появляющийся при определенном соотношении между временной дискретой измерения и скоростью изменения состава воздуха. Сформулирована и решена модельная оптимизационная задача определения условий достижения высокой информативности системы. **Выводы.** Доказано, что использование методов теории погрешностей и безусловной вариационной оптимизации позволяет улучшить точность и информативность системы. Выявлен экстремальный характер информативности системы в производственных разноформатных помещениях.

A b s t r a c t. Background. Measurements of concentration of CO₂ in industrial and living rooms is one of important task of providing of air quality in them. Increase of concentration of CO₂ bears the risk of heavy results for humans because decrease of air quality and working conditions. Concentration of CO₂ is proportional to number of collaborators working in them. This requires carrying out of permanent accurate control this parameter and realization of continuous ventilation. The goal of the paper is research of accuracy and informativity of measuring system designated for determination of concentration in ventilated rooms. **Materials and methods.** In order to solve the formulated tasks the methods of theory of errors and methods of variation optimization are used. These methods make it possible to research the accuracy and informativity of measuring system designated for measurement of CO₂ concentration.

Results. It was determined that the two wavelength method is most optimum solution for operative control of indoor CO₂ concentration. This method envisages carrying out of measurements in wavelengths 4,3 мкм and 3,6 мкм. It is shown that error of discretization in CO₂ concentration measurements has a maximum occurring upon some ratio between time discrete and speed of air content change. The model optimization task on determination conditions to reach the highest system informativity is formulated and solved. **Conclusions.** It is proved that utilization of theory of errors and non-conditional variation optimization make it possible to increase accuracy and informativity of the system. The extremum character of systems informativity in industrial rooms of different sizes is revealed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: измерительный прибор; концентрация; оптимизация; погрешность; вентиляция.

Key words: measuring device, concentration, optimization, error, ventilation.

Измерение концентрации CO₂ в помещениях является одной из важных задач обеспечения качества воздуха в производственных помещениях. Увеличение концентрации CO₂ в помещениях ухудшает качество воздуха, ухудшает условия труда и может привести к тяжелым последствиям для здоровья людей. Концентрация CO₂ в помещениях сильно коррелирует с количеством людей, работающих в них. Это обстоятельство требует проведения постоянного контроля уровня концентрации CO₂ и осуществления непрерывной вентиляции.

Рассмотрим существующие методы и средства для контроля концентрации CO₂ в различных помещениях. В работах [1–6] изложены некоторые технические решения, позволяющие измерить концентрацию CO₂ по принципу контроля поглощения CO₂ на двух различных длинах волн. Согласно этому методу проводятся измерения на длинах волн λ_1 и λ_2 , где на длине волны $\lambda_1 = 4,3$ мкм происходит наиболее сильное поглощение оптического сигнала, а на $\lambda_2 = 3,6$ мкм наименьшее поглощение. Согласно закону Бугера – Бэра [7] имеем

$$I_1(\lambda_1) = I_0(\lambda_1) e^{-[m_1 \alpha(\lambda_1) + \tau_k(\lambda_1)]}, \quad (1)$$

$$I_2(\lambda_2) = I_0(\lambda_2) e^{-[m_1 \alpha(\lambda_2) + \tau_k(\lambda_2)]}, \quad (2)$$

где $I_0(\lambda_1)$ – пучок исходного оптического сигнала на длине волны λ_1 ; $I_0(\lambda_2)$ – то же, на длине волны λ_2 ; $I_1(\lambda_1)$ – пучок оптического сигнала на входе фоторезистора на длине волны λ_1 ; $I_2(\lambda_2)$ – то же, на длине волны λ_2 ; m_1 – концентрация CO₂ в воздухе; $\alpha(\lambda_1)$ – коэффициент поглощения CO₂ на длине волны λ_1 ; $\alpha(\lambda_2)$ – то же, на длине волны λ_2 ; $\tau_k(\lambda_1)$ – оптическая толщина суммарной континуальной составляющей поглощения воздуха атмосферы на длине волны λ_1 ; $\tau_k(\lambda_2)$ – то же, на длине волны λ_2 .

Блок-схема прибора для измерения концентрации CO₂ показана на рис. 1.

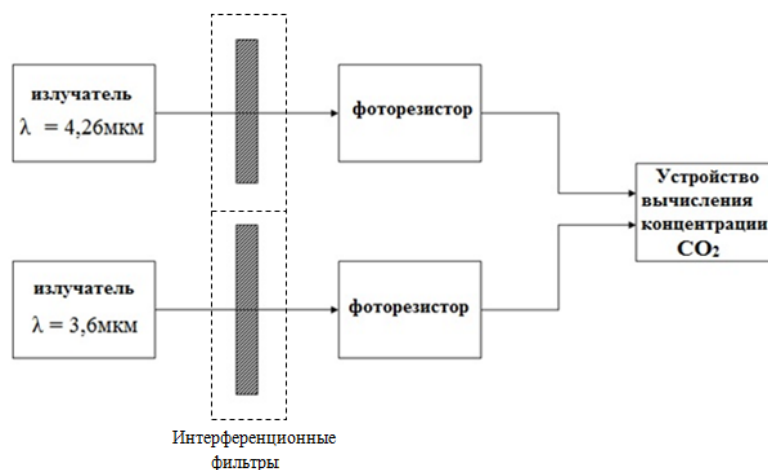


Рис. 1. Блок-схема прибора для измерения концентрации CO₂ в помещениях

Влияние суммарной непрерывной составляющей оптической толщины воздуха иллюстрируется на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при проведении измерений на длине волны $\lambda_1 = 3,6$ мкм измеренная оптическая толщина $\tau(\lambda_1)$ может быть представлена в виде суммы

$$\tau(\lambda_1) = A_1 + \tau_k(\lambda_1), \quad (3)$$

где

$$A_1 = m_1 \alpha(\lambda_1). \quad (4)$$

Аналогично (3) для длины волны $\lambda_2 = 4,3$ мкм имеем

$$\tau(\lambda_2) = A_2 + \tau_k(\lambda_2), \quad (5)$$

где

$$A_2 = m_1 \alpha(\lambda_2). \quad (6)$$

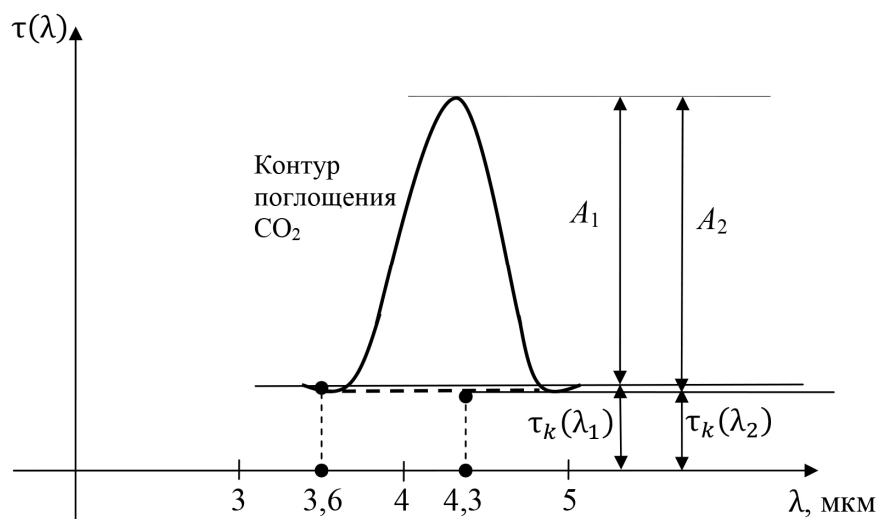


Рис. 2. Иллюстрация влияния суммарной непрерывной составляющей на измерение концентрации CO_2

Отметим, что смысл проведения измерений на двух длинах волн заключается в необходимости исключения влияния суммарной непрерывной составляющей на исследуемом участке спектра 3,6–4,3 мкм.

Из выражений (1)–(6) при $\tau_k(\lambda_1) \approx \tau_k(\lambda_2)$ получим

$$\frac{I_1(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} = \frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)} e^{-m_1[\alpha(\lambda_1) - \alpha_1(\lambda_2)]}. \quad (7)$$

Из выражения (7) находим

$$\frac{I_1(\lambda_1)/I_2(\lambda_2)}{I_0(\lambda_1)/I_0(\lambda_2)} = e^{-m_1[\alpha(\lambda_1) - \alpha_1(\lambda_2)]}. \quad (8)$$

Из выражения (8) окончательно получаем

$$m_1 = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha_1(\lambda_2)]} \ln \left[\frac{I_1(\lambda_1)/I_2(\lambda_2)}{I_0(\lambda_1)/I_0(\lambda_2)} \right]. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), двухволновый метод позволяет полностью компенсировать суммарное непрерывное поглощение, имеющееся в области 3,6–4,3 мкм.

Вышеизложенный двухволновый метод с некоторыми модификациями широко используется в различных системах обеспечения микроклимата в производственных помещениях. Например, в работе [2] сообщается о разработке прибора для измерения концентрации CO_2 , на базе излучающего светодиода и приемного фотодиода в диапазоне длин волн $4,3 \pm 0,15$ мкм.

Как отмечается в работе [8], CO_2 имеет полосы поглощения на длинах волн 4,3; 12,5; 2,8 мкм.

Согласно работе [8] концентрация CO_2 внутри вентилируемого помещения определяется как

$$C(t) = \frac{q}{\gamma V} (1 - e^{-\gamma t}), \quad (10)$$

где V – объем помещения, м^3 ; C – концентрация, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; q – скорость генерации CO_2 , $\text{кг}/\text{с}$; γ – скорость изменения состава воздуха, ч^{-1} .

Проведем исследование погрешности дискретизации при измерении CO_2 в помещении в период работы системы вентиляции.

В общем случае относительная погрешность преобразования $\delta_{\text{пр}}$ является аддитивной составляющей суммарной погрешности и может быть определена в виде геометрической суммы

$$\delta_{\text{пр}} = \sqrt{\delta_{\text{д.в}}^2 + \delta_{\text{д.к}}^2}, \quad (11)$$

где $\delta_{\text{д.в}}^2$ – относительная погрешность дискретизации во времени; $\delta_{\text{д.к}}^2$ – относительная погрешность квантования по уровню.

Отметим, что $\delta_{\text{д.к}}$ исследована достаточно подробно, она может быть вычислена с учетом законов распределения плотности вероятности сигнала и шума в пределах одного кванта.

Что касается $\delta_{\text{д.в}}$, то эту погрешность можно представить в виде погрешности ступенчатой интерполяции в пределах одной временной дискреты. Известно [9], что абсолютная погрешность $\Delta_{\text{с.и}}$ ступенчатой интерполяции в пределах временной дискреты ΔT определяется как

$$\Delta_{\text{с.и.}} = \left(\frac{dC(t)}{dt} \right) \Delta T. \quad (12)$$

Следовательно, $\delta_{\text{д.в}}$ определим как

$$\delta_{\text{д.в}} = \frac{\Delta_{\text{с.и.}}}{C(t_0)} = \left(\frac{dC(t)}{dt} \right) \frac{\Delta T}{C(t_0)}, \quad (13)$$

где t_0 – средняя точка во временной дискрете ΔT .

Из выражений (10) и (13) при $t = \frac{\Delta T}{2}$ получим

$$\frac{d\delta_{\text{г.в}}}{d\Delta T} = - \left(\frac{q}{V} e^{-\gamma \Delta T} \left(-\frac{q}{2} \right) \Delta T + \frac{q}{V} e^{-\frac{\gamma \Delta T}{2}} \right). \quad (14)$$

Из выражения (14) при $\frac{d\delta_{\text{г.в}}}{d\Delta T} = 0$ получим

$$\Delta T = \frac{2}{\gamma}. \quad (15)$$

Вычислив вторую производную (10), легко удостовериться, что погрешность временной дискретизации при измерении концентрации CO_2 в вентилируемом помещении при условии (15) имеет максимум.

Одним из основных вопросов построения подсистем контроля концентрации CO_2 в помещениях является оптимальное распределение датчиков CO_2 в помещениях с различным объемом. Общепринято, что количество датчиков CO_2 устанавливается в помещениях пропорционально объему этих помещений с учетом количества пребывающих в них людей. С учетом вышеуказанного возникает задача оптимального распределения датчиков CO_2 по разноформатным производственным помещениям.

Рассмотрим вопрос об оптимальном размещении датчиков CO_2 в помещении из комнат с различными объемами. Для формализации задачи считаем, что объемы V комнат составляют некоторое множество

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}, \quad (16)$$

где $i = \overline{1, n}$.

Если количество людей, работающих в комнате с объемом V_i , обозначить как N_i , то получим

$$\sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n N_i(V_i) = K, \quad (17)$$

где $K = \text{const}$; K – общее количество работников.

Если условно принять, что количество измерителей концентрации CO_2 в помещении с объемом V_i пропорционально величине V_i , а количество информативных градаций в измерительном сигнале в i – м помещении пропорционально величине $N_i(V_i)$, то общее количество информации, вырабатываемое системой измерения концентрации CO_2 , определим как

$$M_{1.g.} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \log_2 N_i(V_i). \quad (18)$$

С учетом выражений (17) и (18) можно составить следующий дискретный функционал безусловной вариационной оптимизации

$$M_{2.g.} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \log_2 N_i(V_i) + Z \left[\sum_{i=1}^n N_i(V_i) - K \right], \quad (19)$$

где Z – множитель Лагранжа, м³.

Непрерывный аналог (19) имеет вид

$$M_{2.n} = \int_0^{V_{\max}} V \cdot \log_2 N(V) dV + Z \left[\int_0^{V_{\max}} \frac{N(V) dV}{V_{\max}} - K_1 \right], \quad (20)$$

где $K_1 = \text{const}$. Смысл K_1 будет определен ниже.

Согласно методу Эйлера – Лагранжа оптимальная функция $N(V)$, приводящая $M_{2.n}$ к его экстремуму должна удовлетворять условию [10]

$$\frac{d \left\{ V \cdot \log_2 N(V) + Z \left[\frac{N(V)}{V_{\max}} - K_1 \right] \right\}}{dN(V)} = 0. \quad (21)$$

С учетом (21) имеем

$$\frac{V}{(\ln 2)N(V)} + Z = 0, \quad (22)$$

Из выражения (22) получим

$$N(V) = -\frac{V}{Z \ln 2}. \quad (23)$$

Непрерывный аналог выражения (17) имеет вид

$$\frac{1}{V_{\max}} \int_0^{V_{\max}} N(V) dV = K_1. \quad (24)$$

С учетом (23) и (24) получим

$$-\frac{V_{\max}^2}{2Z \ln 2} = K_1. \quad (25)$$

Из выражений (22) и (25) получаем

$$N(V) = \frac{2K_1 V}{V_{\max}^2}. \quad (26)$$

Следовательно, (26) является условием оптимального количества людей по разноформатным помещениям при ограничительных условиях (17) и (25), а также при условии соответствия количества датчиков CO₂ в помещении объему этого помещения.

Заключение

В заключении сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Определено, что для оперативного контроля концентрации CO₂ в помещениях наиболее оптимальным методом является двухволновый метод, предусматривающий измерения оптической толщины воздуха на длинах волн 4,3 и 3,6 мкм.
2. Определено, что погрешность дискретизации измерения концентрации CO₂ в вентилируемых помещениях имеет максимум, появляющийся при определенном соотношении между временной дискретой измерения и скоростью изменения состава воздуха.
3. Сформулирована и решена модельная оптимизационная задача определения условий достижения высокой информативности результатов измерений концентрации CO₂ в производственных помещениях с разным объемом. Определено оптимальное количество людей по разноформатным помещениям.

Библиографический список

1. Masrie, M. A Hybrid Gas Sensor based on Infrared Absorption for Indoor Air Quality Monitoring / M. Masrie, R. Adnan, A. Ahmad. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/b798/afdde1913911d6f76a3a0ae79534abfbec10.pdf>
2. Wong, J. Y. A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared (NDIR) Gas Measurement: Past, Present & Future / J. Y. Wong. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3715237/>
3. Yasuda, T. Comparison of the Characteristics of small commercial NDIR CO₂ sensor models and development of a portable CO₂ measurement device / T. Yasuda, S. Yonemura, A. Tani // Sensors. – 2012. – № 12. – P. 3641–3655. – DOI 10.3390/s120303641.
4. Measuring carbon dioxide inside buildings-why is it important? – URL: http://www.energy.wsu.edu/portals/0/documents/measuring_CO2_inside_buildings_jan2013.pdf
5. Measuring carbon dioxide (CO₂) using non-dispersive infrared (NDIR) technology. – URL: <http://www.e-inst.com/wp-content/uploads/2018/04/AQ-14-624-technical-note-CO2-NDIR.pdf>
6. Selvamathi, A. Real time indoor CO₂ monitoring and control system using wireless sensor networks / A. Selvamathi, S. Rathi // International journal of scientific & engineering research. – 2017. – Vol. 8, iss. 5.
7. Мирошков, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошков. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 696 с.
8. Ginkel, J. V. Workshop 5 – The Residential Context of Health. Indoor air quality influenced by ventilation system design / J. V. Ginkel, E. Hasselaar. – URL: https://www.researchgate.net/publication/27343806_Indoor_air_quality_influenced_by_ventilation_system_design
9. Ястребов, И. П. Дискретизация непрерывных сигналов во времени, теорема котельникова : электронное учебно-методическое пособие / И. П. Ястребов. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2012.
10. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – Москва : Наука, 1974. – 432 с.

Гусейнова Матанат Вагиф гызы

преподаватель,
кафедра информационных технологий
и программирования,
Азербайджанский технический университет
(Азербайджан, г. Баку,
проспект Гусейна Джавида, 25)
E-mail: m.v.huseynova@mail.ru

Huseynova Matanat Vagif gızı

lecturer,
sub-department of information technologies
and programming,
Azerbaijan Technical University
(25 Huseyn Javid avenue, Baku, Azerbaijan)

Образец цитирования:

Гусейнова, М. В. Вопросы разработки измерительной системы для определения концентрации CO₂ в вентилируемых помещениях / М. В. Гусейнова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 12–18. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-2.

А. Г. Годнев

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГРАДУИРОВКА РЕЗЕРВУАРОВ С ПОМОЩЬЮ ШТАТНЫХ УЗЛОВ УЧЕТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АЗС И НЕФТЕБАЗ

A. G. Godnev

AUTOMATED GRADUATION OF TANKS WITH USE OF STAFFING UNITS ACCOUNTING INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS OF GAS AND OIL BASES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Цель статьи заключается в описании способа градуировки резервуаров с заданной точностью и доверительной вероятностью с помощью топливораздаточных колонок или автоматических стояков налива соответственно в процессе штатной работы автозаправочных станций или нефтебаз. **Материалы и методы.** Рассматриваются способ и реализующее его устройство автоматической градуировки резервуаров с помощью топливораздаточных колонок (ТРК) автозаправочных станций (АЗС) или автоматизированных стояков налива (АСН) нефтебаз (НБ) в процессе отпуска нефтепродуктов (НП) потребителям. Новизна способа заключается в переводе систематической погрешности узлов учета (топливораздаточных колонок-ТРК или автоматизированных стояков налива-АСН) в разряд случайных путем их периодической проверки с помощью эталонного объемного мерника и введением постоянной поправки в градуировочные характеристики узлов учета после каждого опорожнения резервуара или его части. В этом случае не исключенная систематическая погрешность узлов учета в каждом из усредненных отсчетов принимает случайное значение. Методика определения и контроля градуировочных характеристик резервуаров АЗС, НБ зарегистрирована в Государственной системе обеспечения единства измерений МИ 2564-99. **Результаты.** Данный способ позволяет уменьшить суммарную погрешность узлов учета по мере набора представительной статистики (15–25 опорожнений резервуара) практически до погрешности мерника, т.е. примерно до $\pm 0,05\%$, и одновременно обеспечить заданную доверительную вероятность $P = 0,95$ погрешности градуировки резервуара. Экономический эффект заключается в возможности проводить градуировку одновременно сразу нескольких резервуаров, находящихся в эксплуатации, что значительно снижает затраты и сроки ее проведения. **Выводы.** Разработанный способ автоматической градуировки резервуаров АЗС и НБ с помощью штатных ТРК или АСН, входящих в состав автоматизированных ИИС, обеспечивает проведение градуировки с заданной точностью и доверительной вероятностью. Также позволяет проводить градуировку одновременно сразу нескольких резервуаров, находящихся в эксплуатации, что значительно снижает затраты на градуировку и сроки ее проведения.

A b s t r a c t. Background. The purpose of the article is to describe the method of calibration of tanks with a given accuracy and confidence level using fuel dispensers or automatic risers filling, respectively, during normal operation of gas stations or tank farms. **Materials and methods.** A method and a device for its automatic calibration of tanks using fuel dispensers

(filling stations) of filling stations (gas stations) or automated loading risers (ASN) of oil bases (NB) in the process of selling oil products (NP) to consumers are considered. The novelty of the method consists in translating the systematic error of metering stations (fuel dispensers-dispensers or automated loading stations-ACH) into random discharge by periodically checking them with a standard volumetric meter and introducing a constant correction to the calibration characteristics of metering units after each emptying of the tank or its part. In this case, the systematic error of metering points in each of the averaged samples takes a random value. The method of determining and controlling the calibration characteristics of gas stations' tanks, NB is registered in the State System for Ensuring the Uniform Measurement of MI 2564-99.

Results. This method allows you to reduce the total error of metering stations as a set of representative statistics (15–25 tank emptying) almost to the error of the measuring device, i.e. approximately to $\pm 0,05 \%$, and at the same time provide the specified confidence probability $P = 0.95$ of the error of the tank calibration. The economic effect is the ability to carry out the calibration of several tanks in operation simultaneously, which significantly reduces the costs and timing of its implementation. **Conclusions.** The developed method of automatic calibration of gas stations and gas stations with the help of standard dispensers or ASN, which are part of automated IMS, provides for calibration with a given accuracy and confidence level. It also allows for the calibration of several tanks simultaneously in operation, which significantly reduces the cost of calibration and the timing of its implementation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: градуировка резервуаров, топливораздаточные колонки АЗС, автоматизированные стояки налива нефтебаз, погрешность градуировки, достоверная вероятность градуировки.

Key words: calibration of tanks, fuel dispensers of gas stations, automated standpipes for loading of tank farms, error of graduation, confidence probability of graduation.

Градуировочная характеристика резервуаров является одной из важнейших метрологических характеристик в процессе проведения учетно-расчетных операций с нефтепродуктами (НП). В соответствии с ГОСТ 8.570–2000 [1] каждые 5 лет все резервуары нефтебаз (НБ) и автозаправочных станций (АЗС) подлежат периодической градуировке. Пластические необратимые деформации, утонение стенок резервуаров в процессе их ржавления, просадка днища и т.п. приводят к значительным изменениям их градуировочной характеристики, что приводит к значительным погрешностям при проведении учетных операций при инвентаризации, при сдаче операторами своих смен и ко многим другим нежелательным явлениям.

Обычно первично градуировочную характеристику резервуаров на АЗС получают с помощью передвижной измерительно-градуировочной лаборатории (ПИГЛ). Процесс градуировки заключается в установке в резервуар датчика уровня с абсолютной погрешностью не хуже ± 1 мм, расходомера, с помощью которого измеряется объем закаченного или слитого НП или воды, а также вычислительной машины с аттестованной программой, которая обрабатывает поступающую на ее входы информацию с датчиков объем-уровень. По опорожнению или наполнению резервуара персональный компьютер производит расчет его градуировочной характеристики.

В соответствии с законами метрологии средства измерений, вышедшие с завода, должны как минимум в два раза иметь меньшую суммарную погрешность, чем та, которая указывается в его паспортных данных. Это связано с тем, чтобы в процессе пятилетней эксплуатации суммарная относительная погрешность градуировочной характеристики не превысила своего предельного значения $\pm 0,2 \%$. Однако в соответствии с законами теории вероятности для достижения погрешности $\pm 0,1 \%$ резервуар необходимо пролить при доверительной вероятности $P_d = 0,95$ пятнадцать раз. На практике же резервуар градуируют один раз, так как это дорогостоящая процедура и в градуировочных таблицах просто не указывают получаемую при этом величину доверительной вероятности P_d . В то же время не сложно оценить, что при однократно проведенной градуировке при заданной $P_d = 0,95$ суммарная относительная погрешность составит величину $\pm 0,4 \%$.

Градуировка вертикальных резервуаров для нефтепродуктов в большинстве случаев выполняется согласно ГОСТ 8.570–2000 [2] геометрическим способом, поскольку градуировка нефтепродуктом РВС-5000, РВС-10000 представляет собой большие временные и финансовые затраты. Но без градуировки продуктом, без учета пластических деформаций, которые происходят в резервуаре в процессе его нагружения, получить суммарную погрешность градуировочной характеристики $\pm 0,1\%$ его вместимости практически невозможно.

Для решения вышеизложенной проблемы предложены способ и реализующее его устройство автоматической градуировки резервуаров АЗС и НБ с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы (ИИС) учета НП [3, 4].

Ожидаемый экономический результат заключается в отсутствии необходимости вывода АЗС или НБ из штатного режима эксплуатации, а также возможности производить градуировку одновременно сразу нескольких резервуаров или всех резервуаров, находящихся в эксплуатации, что значительно снижает затраты и сроки на проведение градуировки.

Для осуществления способа разработано устройство, блок-схема которого представлена на рис. 1.

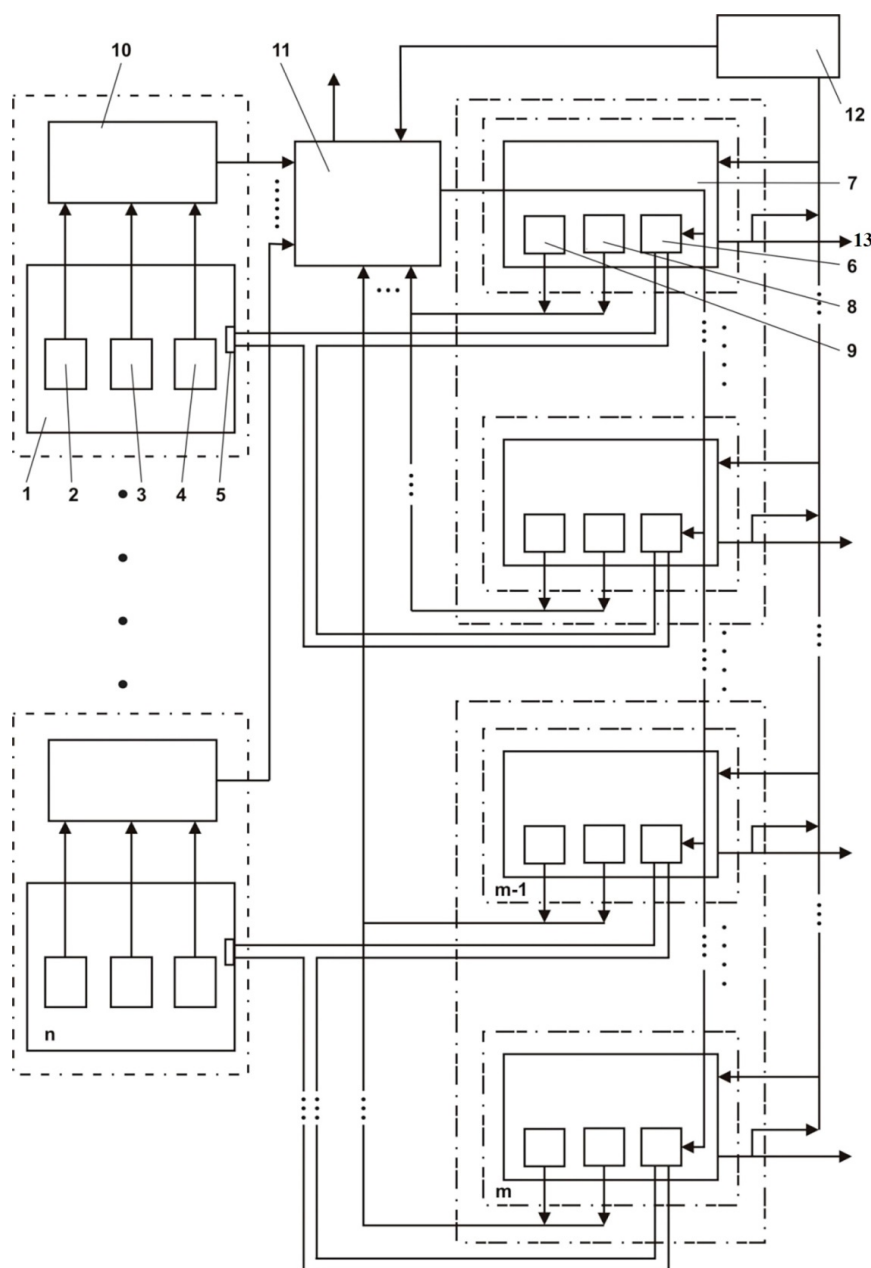


Рис. 1. Блок-схема устройства, реализующего способ автоматической градуировки резервуаров через топливораздаточную колонку

Устройство строит из резервуара 1, внутри которого по высоте устанавливается датчик уровня 2 с абсолютной погрешностью $\pm 0,5$ мм, датчик температуры 3, расположенный перед заборным устройством 4, насоса 5, подающий НП через штатную топливораздаточную колонку (ТРК) или автоматический стояк налива (АСН) 7 потребителю, и в которой установлен объемный счетчик 9 и датчик температуры ТРК или АСН 8, блок преобразователей 10, вычислительный блок 11 и объемного мерника 12 и узла отпуска НП потребителям 13.

Устройство работает следующим образом. В резервуаре 1 заливается поступающий на НБ или АЗС НП. Резервуар заполняется до величины уровня залива $H_{\max}$, которая, как правило, составляет 95 % от объема резервуара. Затем через заборное устройство 5 насосом 6 НП поступают в ТРК или АСН для заправки потребителя в штатном режиме. При этом объем отпускаемых потребителю НП фиксирует объемный счетчик 9, показания которого вместе с показаниями датчика температуры ТРК или АСН 8 поступают на вход вычислительного блока 11. Выходные сигналы датчика уровня 2 и датчика температуры 4 поступают на соответствующие входы блока преобразователей 10, с выхода которого объединенный сигнал поступает на вход вычислительного блока 11, в котором эта информация обрабатывается с помощью программы с учетом данных резервуаров, заложенных в вычислительный блок заранее, и в виде выходных сигналов управления поступает на останов либо работу насоса 6. На третий вход вычислительного блока 11 три раза в сутки поступает информация с образцового мерника 12 относительно ежесуточной систематической составляющей погрешности ТРК или АСН.

Практическую реализацию способа осуществляют следующим образом. Резервуар, подлежащий градуировке, наполняют НП до максимально допустимой величины залива $H_{\max}$. В вычислительном блоке 10 фиксируют показания счетчика или счетчиков, если этот резервуар обслуживает несколько ТРК или АСН, работающих с поверяемым резервуаром. На этом заканчивается этап предварительной подготовки устройства к градуировке резервуара, и сама градуировка производится при штатной работе ТРК или АСН во время отпуска НП потребителям во время штатной работы АЗС или НБ. Отпуск НП из градуируемого резервуара производится через одну или нескольких ТРК или АСН последовательно или параллельно суммарной дозой, равной приблизительно изменению уровня в резервуаре на 10–40 мм до фиксированной единицы измерения уровня. После чего отпуск с поверяемого резервуара прерывается приблизительно на 2 мин для успокоения колебаний поверхности НП в резервуаре после срабатывания отсечных клапанов ТРК или АСН, и затем показания средств измерений объемного счетчика 9, датчика температуры 8, датчика уровня 2 и датчика температуры 4 опять поступают в запоминающее устройство вычислительного блока 11. По окончании временной паузы отпуск НП из поверяемого резервуара опять возобновляется через одну или несколько ТРК или АСН последовательной или параллельной суммарной дозой до следующей фиксированной единицы измерения уровня. Процедура отпуска и прерывания производится таким образом до достижения уровня НП в резервуаре до значения $H_{\min}$. При достижении уровня НП в резервуаре значения $H_{\min}$ вычислительный блок 11 по определенной программе производит расчет градуировочной характеристики резервуара.

Практическая реализация вышеописанного способа автоматической градуировки резервуаров сопряжена с преодолением ряда проблем, а именно: при передаче единицы измерений от эталонных средств измерений рабочим погрешность эталонных средств должна превосходить рабочие согласно методике поверки данных средств измерений в 2–3 раза. В то же время ТРК или АСН имеют относительную суммарную погрешность измерения величины объема расхода $\sim \pm 0,2$ %, т.е. чтобы отградуировать резервуар также с относительной погрешностью $\pm 0,2$ %, относительная погрешность объемного расходомера согласно методике его поверки должна находиться в пределах $\pm 0,1$ – $0,06$ %. При этом следует иметь в виду, что, оценивая погрешность результата, получаемого при статистической обработке многократных отсчетов, нужно помнить о том, что при усреднении уменьшаются лишь случайные погрешности, в то время как систематическая погрешность, присутствующая во всех усредненных отсчетах, остается без изменений.

Новизна предложенного способа заключается в переводе систематической погрешности узлов учета ТРК или АСН в разряд случайных путем их поверки с помощью эталонного объемного мерника и введением постоянной поправки перед каждым опорожнением всего резер-

вуара. В этом случае не исключенная систематическая погрешность Δ_i в каждом из усредненных отсчетов принимает случайное значение [5, 6], т.е.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i \pm \Delta_i)}{N}, \quad (1)$$

где $\bar{X}$ – среднеарифметическое значение вместимости градуируемого резервуара при проведении N -испытаний; X_i – вместимость градуируемого резервуара в i -м испытании; Δ_i – абсолютная погрешность узла учета в i -м испытании, вычисленная по результатам измерений эталонного мерника; N – суммарное число испытаний;

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (2)$$

где σ_x – среднеквадратическая погрешность узла учета в N серии испытаний.

Среднее квадратическое отклонение рассеяния оценки $\sigma_{\bar{x}}$ зависит от среднеквадратического отклонения разброса усредняемых отсчетов и числа N независимых отсчетов друг от друга

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$

При объеме выборки $N > 8$ отличие квантилей распределения Стьюдента от квантилей нормального распределения ($n \rightarrow \infty$) составляет менее 20 %, поэтому квантильную оценку Δp погрешности с заданной доверительной вероятностью P произведем по формуле

$$\Delta p = t_n \sigma_{\bar{x}} = t_n \frac{\sigma_{xi}}{\sqrt{N}}, \quad (4)$$

где t_n – нормальный квантиль нормального распределения для заданной вероятности P .

В соответствии с ГОСТ 8.346–2000 погрешность измеряемых параметров резервуаров при объемном методе должна соответствовать табл. 1.

Таблица 1

Погрешность измеряемых параметров резервуаров при объемном методе

Измеряемый параметр	Пределы допускаемой погрешности измерений
Объем дозы жидкости при градуировке, %	$\pm 0,15$
Уровень жидкости, мм	± 1
Температура жидкости, °C	$\pm 0,2$
Температура воздуха, °C	$\pm 0,1$
Давление жидкости избыточное, %	$\pm 0,4$

При соблюдении указанных в табл. 1 пределов допускаемой погрешности измерений погрешность определения вместимости резервуара при объемном методе поверки не должна превышать:

- а) $\pm 0,25$ % – при измерениях объема дозы жидкости с погрешностью $\pm 0,15$ %;
- б) $\pm 0,20$ % – при измерениях объема дозы жидкости с погрешностью $\pm 0,1$ %.

Определим на практическом примере необходимое число полного опорожнения резервуара n , при котором выполняются условия измерения объема дозы НП узлом учета с погрешностью $\pm 0,1$ %. При этом будем полагать, что $\sigma_{xi} = \pm 0,2$ %; $P = 0,95$; $t_n = 1,96$:

$$N = \left(\frac{t_n \sigma_{xi}}{0,1} \right)^2 = \left(\frac{1,96 \cdot 0,2}{0,1} \right)^2 = 16.$$

Одновременно с этим обеспечивается и заданная доверительная вероятность получаемого результата погрешности градуировки резервуара.

Предложенный способ и реализующее его устройство позволяют неконтролируемую систематическую погрешность колонки перевести в разряд случайных и по мере набора статистики уменьшить суммарную погрешность колонки с $\pm 0,25$ % практически до $\pm 0,05$ %. Благодаря этому удается обеспечить высокую точность и достоверность получаемой градуировочной характеристики резервуара, не выводя колонку из режима ее штатной работы.

Заключение

Разработанный способ автоматической градуировки резервуаров АЗС и НБ с помощью штатных ТРК или АСН, входящих в состав автоматизированных ИИС, обеспечивает проведение градуировки с заданной точностью и доверительной вероятностью. Также позволяет проводить градуировку одновременно сразу нескольких резервуаров, находящихся в эксплуатации, что значительно снижает затраты на градуировку и сроки ее проведения.

Библиографический список

1. ГОСТ 8.570–2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки.
2. ГОСТ 8.346–2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки.
3. Пат. 2178153. Способ градуировки резервуаров и устройство для его осуществления / А. Р. Акопян, Р. А. Акопян, А. Г. Годнев, Г. И. Лакиза, А. М. Несговоров, В. С. Солда-тов ; опубл. 2002, Бюл. № 1.
4. Государственная система обеспечения единства измерения. Градуировочные характеристики резервуаров АЗС и нефтебаз. Методики определения и контроля при помощи топливо-раздаточных колонок в процессе эксплуатации. МИ 2564-99 / исполнители: Годнев А. Г.
5. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
6. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. – 816 с.

Годнев Александр Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный университет
нефти и газа имени И. М. Губкина
(Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 65)
E-mail: ntc-korolev@yandex.ru

Godnev Aleksandr Gennadevich

candidate of technical sciences, associate professor,
Russian State University of Oil and Gas
named after I. M. Gubkin
(65 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Годнев, А. Г. Автоматизированная градуировка резервуаров с помощью штатных узлов учета информационно-измерительных систем АЗС и нефтебаз / А. Г. Годнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 19–24. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-3.

А. Г. Годнев

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА НЕФТЕПРОДУКТОВ

A. G. Godnev

TECHNIQUE OF DESIGNING A WIDE-BAND BAND CAPACITIVE LEVEL SENSOR FOR AUTOMATED INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS OF PETROLEUM PRODUCTS

А н н о т а ц и я. Материалы и методы. Разработан метод проектирования емкостных датчиков уровня на основе многослойных печатных плат, позволяющий создать целый ряд высокоточных, дешевых и надежных средств измерений для уровня широкого класса неэлектропроводных жидкостей. Новизна метода заключается в формировании на печатных платах эталонных концевых мер, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и представляющих собой дискретные сигнализаторы уровня с абсолютной погрешностью срабатывания $\Delta = \pm 0,3$ мм. **Результаты.** Встроенные в датчик эталонные концевые меры позволяют в процессе наполнения и опорожнения резервуара производить его автоматическую автокалибровку и тем самым исключить влияние различных дестабилизирующих факторов на точность измерений. Также с помощью эталонных концевых мер проводится периодическая поверка уровнемера без его демонтажа с объекта установки. **Выводы.** Объединение в едином технологическом цикле изготовления измерительных электродов датчика уровня, его эталонных концевых мер, а также линий связи с его вторичным преобразователем позволяет значительно снизить себестоимость его производства и, как следствие, повысить конкурентоспособность на внешнем рынке.

A b s t r a c t. Materials and methods. A method has been developed for designing capacitive level sensors based on multilayer printed circuit boards, which makes it possible to create a range of highly accurate, cheap and reliable measuring instruments for a wide class of non-conducting liquids. The novelty of the method lies in the formation of standard end measures on printed circuit boards located at a certain distance from each other and representing discrete level signaling devices with an absolute error of response $\Delta = \pm 0.3$ mm. **Results.** The reference end measures built into the sensor allow the process of filling and emptying the tank to automatically auto-calibrate it and thereby eliminate the influence of various destabilizing factors on the measurement accuracy. Also, with the help of standard end measures, periodic calibration of the level gauge is carried out without dismantling it from the installation object. **Conclusions.** Combining in a single technological cycle of manufacturing the measuring electrodes of the level sensor, its reference end measures, as well as communication lines with its secondary transducer can significantly reduce the cost of its production and, consequently, increase competitiveness in the external market.

К л ю ч е в ы е с л о в а: емкостной уровнемер, метод проектирования, погрешность измерений, калибровка, печатная плата.

Key words: capacitive level gauge, design methodology, measurement error, calibration, printed circuit board.

В информационно-измерительных системах (ИИС) учета нефтепродуктов датчик уровня играет одну из ключевых ролей. Абсолютная погрешность измерения в диапазоне измерений от 0 до 20 мм не должна превышать значения ± 1 мм, что соответствует относительной погрешности $\pm 5 \cdot 10^{-3} \%$. Создание такого уровнемера, работающего в температурном диапазоне $-50 \div +50$ °С, представляет собой достаточно сложную научно-техническую задачу. Как показывает опыт отечественного и зарубежного приборостроения, перспективными для измерения широкого круга физических величин являются емкостные датчики, отличающиеся высокими эксплуатационными характеристиками, надежностью, простотой и технологичностью изготовления наряду с невысокой конечной стоимостью.

Согласно основному выводу Бриллюэна информация может быть получена только в результате затрат энергии. В этой связи при проектировании емкостного датчика уровня необходимо стремиться получить как можно большую девиацию начальной емкости при изменении входной величины. Типичная область девиации номинальных значений емкостей датчиков лежит от единиц до нескольких сотен пикофард [1, 2]. Чувствительность же измерительных каналов достигает значений в сотые и даже тысячные доли пикофард [2], при этом паразитные емкости соединительных линий могут в сотни и тысячи раз превышать преобразуемую емкость.

В настоящее время наибольшее распространение получили преобразователи емкость-напряжение (ПЕН) с импульсным уравниванием зарядов (рис. 1).

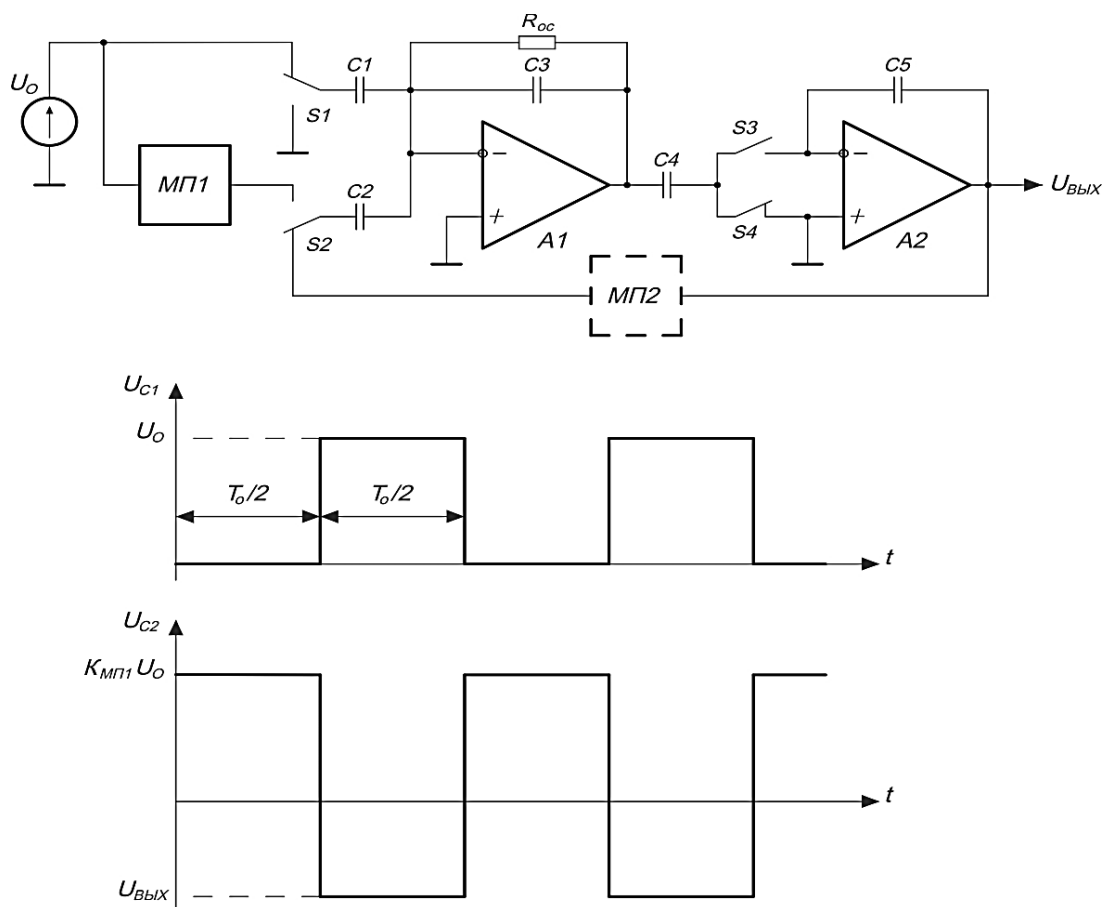


Рис. 1. Функциональная схема и временные диаграммы работы преобразователя относительного приращения емкости

Отличной особенностью данных ПЕН является возможность обеспечения инвариантности к паразитным емкостям и реализации функции преобразования, позволяющей уменьшить погрешность измерительного канала в целом [3, 4]. Уравнение преобразования ПЕН имеет вид

$$U_{\text{вых}} = U_0 \left(K_{\text{мп1}} - \frac{C1}{C2} \right), \quad (1)$$

где $K_{\text{мп1}}$ – коэффициент передачи масштабного преобразователя МП1.

Принцип действия данного ПЕН основан на уравнивании измерений зарядов на конденсаторах $C1$ и $C2$:

$$U_0 C1 + (U_{\text{вых}} - K_{\text{мп1}} U_0) C2 = 0. \quad (2)$$

Соответствующим выбором коэффициента $K_{\text{мп1}}$ обеспечивается компенсация смещения передаточной характеристики ПЕН, вызванного нулевым значением начальной емкости измерительного конденсатора. Следствием такой компенсации является исключение влияния неустойчивости коэффициента преобразования ПЕН на аддитивную погрешность и возможность существенного увеличения чувствительности.

Эффективное увеличение чувствительности обеспечивается уменьшением коэффициента передачи цепи обратной связи путем введения масштабного преобразователя МП2. В этом случае уравнение преобразования ПЕН имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{K_{\text{мп2}}} \left(K_{\text{мп1}} - \frac{C1}{C2} \right), \quad (3)$$

где $K_{\text{мп2}}$ – коэффициент передачи масштабного преобразователя МП2.

Основными причинами, определяющими порог чувствительности ПЕН, являются шумы операционных усилителей (ОУ) и сопротивления обратной связи преобразователя заряд-напряжение (ПЗН), а также сопротивления утечки измерительного конденсатора $C1$ и линии связи, подключенной к входу ПЗН (рис. 2).

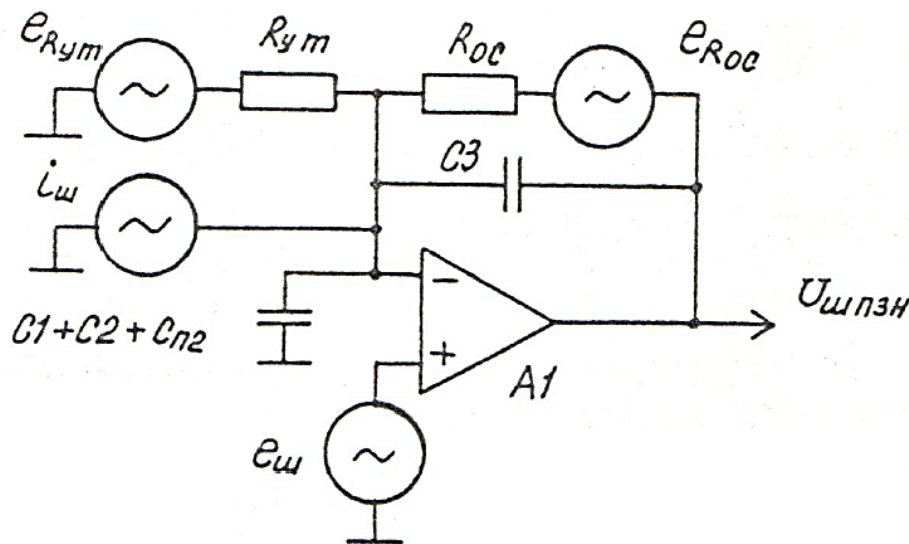


Рис. 2. Схема ПЗН с основными источниками шумов

Особенность работы емкостного датчика заключается в отличии от нуля начального значения входной величины ПЕН. В этом случае измерительную емкость $C1$ и опорную $C2$ целесообразно представить в виде $C1 = C_{10} + \Delta C_1$, $C2 = C_{20} + \Delta C_2$, где C_{10} и C_{20} – начальное значение емкости, ΔC_1 и ΔC_2 – изменение соответственно емкости $C1$ и емкости $C2$ относительно своих начальных значений. Тогда согласно работе [5] минимальные размеры относительных изменений преобразуемых величин в устройстве с измерительным конденсатором $C1$ и опорным конденсатором $C2$ при известных эффективных значениях напряжений шумов на выходе определяются соотношениями

$$\lambda_{1ш} = \frac{U_{ш} C_2}{U_0 C_{10}}, \lambda_{2ш} = \frac{U_{ш} C_{20}}{U_0 C_1}, \quad (4)$$

где $\lambda_{1ш}$ – шумовая погрешность преобразования;

$$U_{ш} = \frac{2}{C_2} \sqrt{e_{ш}^2 (C_1 + C_2 + C_3 + C_{п2})^2 + (i_{ш} T_0)^2 + 8kTT_0 C_3} \Delta F, \quad (5)$$

$U_{ш}$ – эффективное значение шума на выходе ПЕН; C_1 – измеряемая емкость; C_2 – опорная емкость; C_3 – емкость в цепи обратной связи усилителя заряда А1; $C_{п2}$ – паразитная емкость, подключенная к входу усилителя заряда А1; $e_{ш} = 50 \cdot 10^{-9}$ В/√Гц и $i_{ш}$ А – соответственно входное напряжение и ток шумов ОУ; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; T_0 – период одного результата измерений; U_0 – источник опорного напряжения; ΔF – полоса пропускания инерционного звена первого порядка.

Формула (5) позволяет определить максимальную величину паразитной емкости и, следовательно, длину линии связи, при которой обеспечивается заданная погрешность преобразования [3]:

$$\frac{C_{п2}}{C_1} = \frac{\lambda_{1ш} U_0}{2e_{ш} \sqrt{\Delta F}}, \quad (6)$$

где $C_{п2}$ – паразитная емкость, подключенная непосредственно ко входу усилителя заряда.

При разработке уровнемера для системы учета нефтепродуктов УИП-9602 была сформулирована главная задача обеспечить абсолютную погрешность измерения уровня ± 1 мм в диапазоне измерений 0–20 м при минимальных затратах ресурсов. Данный датчик был сконструирован на основе двусторонней печатной платы, на которой методом фотолитографии с высокой точностью сформированы его чувствительные элементы, емкостные эталонные концевые меры, а также все коммуникационные линии связи (рис. 3) [3, 4].

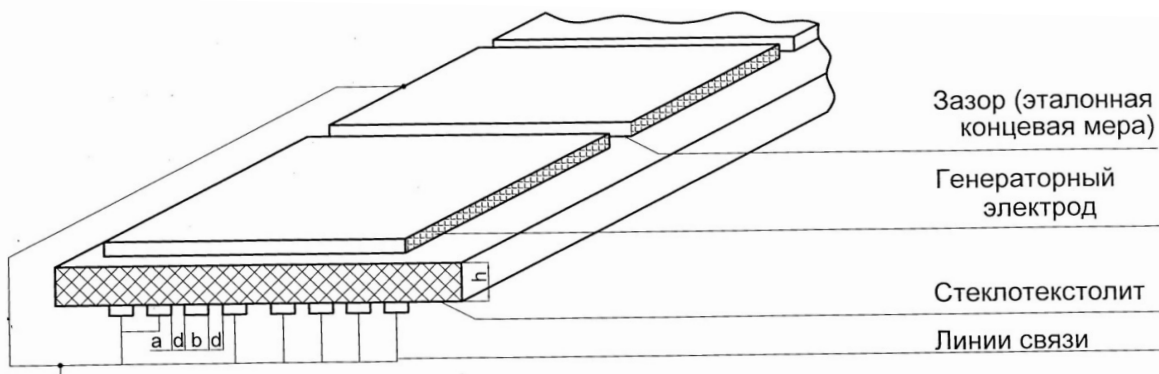


Рис. 3. Фрагмент измерительного электрода в разрезе с линиями связи

Известно, что для быстродействующей цифровой аппаратуры предпочтение следует отдавать многослойной печатной плате [6]. Системы проводников, образующих линию связи по локализации электромагнитного поля, разделяют на следующие виды: однослойные без экранирующей плоскости, двуслойные с экранирующей плоскостью и трехслойные с двумя экранирующими плоскостями. С увеличением экранирующих плоскостей электромагнитное поле все больше сосредотачивается в области между проводником и экраном, что обеспечивает стабильные электрические параметры линии по длине проводника и приводит к уменьшению уровня индуцированных помех. Однако использование в конструкции датчика уровня трехслойной печатной платы вместо двухслойной приведет к существенному его удорожанию. Поэтому весь дальнейший порядок расчета первичных и вторичных параметров печатного монтажа приведен для двусторонней печатной платы.

Поскольку в процессе проведения измерений все электроды датчика уровня и линии связи, кроме рабочих, заземляются с целью обеспечения максимальной помехоустойчивости, то расчет паразитной емкости $C_{п2}$ производится по формуле (7), приведенной в работе [7]:

$$C_{n2} = 8,85l(\epsilon_{r\text{эф.1}} C_{l\text{дв.}} + \epsilon_{r\text{эф.2}} C_{l\text{од.}}), \quad (7)$$

где l – длина линии связи, представляющая собой длину печатных дорожек уровнемера от 0,5 до 20 м; $\epsilon_{r\text{эф.1}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала пластины ($\epsilon_{r\text{эф.}} \approx 5,6 \dots 6$ [6]).

Для защиты медных электродов и линии связи от воздействия на них различных агрессивных сред, содержащихся в нефтепродуктах, они покрываются масло-бензостойкой эмалью (специальным лаком), эффективная диэлектрическая проницаемость которой $\epsilon_{r\text{эф.2}}$ прибли-

тельно равна 4; $C_{l\text{од.}} = \frac{4K}{K}$ – безразмерная величина, определяющая емкость на единицу дли-

ны рассчитываемой системы проводников для односторонней печатной платы; $K(m)$, $K'(m)$ – эллиптические интегралы как функции соответственно модулярного и дополнительного модулярного углов (определяются по таблицам полных эллиптических интегралов первого рода);

$$m = \left(1 + \frac{2a/d}{2+b/d}\right)^2 \frac{1+b/d}{(1+a/d)(1+a/d+b/d)}, \quad (8)$$

где a , b – ширина медных дорожек линий связи на печатных платах датчика уровня; d – расстояние между дорожками; h – толщина печатной платы; $C_{l\text{дв.}} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{8h}{a/2h \leq 1}\right)}$ – безразмерная

величина, определяющая емкость на единицу длины рассчитываемой для системы проводников для двусторонней печатной платы.

Таким образом, задав начальные условия, равные: $a = b = d = h = 2$ мм, $l = 12$ м, вычислив по формуле (8) значение $m = 0,926$ и по графику (рис. 4) определив отношение $\frac{K'}{K} \approx 0,51$, рассчитаем по формуле (7) значение паразитной емкости C_{n2} :

$$C_{n2} \approx 8,85 \cdot 12 \left(4 \cdot 0,51 \cdot 4 + \frac{6,28}{l_n \frac{8 \cdot 2}{2}}\right) \cdot 6 \approx 2790,0 \text{ пф.}$$

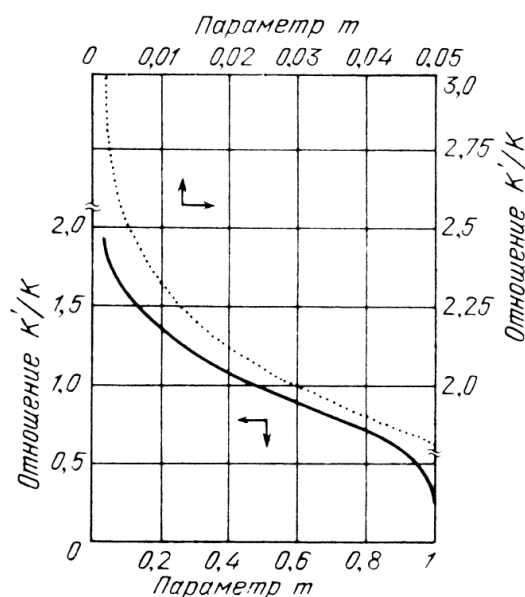


Рис. 4. Отношение $\frac{K'}{K}$ как функция параметра m

Фактическая паразитная емкость на действующих 12 м уровнемерах, изготовленных по данной технологии, не превышает значений 2240 ± 30 пф. Можно предположить, что используемые в данном расчете $\epsilon_{\text{эф}}$ материалов взяты по максимально допустимым значениям, в то время как фактические значения применяемых материалов были несколько ниже. Однако полученная оценка $C_{\text{п2}}$ позволяет сделать дальнейший обоснованный шаг в расчете минимально допустимой измеряемой емкости C_1 , при которой обеспечивается заданная погрешность преобразования при полосе пропускания ΔF и паразитной емкости $C_{\text{п2}} = 2790$ пф

$$C_{1\text{min}} = \frac{C_{\text{п2}} 2e_{\text{ш}} \sqrt{\Delta F}}{\lambda_{1\text{ш}} U_0}. \quad (8)$$

В работах [5, 6] в реальных преобразователях емкость-напряжение при $C_{\text{п2}} / C_1 = 10^3$ погрешность преобразования составляет величину $\lambda_{1\text{ш}} = 10^{-3}$ в полосе частот $\Delta F = 1000$ Гц.

В этом случае при $U_0 = 5$ в, $\Delta F = 1000$ Гц, $\lambda_{1\text{ш}} = 10^{-3}$, $e_{\text{ш}} = 50 \cdot 10^{-9} * \frac{B}{\sqrt{\Gamma \text{ц}}}$, $C_{\text{п2}} = 2790$ пф. $C_{1\text{min}}$ будет равно

$$C_{1\text{min}} = \frac{2790 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \sqrt{1000}}{10^{-3} \cdot 5} = 1,763 \text{ пф.}$$

Однако, учитывая широкий диапазон рабочих температур оборудования $\pm 50^\circ\text{C}$, а также разброс параметров применяемых электрорадиоэлементов за рабочую величину емкости $C_{1\text{р}}$, следует принять $3C_{1\text{min}}$, в данном конкретном примере принимает $C_{1\text{р}} \approx 3C_{1\text{min}} \approx 6$ пф.

Площадь конденсатора ячейки поддиапазона уровнемера 1 составит величину

$$S = \frac{C_{1\text{р}} d}{\epsilon_0} = \frac{6 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,007 \text{ м}^2.$$

После того, как определена минимальная величина емкости C_1 , при которой обеспечивается заданная погрешность преобразования $\lambda_{1\text{ш}} = 10^{-3}$ с конкретной длиной линии связи, возникает необходимость определения величины поддиапазона измерения N_1 датчика уровня. При рассчитанной чувствительности $\Delta C_1 = C_{1\text{р}} \cdot 10^{-3}$ канала измерения емкости C_1 максимальный поддиапазон измерения составит величину

$$N = \frac{C_{1\text{р}}}{\Delta C_1}. \quad (9)$$

Для нашего конкретного примера при расчетном значении $\Delta C_1 = C_1 \cdot \lambda_{1\text{ш}} = 6 \cdot 10^{-3} = 0,006$ пф/мм:

$$N_1 = \frac{6 \cdot 10^{-12}}{0,006 \cdot 10^{-12}} = 1000 \text{ мм.}$$

Однако для поддиапазона измерения датчика уровня с $N_1 = 1000$ мм погрешность нелинейности между обкладками конденсатора C_1 должна быть практически нулевой, т.е. расстояние между обкладками конденсатора $C_1 d_0$ должно быть выполнено с нулевым отклонением. В то же время при практической реализации конкретной конструкции уровнемера нелинейность от слоя запретной эмали, разновысотности соединительных втулок и т.п. составляет значение $\approx 5\%$, т.е. зазор d_0 выдерживается в заданном поддиапазоне измерений L_1 с абсолютной погрешностью $\pm 0,5$ мм (250 мк на одну сторону конденсатора C_1). Тогда на отдельных участках измерения по длине N_1 датчика уровня девиация емкости ΔC_1 [пф/мм] будет иметь большую или меньшую величину, что может привести к увеличению погрешности измерений более ± 1 мм.

Так, например, при $d_0 = 9,5$ мм C_1 составит величину

$$C_1 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,007}{0,0095} = 6,52 \text{ пф.}$$

$\Delta C_1 = C_1 - C_1 = 6,52 - 6 = 0,52$ пф на весь поддиапазон измерения L .

Также будем считать, что нелинейность зазора d_0 между пластинами конденсатора не превышает 10 % и равномерно распределена по всему поддиапазону N . В этом случае участок поддиапазона измерений N , на котором может произойти систематическая ошибка в ± 1 мм, составит величину

$$\Delta N = \frac{10 \% \Delta C_1}{100 \% \delta C_1} = \frac{0,1 \cdot 0,52}{0,006} = 8,6 \text{ мм.}$$

Для дальнейших расчетов положим $\delta C_{1p} = 8 \delta C_{1н}$, т.е. изменение емкости C_{1p} на величину $\delta C_{1p} = 8 \delta C_{1н} = 8 \cdot 0,006 = 0,048$ пф должно соответствовать изменению уровня на 1 мм. Тогда по формуле (9) несложно рассчитать значение поддиапазона измерений уровнемера N

$$N = \frac{C_1}{\delta C_{1p}} = \frac{6}{0,048} = 125 \text{ мм.}$$

Таким образом, каждый метр уровнемера получается разбит на восемь поддиапазонов измерения уровня по 125 мм, оканчивающихся эталонной концевой мерой, за счет которой в этом поддиапазоне осуществляется автокалибровка с абсолютной погрешностью $\Delta \pm 0,3$ мм. Контроль точности с помощью эталонных концевых мер осуществляется в каждом цикле измерений равномерно в пределах диапазона измерений уровня контролируемой жидкости. Структурная схема конструкции емкостного уровнемера приведена на рис. 5.

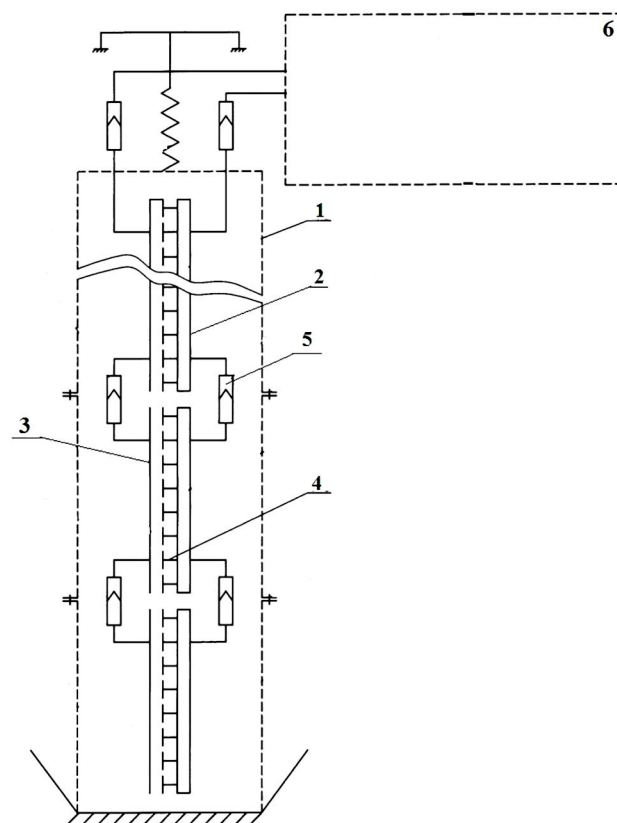


Рис. 5. Структурная схема конструкции емкостного уровнемера со штангой: 1 – несущая штанга емкостного уровнемера; 2 – секция уровнемера; 3 – выходные электроды; 4 – входные генераторные электроды; 5 – разъёмные соединения секции; 6 – электронный блок преобразователей, включающий в себя ПЕН и аналоговые ключи с внутренним сопротивлением $R = 0,01$ Ом, коммутирующие чувствительные элементы датчика уровня

Заключение

Метод проектирования емкостных датчиков уровня на основе многослойных печатных плат позволяет создать целый ряд высокоточных, дешевых и надежных средств измерений для

информационно-измерительных систем учета нефтепродуктов. Встроенные в датчик эталонные концевые меры позволяют каждые 125 мм производить его автокалибровку и тем самым избежать периодическую поверку службами Госстандарта.

Библиографический список

1. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Ленинград : Энергия, 1980. – 240 с.
2. Грохольский, А. Л. Емкостные первичные измерительные преобразователи диаметра неизолированного микропровода / А. Л. Грохольский, М. М. Горбов, М. Г. Струнский, В. К. Федотов // Измерения, контроль, автоматизация : науч.-техн. сб. обзоров. – Москва : ЦНИИ ТЭН приборостроения, 1978. – Вып. 2. – С. 16–23.
3. Чередов, А. И. Преобразователи для электрического измерения параметров емкостных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / Чередов А. И. – Ленинград, 1984.
4. Бухгольц, В. П. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / В. П. Бухгольц, Э. Г. Тисевич. – Москва : Энергия, 1972. – 80 с.
5. Пат. 2239164. Емкостной уровнемер со штангой / Годнев А. Г., Суслов В. М. // Бюллетень изобретений. – 2002. – № 30.
6. А.с. 2005999. Устройство для измерения уровня жидкости / Годнев А. Г., Свицын А. А., Суслов В. М. Заявл. 10.02.1992 ; опубл. 15.01.1994.
7. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместности / А. Д. Князев, Л. Н. Кечнев, Б. В. Петров. – Москва : Радио и связь, 1989. – 224 с.

Годнев Александр Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный университет
нефти и газа имени И. М. Губкина
(Россия, г. Москва, Ленинский просп., 65)
E-mail: ntc-korolev@yandex.ru

Godnev Aleksandr Gennadevich

candidate of technical sciences, associate professor,
Russian State University of Oil and Gas
named after I. M. Gubkin
(65 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Годнев, А. Г. Методика проектирования широкодиапазонного емкостного датчика уровня для автоматизированных информационно-измерительных систем учета нефтепродуктов / А. Г. Годнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 25–32. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-4.

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.518.54; 681.586.773

DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-5

*П. Г. Михайлов, А. В. Соколов, А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев*САМОДИАГНОСТИКА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН*P. G. Mikhailov, A. V. Sokolov, A. U. Analieva, A. P. Mikhailov, E. D. Fadeev*SELF DIAGNOSTICS IN INTELLECTUAL CONVERTERS
OF PHYSICAL VALUES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Исследована возможность диагностики и контроля преобразователей физических величин (ПФВ) как на уровне элементов и узлов, так и всего преобразователя. **Материалы и методы.** Выполнено математическое моделирование тензорезистивного чувствительного элемента (ЧЭ) с мостовой схемой преобразования. Предложены критерии исправности тензорезистивных преобразователей давления. **Результаты.** Приведены расчетные соотношения для определения критериев исправности и допусков на их численные значения. Получены статистические оценки методической и случайной составляющих погрешностей критериев исправности тензорезистивной мостовой схемы. Предложена модульная концепция производства и контроля элементов, узлов и самих интеллектуальных ПФВ на основе применения функционально и конструктивно законченных ЧЭ, измерительных модулей (ИМ) и электронных преобразователей (ЭП), изготавливаемых на передовых предприятиях в России и за рубежом. Приведены схема процедуры сквозной диагностики модульного ПФВ, а также конструкции ЧЭ и ИМ интеллектуальных преобразователей давления. **Выводы.** Применение предложенных программно-аппаратных методов диагностики и контроля элементов, блоков и самих модульных датчиков позволяет создавать интеллектуальные ПФВ, обладающие высокой надежностью, широкими функциональными возможностями и простотой технической реализации.

A b s t r a c t. Background. The possibility of diagnostics and control of physical quantity converters (PFV), both at the level of elements and nodes, as well as the entire converter, is investigated. **Materials and methods.** Mathematical modeling of a tensor-resistive sensitive element (SE) with a bridge conversion circuit was performed. Criteria of serviceability of strain-resistant pressure transducers are proposed. **Results.** The calculated ratios for determining the criteria for serviceability and tolerances on their numerical values are given. Statistical estimates of the methodological and random components of the errors of the serviceability criteria of a tensor-resistive bridge circuit are obtained. A modular concept of production and control of elements, components, and the intelligent PFV itself was proposed based on the use of functionally and structurally complete SE, measurement modules (MM) and electronic transducers (ET) manufactured at advanced enterprises in Russia and abroad. The scheme of the procedure for end-to-end diagnostics of modular PFV as well as the design of SE and MM of intelli-

gent pressure transducers are presented. **Conclusions.** The use of the proposed software and hardware methods for diagnosing and monitoring elements, blocks and the modular sensors themselves allows creating intelligent PFV with high reliability, wide functionality and ease of technical implementation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: физическая величина, преобразователь, мостовая схема, измерительный модуль, чувствительный элемент, электронный преобразователь.

К e y w o r d s: physical quantity, transducer, bridge circuit, measuring module, sensitive element, electronic transducer.

Так называемые «интеллектуальные датчики» или электронные ПФВ, сообщения о которых постоянно появляются в Интернете и в статьях [1, 2], содержат в качестве основного узла встроенное вычислительное устройство (ВУ), которое позволяет решать задачу автоматизации диагностики отдельных узлов и элементов ПФВ. В то же время в области средств измерения давления остается нерешенной проблема полной диагностики всего ПФВ в целом, включая его ЧЭ, ИМ и ЭП.

Рассмотрим один из возможных методов проведения самодиагностики ЧЭ датчиков давления с интегральными тензорезисторами и встроенным ВУ в виде микроконтроллера или микропроцессора (рис. 1) [3].

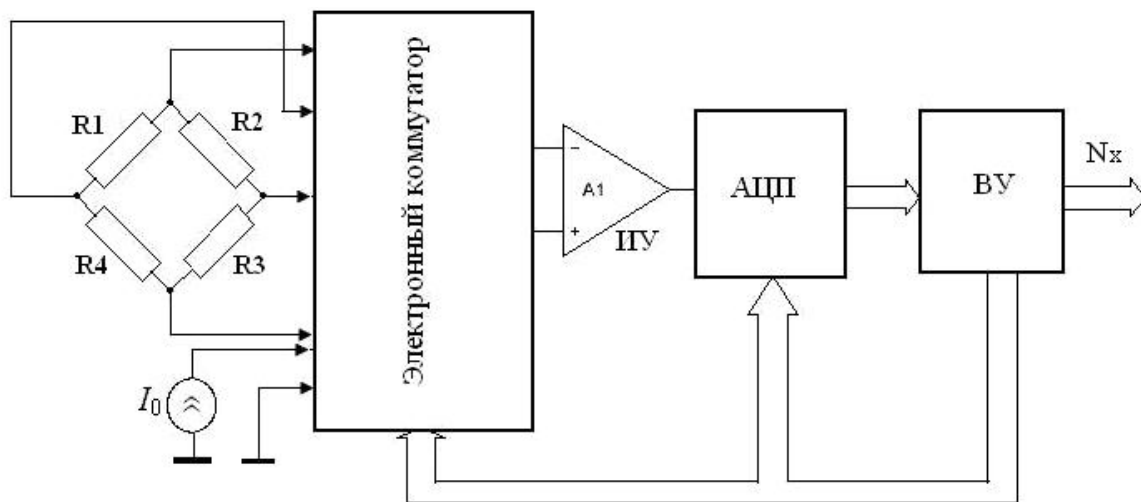


Рис. 1. Функциональная схема электронного ПФВ:

R_1 – R_4 – тензорезисторы; I_0 – источник постоянного тока; N_x – цифровой код; ИУ – измерительный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВУ – вычислительное устройство

Тензорезисторный преобразователь, построенный по мостовой схеме, где все четыре плеча являются активными тензорезисторами, обладает информационной избыточностью, которая используется для самодиагностики. На рис. 1 показана функциональная схема подключения тензорезисторного преобразователя к измерительному усилителю через коммутатор, управляемый сигналами от ВУ. Мостовая схема тензопреобразователя питается от источника тока I_0 согласно схеме рис. 2,а. Можно показать, что напряжение на выходной диагонали моста равно

$$\Delta U_1 = U_1 - U_2 = \frac{(R_3 - \Delta R_3) \cdot (R_1 + R_2 + \Delta R_1 - \Delta R_2) - (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + R_4 + \Delta R_4 - \Delta R_3)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \Delta R_1 + \Delta R_4 - \Delta R_2 - \Delta R_3)} I_0. \quad (1)$$

Соседние плечи тензомоста имеют приращения сопротивления ΔR_i разных знаков. Можно считать, что приращение сопротивлений отдельных тензорезисторов мало отличается друг от друга. Это дает основание полагать, что $\Delta R_i - \Delta R_{i-1} \ll \Delta R_i$. Опуская величины второго порядка малости в формуле (1), получаем

$$\Delta U_1 = -\frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3) + \Delta R_3 (R_1 + R_2) + \Delta R_1 (R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} I_0. \quad (2)$$

Зафиксировав код ΔU_1 , ВУ выдает импульс на переключение коммутатора. При этом мост переконфигурируется в соответствии со схемой рис. 2, б, при этом

$$\Delta U_2 = U_2 - U_1 = \frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3) + \Delta R_2 (R_3 + R_4) + \Delta R_4 (R_1 + R_3)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} I_0. \quad (3)$$

Оно также фиксируется соответствующим кодом.

Отношение напряжений исходя из (2) и (3) будет

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3) + \Delta R_2 (R_3 + R_4) + \Delta R_4 (R_1 + R_3)}{(R_1 R_4 - R_2 R_3) + \Delta R_3 (R_1 + R_2) + \Delta R_1 (R_3 + R_4)}, \quad (4)$$

где величина $R_1 R_4 - R_2 R_3$ выражает начальный разбаланс моста. При выполнении тензорезисторного преобразователя по интегральной технологии, обеспечивающей минимальный разброс по номиналам тензорезисторов внутри мостовой схемы, эта величина мала, так что, начиная с некоторых $\Delta R_i = K_i P$, где P – измеряемое давление, а K_i – коэффициент тензочувствительности i -го тензорезистора ($i = 1, 2, 3, 4$), можно считать, что $R_1 R_4 - R_2 R_3 \ll \Delta R_i (R_k + R_{k+1})$. Тогда формула (4) будет независима от измеряемой величины (P), что позволяет проводить самодиагностику, как без подачи давления (начальный этап), так и в процессе измерений, при этом давление не будет вносить помехи в результаты диагностических тестов.

Диагностическим параметром будет отношение двух напряжений:

$$C = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{K_2 (R_3 + R_4) + K_4 (R_1 + R_3)}{K_3 (R_1 + R_2) + K_1 (R_3 + R_4)}, \quad (5)$$

где K_i – коэффициент тензочувствительности – безразмерная величина, значение которого зависит от материала тензорезистора ($K = 1,5 \dots 2,5$ для металлов и сплавов и $K = 25 \dots 80$ в зависимости от уровня легирования для кремния) [4].

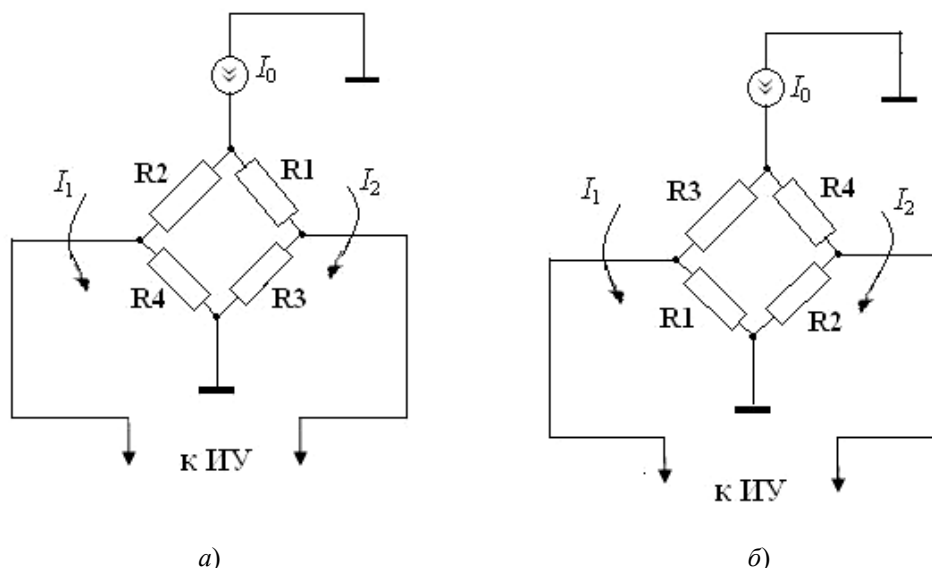


Рис. 2. Тензорезисторный преобразователь мостового типа с различным включением тензорезисторов: а – прямое; б – реконфигурируемое

Отношение C можно принять в качестве критерия исправности тензопреобразователя. Оно не зависит от измеряемой величины – давления P и от температуры, поскольку тензорезисторы выполнены на одной мембране из одного материала. При сравнении в процессе диа-

гностики полученного отношения C с величиной C' , вычисленной при тарировке датчика, можно сделать выводы об исправности или неисправности тензопреобразователя.

Наличие шумов в измерительном усилителе и погрешностей преобразования в АЦП делает необходимым учесть эти факторы при определении поля допусков $\pm \varepsilon$ на величину C' , хранимую в виде константы в постоянной памяти ВУ. Поиск оптимальной ширины поля допуска может быть осуществлен на основе метода наибольшего правдоподобия, в котором минимизируется функционал [5]:

$$L = Z_{12} p_2 \int_{-\infty}^{X_0} p\left(\frac{X_0}{D_1}\right) dx + Z_{21} p_1 \int_{X_0}^{\infty} p\left(\frac{X_0}{D_2}\right) dx, \quad (6)$$

где p_1 – априорная вероятность исправного состояния, p_2 – априорная вероятность неисправного состояния; Z_{12} , Z_{21} – цены пропуска дефекта и ложной тревоги (ошибки); $p\left(\frac{X_0}{D_1}\right)$ и $p\left(\frac{X_0}{D_2}\right)$ – плотности распределения вероятностей пропуска дефекта и ложной тревоги; X_0 – граничное значение контролируемого параметра, характерное тем, что при $X > X_0$ прибор следует забраковывать; dx – элементарное приращение контролируемой величины.

Для определения допуска на возможное изменение C ранее рассчитанных выходных напряжений с диагонали моста с учетом погрешностей, приведенных ко входу ИУ и последующих преобразований, можно записать в виде

$$\Delta U_1 = \Delta U_i^0 + \delta_i, \quad (7)$$

где будем полагать погрешности δ_i малыми величинами, некоррелированными между собой и распределенными по нормальному закону (Гаусса) с нулевым математическим ожиданием [6, 7].

Тогда плотность распределения вероятности отношения $\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$ для исправного тензопреобразователя составит

$$p(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(C - \bar{C})^2}{\sigma^2} \right], \quad (8)$$

где $\sigma^2 = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\Delta U_1 \cdot \Delta U_2}$; $\bar{C} = \frac{\Delta U_2^0}{\Delta U_1^0}$; σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) (σ^2 – дисперсия) распределения; σ_1 и σ_2 – СКО соответственно распределения массива данных ΔU_1 и ΔU_2 .

Если хотя бы один из резисторов тензопреобразователя существенным образом изменит свою величину, то выходной сигнал, приведенный ко входу измерительного усилителя будет находиться в пределах

$$-\frac{U_m}{k} \langle \Delta U_i \rangle \frac{U_m}{k}, \quad (9)$$

где U_m – максимальный выходной сигнал усилителя; k – его коэффициент усиления.

Отношение выходных сигналов в двух тактах диагностики может изменяться от близкого к 1 (при исправном ИМ или ЧЭ) до 2 (при обрыве одного из тензорезисторов).

Численное значение плотности распределения вероятности при этом составит

$$p(C) = 1/2. \quad (10)$$

Приравнявая (8) и (10) и проводя преобразования, получим

$$C_{1,2} = \bar{C} \pm \sigma \sqrt{-2 \ln \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{2} \sigma \right)}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что величина допуска $\varepsilon = \sigma \cdot \sqrt{-2 \ln \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{2} \cdot \sigma \right)}$ на возможные изменения отношения $C = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$ определяется лишь средней геометрической величиной отношения сигнал/шум в цепи преобразования сигнала тензопреобразователя. Поскольку шумы ИУ и погрешности АЦП обычно значительно превышают случайные погрешности тензопреобразователя, можно считать, что $\frac{\Delta U_1}{\delta_1} = \frac{\Delta U_2}{\delta_2} = S$ – отношению сигнал/шум в цепи преобразования [8].

Техническая реализация и производство интеллектуальных датчиков с элементами диагностики и контроля могут быть осуществлены с использованием концепции модульных конструкций, при которой датчик собирается из готовых, конструктивно и функционально законченных узлов: ЧЭ, ИМ (рис. 3) и модульного электронного блока.

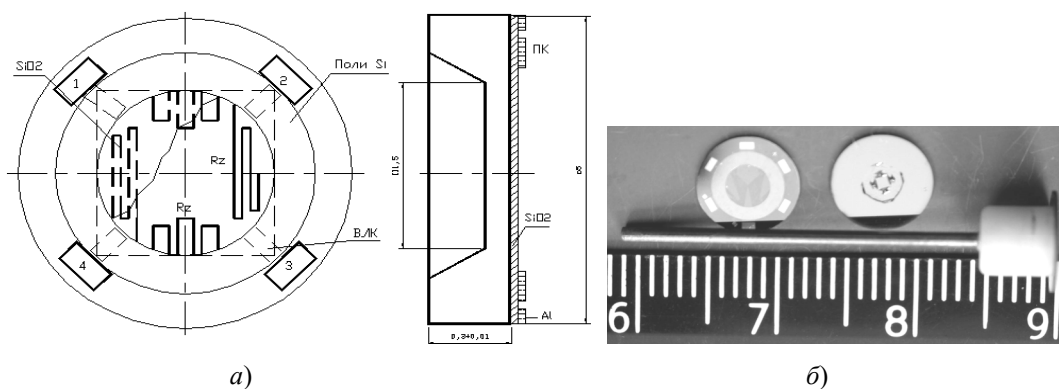


Рис. 3. Полупроводниковые ЧЭ (а) и ИМ (б) преобразователей давления

Следует подчеркнуть, что ЧЭ и ИМ представляют собой функционально и конструктивно законченные изделия, которые изготавливаются известными на мировом рынке фирмами (*Trafag*, *Endevco*, Орлекс, МИЭТ) (рис. 4), имеющими высокотехнологичное оборудование и отработанные технологии [9].

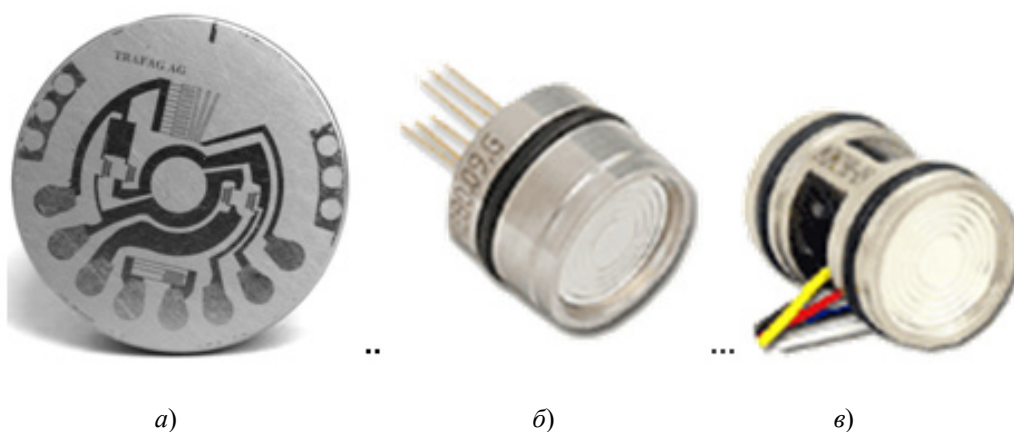


Рис. 4. Зарубежные ИМ 100 % готовности: а – тонкопленочный ИМ фирмы «Trafag»; б – MPM280-03-G-0-L-1 ИМ относительного давления; в – MDM290

Как показали отечественные и зарубежные источники, выпускаемые комплектующие ЧЭ и ИМ для ПФВ подвергаются диагностике и контролю на всех этапах технологического процесса изготовления [10–13].

На рис. 5 схематично показана графическая модель сквозной диагностики модульного ПФВ, включающая:

- контроль и диагностику ЧЭ с использованием модернизированной зондовой установки;
- установку ЧЭ в ИМ, проведение технологических тренировок и контроль диагностических параметров;
- диагностику и проведение тренировок электронного блока (ЭБ);
- установку ИМ и ИМ в корпус датчика и совместную настройку;
- проведение приемо-сдаточных испытаний с занесением в ОЗУ микроконтроллера ЭБ индивидуальных технических характеристик ПФВ.



Рис. 5. Графическая модель сквозной диагностики модульного ПФВ

Такая технология изготовления и методика диагностики ПФВ позволяет [14, 15]:

- использовать принятый в высокотехнологичном производстве принцип разделения труда и кооперации;
- резко сократить время на разработку ПФВ путем использования стандартизированных ЧЭ и ИМ, встраиваемых в корпуса датчиков различной конфигурации;
- значительно сократить трудоемкость изготовления ПФВ за счет исключения операций настройки ЧЭ и ИМ;
- уменьшить себестоимость ПФВ и информационно-измерительных систем на их основе;
- снизить требования к квалификации сборщиков ПФВ;
- расширить номенклатуру ПФВ;
- обеспечить высокую временную стабильность;
- упростить стыковку первичных преобразователей с электроникой за счет унификации выходных сигналов ЧЭ и ИМ;
- повысить эксплуатационную надежность ПФВ за счет высокой, изначально гарантированной, надежности покупных ЧЭ и ИМ;
- провести оптимизацию конструктивного исполнения узлов ИМ для обеспечения автоматизированной сборки датчиков;
- повысить импортозамещение при производстве измерительных приборов в России.

Следует также отметить, что технологичность и трудоемкость контроля и диагностики ЧЭ и ИМ напрямую зависят от их контролепригодности, признаки которой включают: простоту конструкции и наличие выводных коммутационных проводников или штырей; наличие контактных площадок достаточной площади, расположенных по периферии ЧЭ; возможность визуального контроля процесса контактирования зондов измерительного прибора и контактных площадок ЧЭ; достаточность получаемой диагностической информации, по которой можно судить о качестве контролируемых изделий и проч.

Так, в качестве примера, на рис. 6 приведена топология и конструкция контролепригодного микросэлектронного ЧЭ, контактные площадки которого находятся на периферии в утолщенной части ЧЭ, что позволяет осуществлять контроль и диагностику его различных электрофизических характеристик [16–18].

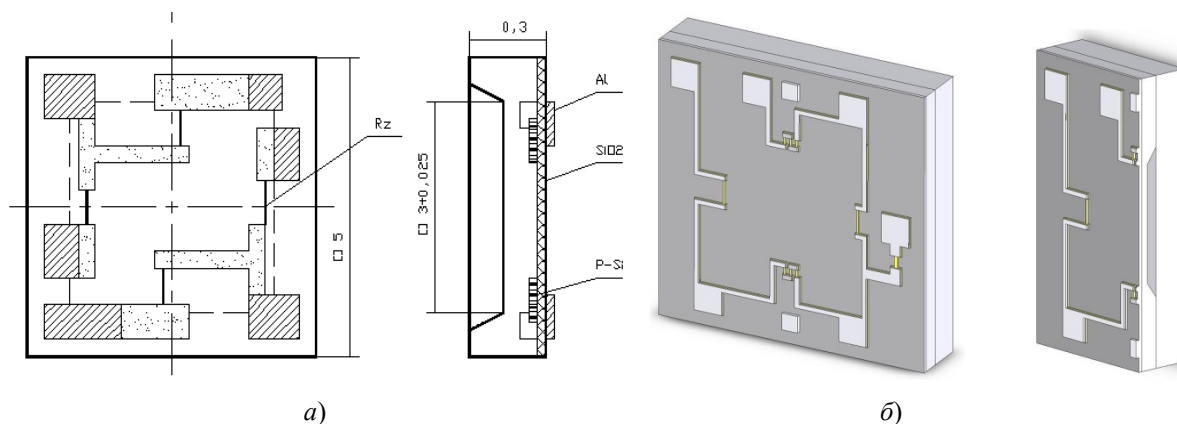


Рис. 6. Полупроводниковый ЧЭ с профилированным упругим элементом, тензо- и терморезисторами:
а – топология; б – 3D-модель

Выводы

Таким образом, применение предложенных программно-аппаратных методов диагностики и контроля элементов, блоков и самих модульных датчиков позволяет создавать интеллектуальные ПФВ и их компоненты, обладающие высокой надежностью, широкими функциональными возможностями и простотой технической реализации.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51086–97 Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. – Москва, 1997.
2. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – Москва, 2009.
3. Ожигенов, К. А. Технические измерения в технологии и производстве радиоэлектронной аппаратуры и измерительных систем : учеб. пособие / К. А. Ожигенов, П. Г. Михайлов, М. Ж. Айтимов. – Алматы : LEM, 2016. – 162 с.
4. Ваганов, В. И. Интегральные преобразователи / В. И. Ваганов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – 10-е изд., стер. – Москва : Academia, 2005. – 576 с.
7. Cover, T. M. Elements of Information Theory / T. M. Cover. – John Wiley and Sons, 2006. – P. 254.
8. Belozubov, E. M. Problems and basic research directions in the field of thin-film nanoand microelectromechanical systems of pressure sensors / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov // Automation and Remote Control. – 2010. – Vol. 72, № 11. – P. 345–352.
9. Проспекты и каталоги фирм: НТИЦ МИЭТ, PCB Piezotronics, JNG, Sunstrand Data Control, DYTRAN, Hans List, Kistler Instrumente AG, Vibro-meter, Millard LTD, Motorola JNC, AVL, Kulite, Erich Brosa.
10. Ozhikenov, K. A. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2016. – Vol. 1. – P. 84–90.
11. Лапшин, И. О. Контроль и диагностика чувствительных элементов микроэлектронных датчиков / И. О. Лапшин, П. Г. Михайлов, Г. В. Петрунин // Университетское образование : сб. материалов XIII Междунар. науч.-метод. конф. – Пенза : ПДЗ, 2009. – С. 498–499.
12. Михайлов, П. Г. Контроль и диагностика чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков / П. Г. Михайлов, И. О. Лапшин, В. П. Михайлова // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5.
13. Михайлов, П. Г. Методы и средства функциональной диагностики сенсорных элементов и структур микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов, А. П. Михайлов // Датчики и системы. – 2005. – № 10. – С. 9–11.
14. Mikhajlov, P. G. Combined temperature and pressure sensors / P. G. Mikhajlov, Z. A. Bayasilova, M. K. Baktybayev // Materiály XIII Mezinárodní vědecko – praktická

- conference «Aktuální vymoženosti vědy – 2017», Volume 6: Technické vědy. Moderních informačních technologií. Matematika. Geografie a geologie. – Praha : Education and Science. – 2017. – S. 43–47.
15. Михайлов, П. Г. Разработка датчиков физических величин с применением унифицированных чувствительных элементов и измерительных модулей / П. Г. Михайлов, А. В. Соколов, В. П. Маланин, Д. А. Сергеев // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – С. 231–235.
 16. Соколов, А. В. Чувствительные элементы и измерительные модули датчиков давления. Вопросы стандартизации и унификации / А. В. Соколов, М. А. Чернецов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 148–154.
 17. Ожикенов, К. А. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков / К. А. Ожикенов, А. О. Касимов, А. У. Аналиева // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – № 3 (164). – С. 184–193.
 18. Mikhajlov, P. G. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information / P. G. Mikhajlov, Yu. N. Slesarev, V. A. Chulkov // Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, № 20. – P. 10332–10337.

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring systems,
Penza State University
of Architecture and Construction
(28 Germana Titova street, Penza, Russia)

Соколов Александр Владимирович

главный специалист-эксперт
инспекции Госстройнадзора
по Пензенской области
(Россия, г. Пенза, ул. Попова, 34а)
E-mail: sokoljv_av_avto@mail.ru

Sokolov Aleksandr Vladimirovich

chief specialist-inspector
of the State Construction Supervision
in the Penza region
(34a Popova street, Penza, Russia)

Аналиева Ажар Уразбаевна

преподаватель,
колледж при научно-образовательном комплексе,
Казахстанский университет
инновационных и телекоммуникационных систем
(Казахстан, г. Уральск, ул. М. Маметовой, 81)
E-mail: azhara_1980@mail.ru

Analieva Azhar Urazbaevna

teacher,
College at the scientific and educational complex,
Kazakhstan University of Innovative
and Telecommunication Systems
(81 M. Mametovoy street, Uralsk, Kazakhstan)

Михайлов Алексей Петрович

ведущий специалист,
ООО ПАК Система
(Россия, г. Москва, ул. Циолковского, 4)
E-mail: krendeleschik@gmail.com

Mikhaylov Aleksey Petrovich

leading specialist,
LLC PLC System
(4 Tsiolkovsky street, Moscow, Russia)

Фадеев Евгений Дмитриевич

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

Fadeev Evgeniy Dmitrievich

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

Образец цитирования:

Самодиагностика в интеллектуальных преобразователях физических величин / П. Г. Михайлов, А. В. Соколов, А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 33–41. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-5.

Д. А. Суровцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО ВИБРОСТЕНДА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ АМПЛИТУДОЙ ДО 100 000 м/с²

D. A. Surovtsev

STUDY THE POSSIBILITY OF CREATING A RESONANCE SHAKER TO REPRODUCE THE AMPLITUDE OF VIBRATION ACCELERATION UP TO 100 000 m/s²

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. С развитием космического двигателестроения к датчикам параметров вибрационных и ударных колебаний предъявляются все более жесткие требования. В связи с неэквивалентностью воздействия гармонической вибрации и энергетического воздействия на датчик удара представляется необходимым до начала эксплуатации проводить испытания на получение предельных диапазонов измерений и механической прочности конструкций. С целью получения достоверных результатов испытаний актуальной задачей является разработка соответствующего испытательного оборудования, в частности стержневых резонансных вибростендов с пьезоэлектрическим возбуждением. **Материалы и методы.** Проведен сравнительный анализ предельных возможностей серийных вибростендов известных зарубежных фирм. Определена возможность создания вибростендов на основе пакета пьезоэлектрических актюаторов. Методика основана на исследовании возможностей использования обратного пьезоэлектрического эффекта для воспроизведения динамических виброускорений. **Результаты.** В результате проведенных исследований определено, что максимальная амплитуда виброускорений, воспроизводимых серийно выпускаемыми вибростендами с прорезными резонансными балками и другими резонансными конструкциями, может в 10–20 раз увеличивать максимальное значение амплитуды виброускорения вибростенда, достигая 500–1400 g. Проведен выбор пьезоактюатора, обеспечивающего воспроизведение ускорений до 100 000 м/с² и крепление к его подвижной части акселерометра без переходных конструкций. Обоснован выбор аналогового усилителя для управления режимами работы пьезостека.

A b s t r a c t. Background. With the development of space engine building, more stringent requirements are imposed on the sensors of vibration and shock parameters. In connection with the nonequivalence of the effect of harmonic vibration and the energy impact on the shock sensor, it is necessary to perform tests to determine the ultimate measurement ranges and mechanical strength of structures before operating. In order to obtain reliable test results, the actual task is the development of appropriate test equipment, and in particular, rod resonance shakes with piezoelectric excitation. **Materials and methods.** A comparative analysis of the limiting capabilities of the standard vibration shakers of well-known foreign firms is carried out. The possibility of creating shaker stands based on a package of piezoelectric actuators is determined. The technique is based on a study of the possibilities of using the inverse piezoelectric effect to reproduce dynamic vibration acceleration. **Results.** As a result of the conducted studies it is determined that the maximum amplitude of vibration acceleration reproduced by serially

produced shaker stands with slotted resonance beams and other resonant structures can increase 10–20 times the maximum amplitude of vibration acceleration of the shaker, reaching 500–1400 g. A piezoactuator has been selected that ensures the reproduction of accelerations up to 100,000 m/s² and attachment to its moving part of the accelerometer without transient designs. The selection of an analog amplifier for controlling the operating modes of the piezo-cast is substantiated.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вибростенд, пьезоактюатор, пьезостек, собственная частота виброусилителя, виброперемещение, виброускорение.

Key words: shaker, piezoactuator, piezoelectric glass, natural frequency of the vibration amplifier, vibration displacement, vibration acceleration.

Введение

Пьезоэлектрические акселерометры относятся к уникальному классу средств измерений, в которых по сравнению с другими известными типами могут быть реализованы миниатюрные габариты, широкие частотные и амплитудные диапазоны измерений. Для обеспечения достоверности результатов испытаний пьезоакселерометров их уникальные свойства должны экспериментально подтверждаться при выпуске из производства, а само производство должно быть метрологически обеспечено в соответствии с государственными стандартами. В связи с вышеперечисленным актуальной задачей является исследование возможности создания вибростенда для воспроизведения ускорений до $(5-10) \cdot 10^3$ g на фиксированной частоте внутри интервала от 1 до 20 кГц.

Типы вибростендов для воспроизведения гармонических ускорений

Для воспроизведения гармонических ускорений в интервалах частот от единиц десятков герц до десятков килогерц наиболее распространено использование электродинамических вибростендов, среди которых первые места по точности, простоте обслуживания, эксплуатационным характеристикам и сферам применения занимают вибростенды фирм Bruel&Kjaer (Дания) и Tira (Германия).

Предельные возможности электродинамических вибростендов по амплитуде воспроизводимого ускорения определяются отношением плотности материала провода к индукции в зазоре магнитной системы [1]. Как правило, предельная амплитуда ускорения, воспроизводимого калибровочными вибростендами, не превышает 50–70 g. Для увеличения указанного ускорения на одной из частот широко используются различные конструкции так называемых виброусилителей или концентраторов в виде прорезных балок или «колоколов» специальной формы. Согласно данным, полученным по результатам анализа патентной и технической информации, коэффициент усиления амплитуды колебаний на собственной частоте виброусилителя не превышает 10–20, что позволяет воспроизвести виброускорение амплитудой 500–1400 g и не решает поставленной цели [2, 3].

Принцип действия пьезоэлектрического вибростенда основан на использовании вместо магнитоэлектрического преобразователя силы пьезоэлектрических актюаторов или пьезоэлектрических обратных преобразователей электрической величины в механическую. Потенциально для множества частных применений пьезоэлектрические вибростенды способны воспроизводить ускорения на два порядка выше, чем вибростенды других типов. Серийные образцы пьезоэлектрических вибростендов в настоящее время не выявлены. В связи с этим исследованы возможности создания пьезоэлектрического вибростенда для оценки механической прочности вибродатчиков, метрологические характеристики которых заранее известны и определены в полном соответствии с нормативной и конструкторской документацией.

Исследование современного состояния технологий создания пьезоактюаторов для построения высокочастотных пьезоэлектрических вибростендов

Безусловными лидерами по исследованию и производству пьезоэлементов и пьезоактюаторов в РФ являются НКТБ «Пьезоприбор», ОАО «Элпа», ООО «Глобал-Тест». Этими предприятиями создана широкая номенклатура вибродатчиков различного назначения, в том числе

и статические пьезоактюаторы для позиционирования телескопов и атомных силовых микроскопов. В монографии [4], выпущенной сотрудником НКТБ «Пьезоприбор» В. В. Янчиным, представлены конструкции пьезоэлектрических вибростендов для воспроизведения ускорения $A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ на частоте $f = 3800 \text{ Гц}$. Представленные автором характеристики вибростенда можно расценивать только как принципиальную возможность создания подобных устройств из-за противоречия между деформацией пьезопакета и названной автором амплитудой управляющего напряжения 60 В.

Обратным пересчетом из заданного ускорения и значения частоты получаем, что перемещение X стола вибростенда составляет 263 мкм. При этом удлинение пьезопакета высотой 15 мм с учетом коэффициента виброусиления стержневого резонатора, равного 20, будет составлять 13,2 мкм.

Учитывая то, что значение пьезомодуля d_{11} для пьезокерамики типа ЦТС составляет $\approx 100 \text{ В/мкм}$, подключение к пьезопакету напряжения амплитудой 60 В может вызвать изменение хода пьезопакета не более, чем на 0,6 мкм вместо ожидаемых 13 мкм.

Для обеспечения перемещения пьезопакета на 13 мкм к нему необходимо подключение управляющего напряжения амплитудой 1300 В, что требует использования специализированного источника напряжения. Приведенный пример является дополнительным основанием для исследования возможностей современных технологий создания пьезоактюаторов для воспроизведения знакопеременных виброперемещений и виброускорений с целью создания испытательной установки для миниатюрных широкополосных ИСР-акселерометров.

В зависимости от назначения и конструктивного исполнения пьезоактюаторы подразделяются на пакетные, трубчатые, изгибные, сдвиговые, ламинарные и управляемые пьезофлексерные [5].

Пакетные актюаторы конструируются с использованием принципов дискретного пакетирования и совместного спекания. Пакетные актюаторы, изготовленные дискретным способом, позволяют использовать при изготовлении различную форму пьезокерамических элементов, а также обеспечивают более широкий выбор пьезокерамических материалов. Кроме этого, такие актюаторы имеют меньшее тепловыделение при работе на высоких частотах. Толщина отдельных пьезокерамических слоев, которые могут быть изготовлены и собраны в пакет, должна быть не менее 1 мм, поэтому для управления пакетными актюаторами, собранными по дискретной технологии, требуется высокое напряжение в пределах 500–1000 В. Для выполнения указанных требований вся керамико-электродная структура должна конструироваться и обжигаться целиком (технология совместного спекания). Теоретически любая пьезоэлектрическая керамика может использоваться для изготовления актюаторов по технологии совместного спекания, но в настоящее время керамика с высокой точкой Кюри редко используется для этих целей. Как следствие, большинство пакетных актюаторов, изготовленных по технологии совместного спекания, не могут работать при температурах выше 220 °С. В настоящее время предлагаются наборы пакетных актюаторов для решения различных задач, подразделяемые в зависимости от свойств пьезокерамики и технологии производства на высоковольтные (дискретные) и низковольтные многослойные (монокристаллы).

Высоковольтные пакетные актюаторы изготавливаются из разных типов пьезокерамических материалов: стандартных, высокоомощных, высокостабильных и высокотемпературных. В рамках решаемой задачи интерес представляют высокостабильные пакетные актюаторы, отличающиеся стабильными характеристиками деформации и силы во всем диапазоне рабочих температур благодаря свойствам пьезокерамики.

Электрическая емкость таких актюаторов приблизительно равна емкости актюаторов, изготовленных из стандартных пьезоматериалов. Рабочее напряжение лежит в пределах от –100 В до +500 В и от –200 В до +1000 В (управление актюаторами может осуществляться в биполярном режиме или однополярном). Главным достоинством высокостабильных актюаторов является их способность к эксплуатации в динамическом режиме [6] на достаточно высоких частотах.

Одной из важнейших особенностей эксплуатации высокостабильных актюаторов является решение проблем их монтажа и передача перемещения образцу через торцевые поверхности пакета. Для бескорпусных пьезоактюаторов недопустимо боковое крепление, в связи с чем они выполняются из кольцевых пьезоэлементов. Основным достоинством бескорпусных актюаторов является простота охлаждения за счет поступления охлаждающей среды на внеш-

ную и внутреннюю поверхности пьезоэлемента, а недостатком – сложность обеспечения механической прочности. Корпусные пакетные актюаторы с предварительным механическим напряжением имеют металлический корпус, за счет которого обеспечиваются их механическая прочность и стабильность работы в условиях механических ударов. Встроенный в корпус механизм предварительного механического напряжения компенсирует растягивающие напряжения, которые исключительно вредны для пьезокерамики (рис. 1) [7].

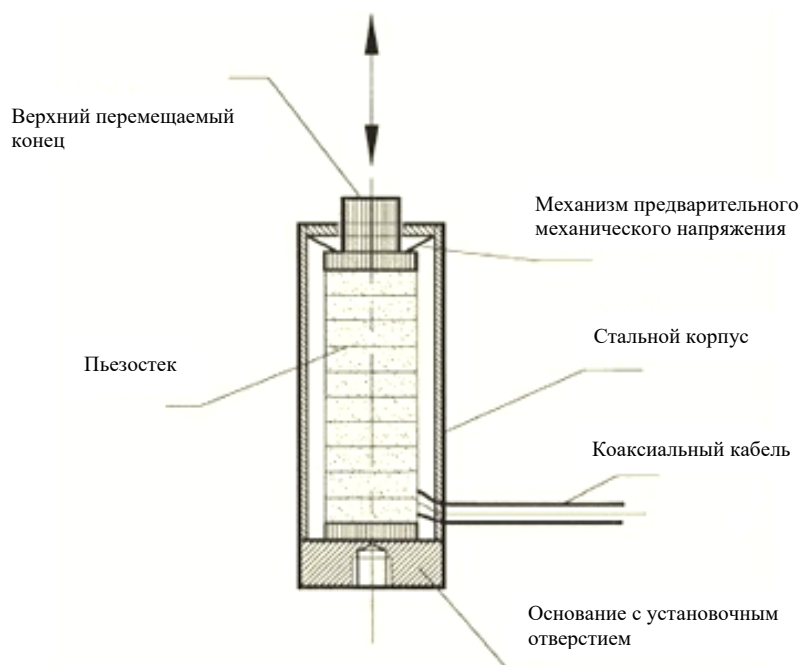


Рис. 1. Корпусной актюатор с предварительным механическим напряжением

Полярность управляющего напряжения в статическом режиме

Пьезопакеты в статическом режиме могут управляться однополярным или неполным двухполярным напряжением. Возможно также управление режима симметричным двухполярным напряжением. В случае управления пьезоактюатора с помощью однополярного или неполного двухполярного сигнала при его подключении к источнику питания важно соблюдать правильную полярность. В противном случае он может быть поврежден за счет деполяризации, которая наступит при достижении максимального значения управляющего напряжения. Для бескорпусных актюаторов соблюдение полярности не имеет значения.

Любая пьезокерамика может работать в определенных пределах с напряжением, полярность которого противоположна направлению поляризации керамики. Поэтому на практике пьезоактюаторы управляются неполным двухполярным напряжением, что по сравнению с однополярным управлением увеличивает максимальный ход актюатора, его блокирующую силу и удельную энергию. Пьезоактюатор из любого пьезоматериала может управляться противодействующим напряжением величиной 20 % от максимального управляющего напряжения, указанного в спецификации. Увеличение максимального хода и блокирующей силы может в этом случае достигать 30 % по сравнению с однополярным управлением. Удельная энергия может быть выше на 50 % и более. Сегнетожесткие высокостабильные высокотемпературные ЦТС пьезокерамические материалы могут выдерживать без частичной деполяризации электрические поля, имеющие направленность противоположной поляризации, величиной даже более 20 % от напряженности поля, при которой проводилась поляризация.

Динамический режим работы пьезоактюатора

Пьезоактюаторы способны обеспечивать ускорения до нескольких тысяч g и поэтому идеальны для использования в динамических режимах. На динамический режим работы пьезоактюатора

зоактюатора значительное влияние оказывают скорость нарастания управляющего напряжения (В/с) и максимальный ток усилителя, рабочая и собственная частоты пьезоактюаторной системы.

Для динамического режима работы пьезоактюатора одним из важных условий, обеспечивающих его правильную эксплуатацию, является уменьшение собственного тепловыделения. Мощность пьезоактюатора, затрачиваемая на выделение тепла при его гармоническом возбуждении, рассчитывается по формуле

$$P \approx \pi/4 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot C \cdot U_{p-p}^2,$$

где P – мощность, затрачиваемая на нагрев пьезоактюатора, Вт; $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрический фактор (приблизительно равен коэффициенту мощности, $\cos \varphi$ при малых углах δ и φ).

Для стандартных пьезокерамических актюаторов тангенс диэлектрических потерь в условиях слабых сигналов обычно составляет величину 0,01–0,02. Это означает, что до 2 % электрической мощности, потребляемой актюатором, преобразуется в тепловую энергию. Для сильных сигналов эта доля составляет около 8–12 % в зависимости от частоты, амплитуды, температуры окружающей среды и т.п. В этой связи при больших амплитудах и высоких частотах необходимо применять принудительное охлаждение пьезоактюаторной системы.

Выбор пьезоактюатора для построения вибростенда

Исходные данные:

- амплитуда воспроизводимого ускорения – 100 000 м/с²;
- частота воспроизведения 10–15 кГц.

При этом ориентировочное значение максимального хода актюатора должно составлять $f = 10$ кГц; $\omega_0 = 6,28 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_0^2 = 39,44 \cdot 10^8$ рад/с²:

$$x = \frac{A}{\omega_0^2} = \frac{10^5}{39,44 \cdot 10^8} = 0,025 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ мкм};$$

$f = 15$ кГц; $\omega_0 = 6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_0^2 = 88,74 \cdot 10^8$ рад/с²;

$$x = \frac{10^5}{88,74 \cdot 10^8} = 11,2 \text{ мкм}.$$

Кроме этого, пьезоактюатор как преобразователь динамической силы должен отвечать следующим дополнительным условиям:

- 1) обеспечение возможности крепления акселерометра на верхнюю торцевую поверхность пьезоактюатора без дополнительных конструктивных элементов. Так, при диаметре хвостовика акселерометра, равном М5, на торце пьезоактюатора должна быть выполнена внутренняя резьба такого же диаметра;
- 2) обеспечение заданной прочности крепления пьезоактюатора к опоре;
- 3) обеспечение заданной амплитуды воспроизводимого ускорения за счет соответствующего выбора сочетания значения перемещения x и рабочей частоты f .

Указанным выше условиям и возможности воспроизведения ускорения амплитудой 10^5 м/с² или 10 000 g отвечает пьезоактюатор типа PST 500/10/25 VS18 на частоте 10 кГц.

Для обеспечения управления режимами работы указанного пьезоактюатора необходимо использование генератора гармонических колебаний с амплитудой 500 В, частотным диапазоном от 1 до 10 кГц, номинальным напряжением до 1000 В, средним значением тока не менее 10 мА.

Заключение

По результатам проведенных исследований определена возможность создания резонансного вибростенда для воспроизведения виброускорений амплитудой до 100 000 м/с². Выбран тип пьезостека и специального генератора для управления режимами его работы. Выявлена необходимость реализации охлаждения пьезопреобразователя в процессе эксплуатации. Отличительной особенностью является отсутствие калибровки предлагаемого испытательного

вибростенда на основе пьезостека в связи с тем, что он предназначен для определения прочности акселерометра как средства измерений, метрологические характеристики которого определяются в соответствии с Государственной поверочной схемой МИ 2070-90 методом прямых измерений в интервале до 1000 м/с^2 и в соответствии с ГОСТ ИСО 5347-2-97 воздействием удара амплитудой до $100\,000 \text{ м/с}^2$ с использованием баллистического метода измерений.

Библиографический список

1. Мокров, Е. А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров, А. А. Папко. – Пенза : ПАИИ, 2004. – 164 с.
2. А. с. 773966 СССР, G 01 P 21/00. Пьезоэлектрический вибростенд / Дунаевский В. П., Вуколов А. Н., Донсков В. И., Крайненко В. И., Янчик В. В. – № 2724233/18-10 ; заявл. 13.02.79 ; опубл. 23.10.80, Бюл. № 39.
3. А. с. 497057 СССР, B 06b 1/06. Пьезоэлектрический вибростенд для калибровки вибропреобразователей / Абыкин К. П., Шумский П. М., Пашков Г. В. – № 1984266/18-10 ; заявл. 21.12.73 ; опубл. 30.12.75, Бюл. № 48.
4. Янчик, В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) : монография / В. В. Янчик. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение).
5. Баринев, И. Н. Проблемы создания адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта / И. Н. Баринев, Е. В. Кучумов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 3 (13). – С. 20–29.
6. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М., 2013.
7. Панич, А. Е. Пьезокерамические актюаторы / А. Е. Панич. – Ростов н/Д : РГУ, 2008. – 12 с.

Суровцев Денис Александрович

инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: surovcev-65@mail.ru

Surovtsev Denis Aleksandrovich

engineer,
Scientific-research Institute of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Суровцев, Д. А. Исследование возможности создания резонансного вибростенда для воспроизведения виброускорений амплитудой до $100\,000 \text{ м/с}^2$ / Д. А. Суровцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 42–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-6.

И. А. Кострикина, Л. А. Макаркин

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБЪЕКТОВ
ВЫСОКОГО КЛАССА ЧИСТОТЫ

I. A. Kostrikina, L. A. Makarkin

METHOD OF MEASURING ROUGHNESS OBJECTS
OF HIGH CLASS OF PURITY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются ситалловые подложки высокого класса чистоты. Предметом исследования являются способы измерения параметров шероховатости с малыми значениями R_z . Целью работы является разработка способа измерения шероховатости поверхности высокого класса чистоты путем применения профильной меры. **Материалы и методы.** Для описания процесса измерения шероховатости использована Гауссова модель. Рассмотрен контактный метод измерения шероховатости. **Результаты.** Предложен подход к реализации измерений шероховатости поверхностей высокой чистоты, основанный на применении эталонной меры шероховатости, позволяющий повысить чувствительность контактного метода измерения шероховатости профилометром. **Выводы.** Метод измерений шероховатости поверхностей высокой чистоты позволяет повысить чувствительность стандартных профилометров. Предложенный метод измерения шероховатости за счет использования эталонной профильной меры шероховатости обеспечивает возможность измерения на поверхностях высокого класса чистоты применением стандартных профилометров среднего класса точности.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is high-purity sieveall substrates. The subject of the research is the methods of measuring roughness parameters with small R_z values. The aim of the work is to develop a method for measuring the surface roughness of high grade purity by applying a profile measure. **Materials and methods.** To describe the process of measuring the roughness used a Gaussian model. The contact method of roughness measurement is considered. **Results.** An approach to the implementation of measuring the roughness of surfaces of high purity, based on the use of a reference roughness measure, allows to increase the sensitivity of the contact roughness measurement method with a profilometer. **Conclusions.** The method of measuring the surface roughness of high purity, allows to increase the sensitivity of standard profilometers. The proposed method for measuring roughness through the use of a standard profile measure of roughness makes it possible to measure on surfaces of high grade purity using standard profilometers of the middle class of accuracy.

К л ю ч е в ы е с л о в а: объект исследования, ситалловые подложки, измерение шероховатости поверхности.

K e y w o r d s: object of research, sital substrates, surface roughness measurement.

Детали могут иметь различную шероховатость поверхностей, зависящую от способов их изготовления.

Характеристики и параметры шероховатости поверхностей устанавливает ГОСТ 2789–73, требования которого распространяются на поверхности изделий независимо от их материала и

способа изготовления (исключение составляют ворсистые, пористые и аналогичные поверхности).

Согласно стандарту ГОСТ 2789–73 под шероховатостью поверхности понимают совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины (рис. 1).

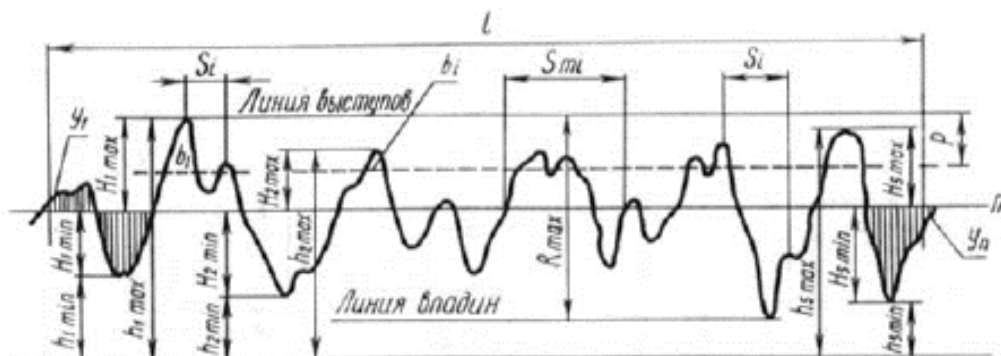


Рис. 1. Параметры шероховатости

Базовую длину стандарт определяет как длину базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Базовая линия имеет идеальную геометрическую форму, соответствующую номинальному профилю рассматриваемой поверхности. Она может быть прямой, дугой окружности или иметь иную форму, которая определяется нормальным сечением номинальной поверхности плоскостью. Шероховатость поверхности описывают характеристиками и параметрами микронеровностей профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью, направленной по нормали к ней. В случае, когда к реальной поверхности может быть проведено множество нормальных секущих плоскостей, выбирают сечение, имеющее максимальные параметры шероховатости, если направление измерения шероховатости не оговорено специально.

В работе [1] приведены 23 параметра шероховатости, однако на практике применяются R_z , R_a и R_{max} (табл. 1).

Таблица 1

Термин	Обозначение	Определение
1	2	3
1. Базовая длина	l	Длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности
2. Средняя линия профиля	m	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, чтоб в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально
3. Средний шаг неровностей профиля	S_m	Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
4. Средний шаг местных выступов профиля	S	Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины
5. Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_z	Сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины $R_z = \frac{\sum_{i=1}^S y_{pmi} + \sum_{i=1}^S y_{umi} }{S},$ где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{umi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля

Окончание табл. 1

1	2	3
6. Наибольшая высота профиля	$R_{\max}$	Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины
7. Отклонение профиля	y	Расстояние между любой точкой профиля и средней линией
8. Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	Среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y dx,$ $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y ,$ где l – базовая длина; n – число выбранных точек профиля на базовой длине

R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины; R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины; $R_{\max}$ – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Существует большое количество методов измерения параметров шероховатости [2–10].

В основном все они делятся на две группы:

1) методы, основанные на дифракции электромагнитного излучения на неоднородной границе раздела сред (оптические и рентгеновские):

- метод светового сечения;
- растровый метод;
- рефлектометрический метод;
- метод слепков;
- метод сравнения с образцовой деталью;
- интерференционный метод;
- 2) прямые методы контроля микрорельефа:
 - механическая профилометрия;
 - атомно-силовая и туннельная микроскопия.

Каждому из методов измерения шероховатости поверхности присущи свои особенности, и выбор того или иного метода должен определяться конкретными задачами. Но наиболее точными являются прямые методы – профилометрические.

Суть профилометрического метода заключается в следующем [4, 7, 10]

По исследуемой поверхности перемещается специальная алмазная игла, колеблющаяся от неровностей поверхности. Такие колебания иглы передаются на датчик, где преобразуются в малые электрические токи, которые в свою очередь усиливаются и регистрируются. Показания выводятся на дисплей прибора и дают представление о характере неровностей исследуемой поверхности – их высоте и глубине.

Однако данный метод имеет один большой недостаток, он является разрушающим и оставляет царапины.

В настоящее время при изготовлении многих изделий электронной техники при тонкопленочной технологии применяют ситалловые подложки, в частности СТ-50-1, разных классов [3].

Ситалловые подложки СТ-50-1 представляют собой пластины из стеклокерамического материала на основе стекла и предназначены для изготовления пленочных микросхем (рис. 2).

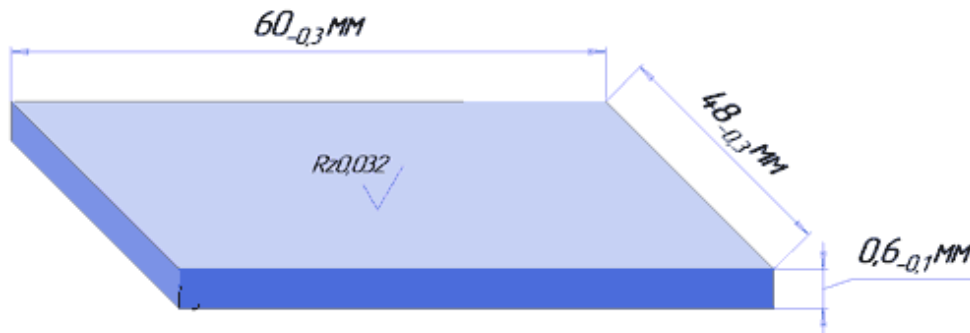


Рис. 2. Ситалловая подложка

Технические характеристики СТ-50-1

Шероховатость рабочей поверхности R_z – не более 0,032 мкм.

Шероховатость нерабочей поверхности R_z – не более 4 мкм.

Плотность СТ-50-1 ситалловой подложки – от 2,6 до 2,7 г/см³.

Микротвердость – 705 кгс/мм².

Термостойкость – + 210° С.

Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц – от 8 до 9.

Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц – не более 15.

Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре + 100° С – 10^{14} Ом·см.

Температурный коэффициент линейного расширения Альфа·10⁷ К⁻¹ в интервале температур от + 20° С до + 300° С – от 50 до 54.

Габаритные размеры – 60×48×0,6 мм.

Одним из главных параметров подложек является шероховатость поверхности R_z , которая согласно техническим условиям должна быть не менее 0,032 мкм – для 1-го класса и 0,1 – для 3-го класса.

Если с подложками 3-го класса проблем не возникает, то при применении подложек 1-го класса возникают проблемы с измерением малых значений R_z , так как не все профилометры позволяют обеспечить данный диапазон измерения.

Такая проблема возникла в АО «НИИЭМП» при смене поставщика подложек 1-го класса.

На предприятии для контроля шероховатости применяется японский профилометр Surftest SJ-210 (рис. 3) со следующими характеристиками:

- минимальный диапазон/дискретность (25 мкм / 0,002 мкм);
- параметры R_a , R_q , R_z , R_y , R_v , R_t , R_{3z} , R_{sk} , R_{ku} , R_c , R_{Pc} , R_{Sm} , R_{max}^*1 , R_{z1max} , S , HSC , R_{zJIS}^*2 , R_{ppi} , $R_{\Delta a}$, $R_{\Delta q}$, R_{lr} , R_{mr} , $R_{mr}(c)$, R_c , R_k , R_{pk} , R_{vk} , $Mr1$, $Mr2$, $A1$, $A2$, Vo , R_{pm} , tp , Htp , R , R_x , AR ;
- длина трассы 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм;
- число измерений $x1$, $x2$, $x3$, $x4$, $x5$, $x6$, $x7$, $x8$, $x9$, $x10$;
- автовыключение 10-600 с при работе от аккумуляторной батареи;
- разъемы USB, SPC, RS-232C, для удаленного управления, MicroSD;
- стандарты JIS'82, JIS'94, JIS'01, ISO, ANSI, VDA;
- результаты измерения: цифровые значения, кривая, график;
- питание: (Ni-MH) аккумуляторная батарея, до 4 ч;
- диапазон измерения профилометра Surftest SJ-210 Mitutoyo: X-ось (17,5 мм), Z-ось 360 мкм (–200 мкм~ + 160 мкм);
- скорость трассировки: при измерении 0,25; 0,5; 0,75 мм/с; при возврате 1 мм/с;
- зонд: стилус радиусом наконечника 5 мкм.

Но при измерении шероховатости подложек оказалось, что R_z составляет от 0,050 до 0,055 мм вместо 0,032, причем на всех партиях.

Авторами были рассмотрены возможности других профилометров. Так, на приборе для измерений текстуры поверхности FORM TALYSURF 50 (рис. 4) были получены результаты, представленные на рис. 5.



Рис. 3. Профилометр Surftest SJ-210

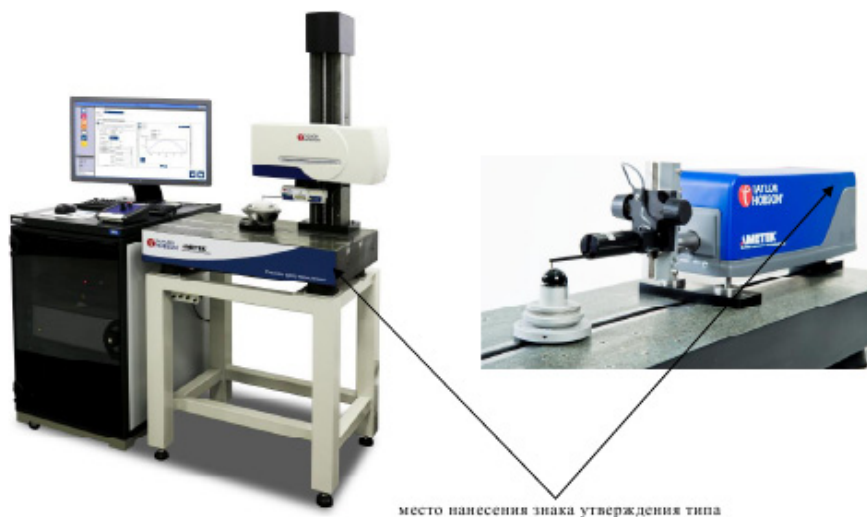


Рис. 4. Прибор FORM TALYSURF 50

Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Пензенской области» (ФБУ «Пензенский ЦСМ») 440039, г. Пенза, ул. Комсомольская, 20		РЕГИСТР РСД 9908	
СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ № Гк-17 579153			
Наименование, тип средства измерений	Подложка ситаловая		
СТ-50-1-1-06			
заводской номер	13		
принадлежащее	ОАО «НИИЭМП», г. Пенза, ул. Каракозова, д. 44 наименование юридического лица, адрес		
Место проведения калибровки	ФБУ «Пензенский ЦСМ»		
Методика калибровки	Типовая методика калибровки средств измерений длины № МК-01; утвержденная зам. директора ФБУ «Пензенский ЦСМ» 01.04.2015 г.		
Условия калибровки	Температура 20,6 °С, Относительная влажность 57 %		
Применимые эталоны	3.1.ZBM.0190.2012 ГЭЕ длины в области измерений параметров шероховатости поверхности 2 порядка в диапазоне значений от 0,1 до 50 мкм (Прибор Форм Талисурф № 449)		
Рекомендуемый интервал между калибровками: 12 месяцев Дата проведения калибровки: « 07 » сентября 20 17 г. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ: 1. Внешний осмотр: дефекты отсутствуют 2. Определение значений:			
№ п/п	Наименование характеристики	Нормированное значение	Измеренное значение
1	Шероховатость поверхности, мкм		Ra 0,0050 Rz 0,0318 Rz (стандарт JIS) 0,0234
Главный метролог		Ю.Г. Тюрина инициалы, фамилия	
Начальник лаборатории		Н.И. Леонова инициалы, фамилия	
(подпись) (подпись)		(подпись) (подпись)	
Для документов №5 (Печать ФБУ «Пензенский ЦСМ»)			
Факс 49-42-63, 49-42-48; Емкостные 49-51-76; Сектор приема СЗ 49-42-48; Отделы поверки СИ: Метрологический 49-47-53; Технический 49-79-65; Радиотехнический 49-91-33; Электронный 49-51-85; Прием в эксплуатацию приборов			

Рис. 5. Результаты калибровки

Из сертификата видно, что измеренное значение R_z составляет 0,0318 мкм.

На основании результатов, полученных на приборе FORM TALYSURF 50, авторами была разработана методика калибровки профилометра Surftest SJ-210 с целью обеспечения бесперебойного входного контроля ситалловых подложек.

Для этого была приобретена мера шероховатости ПРО-10 (рис. 6), характеристики которой представлены в табл. 2.



Рис. 6. Мера шероховатости ПРО-10

Таблица 2

Наименование характеристики	Значение
Диапазон номинальных значений параметра R_a , мкм	от 0,001 до 400
Диапазон номинальных значений параметра R_z , мкм	от 0,002 до 1000
Диапазон номинальных значений параметра R_{Sm} , мкм	от 1,0 до 8000
Предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения параметра R_a (Δ_0), %	от 12 до 0,1
Предел допускаемого относительного среднеквадратического отклонения параметра R_{Sm} (СКО), %	5
Габаритные размеры меры, мм, не более	
– длина	10
– ширина	10
– толщина	2
Размеры рабочей области меры, мм, не более	
– длина	5
– ширина	5
Масса меры, г, не более	120
Нормальная область значений температур, °C	от + 15 до + 25
Относительная влажность воздуха, %, не более	80

Суть методики заключается в следующем. Проводится измерение значения меры шероховатости ПРО-10 (R_{zm}) на профилометре Surftest SJ-210 и определяется отклонение ΔR_{zm} значения меры от номинального значения R_{zn} по формуле

$$\Delta R_{zm} = R_{zn} - R_{zm}.$$

Затем на том же приборе измеряется шероховатость ситалловой подложки (R_{zp}). За действительное значение шероховатости ситалловой подложки (R_{zd}) принимается значение, вычисленное по формуле

$$R_{zd} = R_{zp} - \Delta R_{zm}.$$

Данная методика позволяет проводить измерения шероховатости объектов 13-го и 14-го классов чистоты с высокой достоверностью.

Библиографический список

1. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
2. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 472 с.
3. Невлюдов, И. Ш. Анализ методов контроля шероховатости подложек для изделий электронной техники / И. Ш. Невлюдов, И. В. Жарикова, И. Д. Перепелица, А. Г. Резниченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/5 (68). – С. 25–29.
4. Егоров, В. А. Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности / В. А. Егоров. – Москва : Машиностроение, 1965. – 224 с.
5. Взаимозаменяемость, стандартизация и технологические измерения / под ред. А. Д. Никифорова. – Москва : Высш. шк., 2000. – 510 с.
6. Клепиков, В. В. Качество изделий / В. В. Клепиков, В. В. Порошин, В. А. Голов. – Москва : МГИУ, 2005.
7. Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – Москва : Машиностроение, 1978.
8. Чекмарев, А. А. Справочник по машиностроительному черчению / А. А. Чекмарев, В. К. Осипов. – Москва : Высш. шк., 2005.
9. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова ; под ред. В. С. Корсакова. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1977. – 416 с.
10. Технология машиностроения : в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов. – 2-е изд., стереотип. / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 564 с.

Кострикина Инна Анатольевна

кандидат технических наук, главный метролог,
АО «НИИЭМП»
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: gmetr@niiemp.ru

Kostrikina Inna Anatol'evna

candidate of technical sciences, chief metrologist,
Research Institute of Electron-Mechanical Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Макаркин Леонид Алексеевич

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

Makarkin Leonid Alekseevich

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

Образец цитирования:

Кострикина, И. А. Методика измерения шероховатости объектов высокого класса чистоты / И. А. Кострикина, Л. А. Макаркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 48–54. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-7.

А. В. Шулепов, Пьей Сони Вин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦВЕТА ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ЛАЗЕРНЫХ СКЕНИРУЮЩИХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

A. V. Shulepov, Pyae Sone Win

INVESTIGATION OF MEASUREMENT ERROR OF GEOMETRIC PARAMETERS OF PARTS DEPENDING ON THE COLOR OF THE SURFACE COATING IN LASER SCANNING OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Бесконтактные оптоэлектронные сканирующие измерительные системы находят все большее применение при измерении различных объектов, в том числе и деталей сложной формы и конструкции в машиностроении. Важнейшим этапом подготовки применения таких систем является исследование погрешности измерения, возникающей под действием различных факторов. Представлены результаты исследования влияния цвета поверхности на погрешность измерения координат точек поверхности. Определена гамма цветов поверхности детали, при которых значение погрешности измерения является минимальным. **Материалы и методы.** Разработаны методики исследования влияния цвета поверхности объекта на погрешность измерения. Предложены параметры для количественного оценивания погрешности измерения координат. **Результаты.** Установлено значительное влияние цвета поверхности на погрешность измерения координат точек. При этом наибольшие погрешности возникают при сканировании поверхностей, имеющих черную, зеленую, синюю, оранжевую и красную окраску. Значение погрешности для самых неблагоприятных вариантов окраски достигает до 3 мм по размаху и 0,7 мм по среднеквадратичному отклонению. Исследуемая погрешность при окрашивании поверхности в цвета светлых тонов уменьшается в несколько раз, в частности, для светло-серого цвета среднеквадратичное значение составило 0,035 мм. **Выводы.** Разработанная методика и полученные результаты могут быть использованы для оценки влияния цвета поверхности на погрешность измерения координат точек сканирующих измерительных систем других типов, построенных на принципах триангуляции, фототриграмметрии.

A b s t r a c t. Background. Non-contact optoelectronic scanning measuring systems are increasingly used in measurement of various objects, including parts of complex shapes and structures in mechanical engineering. The most important step in the preparation of the application of such systems is to study the measurement error that occurs under the influence of various factors. Presents results of a study of the influence of the surface color of the measurement error of the coordinates of the points of the surface. The gamut of colors of the part surface at which the measurement error is minimal is determined. **Materials and methods.** Methods of research of influence of color of a object's surface on the measurement error are developed. Pa-

rameters for the quantitative estimation of the error of measurement of coordinates are proposed. **Results.** A significant influence of the surface color on the measurement error of the coordinates of the points is established. In this case, the greatest errors occur when scanning surfaces with black, green, blue, orange, red color. The error value for the most unfavorable color options reaches up to 3 mm in scope and 0,7 mm in standard deviation. The investigated error when painting the surface in the colors of light tones is reduced several times, in particular, its root mean square value was 0,035 mm. **Conclusions.** The developed technique and the results can be used to assess the effect of surface color on the measurement error of the coordinates of the points of scanning measuring systems of other types, built on the principles of triangulation, photogrammetry.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цвет, погрешность, оптоэлектронные сканирующие системы.

Key words: color, error, optoelectronic scanning systems.

Введение

Измерения геометрических параметров деталей сложной формы часто выполняются с применением координатных методов. Такие методы позволяют получить трехмерную геометрическую модель объекта и реализуются с помощью координатно-измерительных машин (КИМ) и оптоэлектронных бесконтактных сканирующих систем. Преимущества оптоэлектронных бесконтактных систем перед КИМ заключаются в высоком быстродействии и в возможности получения значительных массивов координат измеренных точек поверхностей деталей, расположенных с высокой плотностью [1].

Типовая схема трехкоординатной лазерной сканирующей оптоэлектронной измерительной системы (ЛСОИС) представлена на рис. 1.

Сканируемая деталь 1 установлена на поворотном столе 2. Сканирующая оптоэлектронная система включает излучатель – лазер 3, цифровую видеокамеру 4 на основе ПЗС-матрицы, которая установлена на подвижной каретке 5, может перемещаться в вертикальном направлении Z и совершать угловые перемещения φ_2 . Координата сканируемой точки $\alpha \{X, Y, Z\}$ определяется по результатам обработки перемещений поворотного стола φ_1 и сканирующей системы φ_2 и Z :

$$\alpha \{X, Y, Z\} = f((\varphi_1, \varphi_2, Z), Y_M, Z_M), \quad (1)$$

где Y_M и Z_M – координаты изображения точки α на ПЗС-матрице.

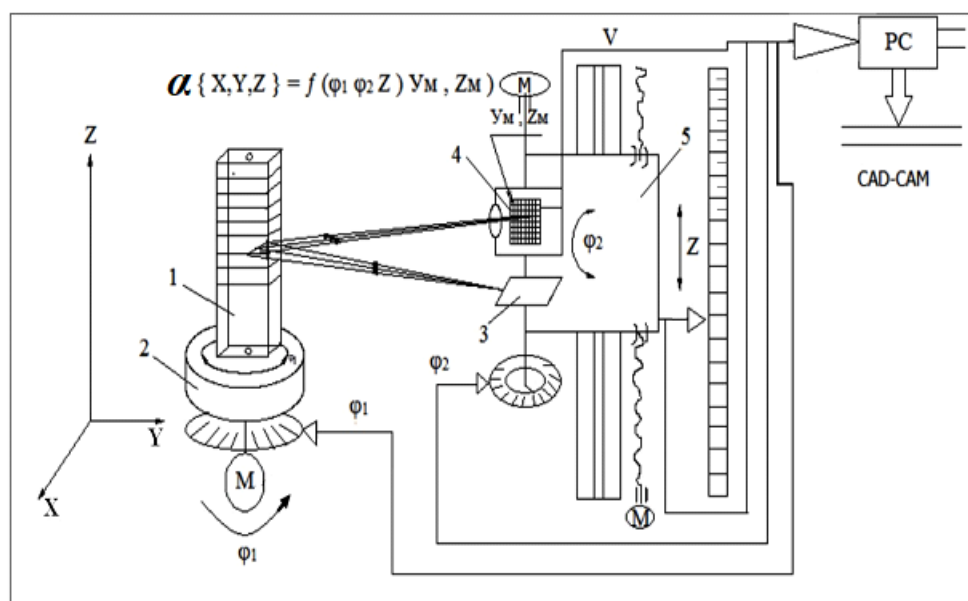


Рис. 1. Схема трехкоординатной сканирующей оптоэлектронной измерительной системы

Полученная измерительная информация о координатах измеренных точек используется для построения моделей объекта в различных форматах при контроле геометрической точности для задач обратного инжиниринга (CAD-CAM) и т.п. [1, 2].

Погрешность измерения в бесконтактных оптоэлектронных сканирующих системах

Погрешность измерения в лазерных сканирующих системах – это погрешность измерения координат точек поверхностей, по которым определяют параметры геометрической точности объектов. Измерения выполняются бесконтактным методом на основе применения оптоэлектронных систем, при которых проявляются особенности взаимодействия сенсора и измеряемой поверхности [8, 11].

Важнейшими задачами исследований погрешности являются выявление факторов процесса измерения при сканировании и установление степени их влияния на погрешность измерения, а также нахождение способов управления этими факторами для уменьшения погрешности измерения в бесконтактных оптоэлектронных системах.

По причинам возникновения составляющие погрешности измерения могут быть разделены на три группы:

- 1) инструментальные, вызываемые погрешностями функционирования элементов измерительной системы [12–14];
- 2) погрешности, обусловленные объектом измерения;
- 3) методические причины.

Инструментальные составляющие погрешности вызываются погрешностями системы координатных перемещений узлов сканера, погрешностями оптической системы формирования и анализа изображений точек, создаваемых сканирующим лучом на измеряемых поверхностях.

К факторам объекта измерения, оказывающим значительное влияние на погрешность измерения координат точек поверхностей в сканирующей измерительной системе относятся форма и шероховатость поверхности, цвет, отражательная и поглощательная способность материала объекта для применяемого в сканирующей системе источника излучения с длиной волны $\lambda = 0,68$ мкм и др. [4, 5].

Конструкция объекта измерения, расположение его поверхностей приводит к возникновению участков измеряемых поверхностей, которые являются недоступными для сканирующего луча.

Методические погрешности определяются применяемыми алгоритмами сканирования и обработки массивов координат точек при построении трехмерной модели объекта, а также особенностями базирования объекта измерения в сканирующей системе [3].

Исследование влияния цвета поверхности на погрешность измерения координат точек поверхности

Цвет поверхности детали – важный параметр, устанавливаемый конструктором изделия. Цвет поверхности определяется материалом детали, технологическим процессом обработки и применяемым покрытием. Так, конструкционные материалы (металлы, сплавы, пластмассы, древесина и т.д.) имеют различный цвет. Наличие покрытия поверхностей, вид покрытия (электрохимические покрытия, лакокрасочные покрытия) и состояние поверхности (окисные пленки, загрязнения на поверхности и т.д.) также определяют ее цвет [6].

Изучение влияния цвета поверхностей объекта на погрешность получаемой модели является важным направлением исследований точности сканирующих оптоэлектронных измерительных систем [15]. Однако представленные в этих исследованиях оценки влияния цвета на погрешность сводятся к сравнению относительного количества пропущенных сканером точек на поверхностях, окрашенных в различный цвет. При этом не определяется представляющая наибольший интерес количественная оценка погрешности измерения координаты точки как линейной величины.

Авторами статьи проведены экспериментальные исследования влияния цвета поверхности измеряемой детали на погрешность измерения координат точек.

Исследование влияния цвета поверхности на погрешность определения координат точек при сканировании проводилось с использованием специальных образцов цвета поверхности. Образцы цвета представляют собой детали с плоскими поверхностями с точными параметрами

ми геометрической формы по плоскостности (отклонения от прямолинейности в плоскости не более 0,003 мм, шероховатость поверхностей образцов, на которые наносились покрытиями различных цветов, измеренная по параметру Ra составила от 0,32 до 0,4 мкм). В качестве красителей применялись матовые акриловые краски с высокой жидкотекучестью. Применение таких красителей позволило получить однородные ровные цветные покрытия, не изменяющие точную плоскую форму поверхностей образцов [7].

Проводилось сканирование поверхностей образцов цвета с помощью ЛСОИС модели Roland PICZA LPX-250, строились 3D модели поверхностей и исследовались неровности профилей поверхностей сканов.

За погрешность измерения координат точек поверхности, вызываемую влиянием цвета поверхности были приняты отклонения от прямолинейности номинально прямолинейных профилей поверхностей образцов. Для расчета значения погрешности измерения координат точек использовались следующие интегральные и точечные оценки отклонений от прямолинейности профиля:

– среднеквадратичные отклонения координат точек профиля P_q (*Root mean square deviation*) от средней линии:

$$P_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Y^2(x) dx}, \quad (2)$$

где l – длина профиля;

– размах координат точек P_t (*Total height of profile*):

$$P_t = Y_{\max} - Y_{\min}, \quad (3)$$

где $Y_{\max}$, $Y_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значение ординаты профиля соответственно;

– средняя арифметическая высота неровностей профиля P_a (*Arithmetical mean deviation of profile*):

$$P_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны модели поверхностей сканированных образцов, окрашенных в различные цвета. На рис. 3–6 представлены профили неровностей, полученных на сканах поверхностей образцов цвета.

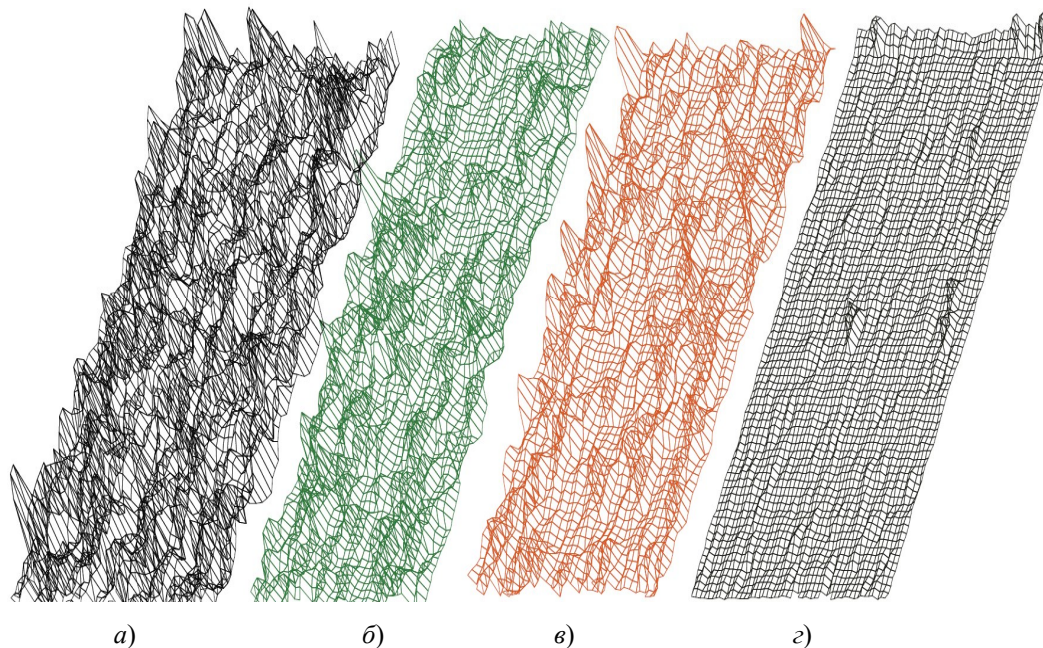


Рис. 2. Трехмерная модель сканированной поверхности с окрашенными в различные цвета участками:
а – черный; б – зеленый; в – оранжевый; з – белый



Рис. 3. Профиль неровностей модели сканированной поверхности черного цвета

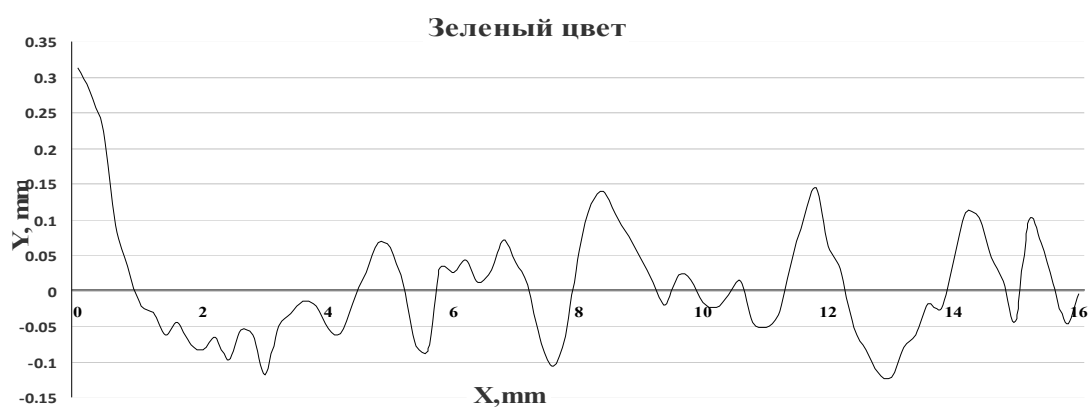


Рис. 4. Профиль неровностей модели сканированной поверхности зеленого цвета

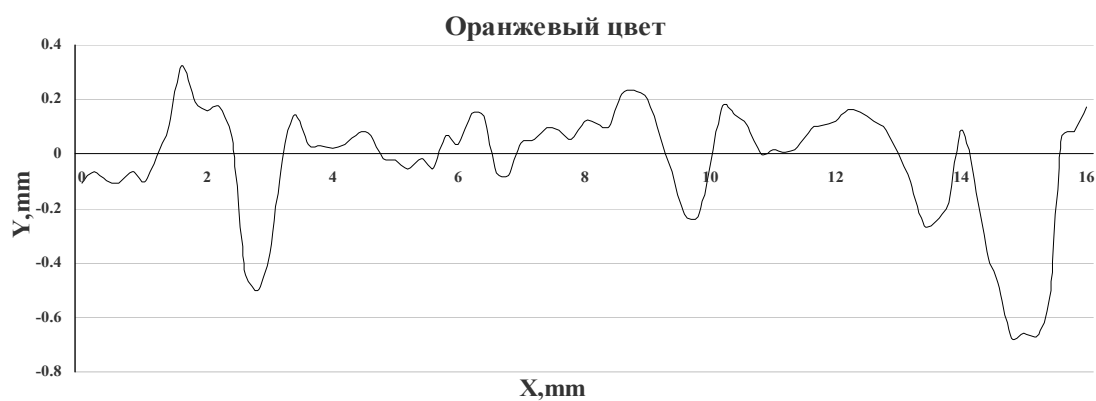


Рис. 5. Профиль неровностей модели сканированной поверхности оранжевого цвета

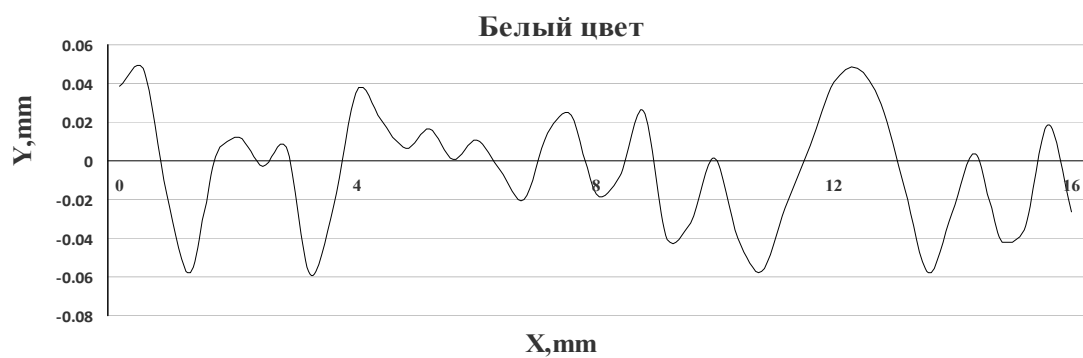


Рис. 6. Профиль неровностей модели сканированной поверхности белого цвета

Обсуждение результатов

На профилях, полученных на сканах образцов цвета поверхности (см. рис. 3–6), наблюдаются различные, в том числе и значительные, отклонения профиля от прямолинейности, которые никак не обусловлены отклонениями формы и шероховатостью поверхностей образцов. Возникновение таких отклонений профиля от прямолинейного на сканах объясняется погрешностью триангуляционного датчика оптоэлектронной сканирующей системы под влиянием рассеивающих, отражающих и поглощающих свойств поверхностей с различным цветом покрытия.

Для сравнения результатов исследования влияния цвета поверхностей на погрешность измерения координат были построены диаграммы зависимостей параметров P_q и P_t от цвета поверхности, которые представлены на рис. 7 и 8.

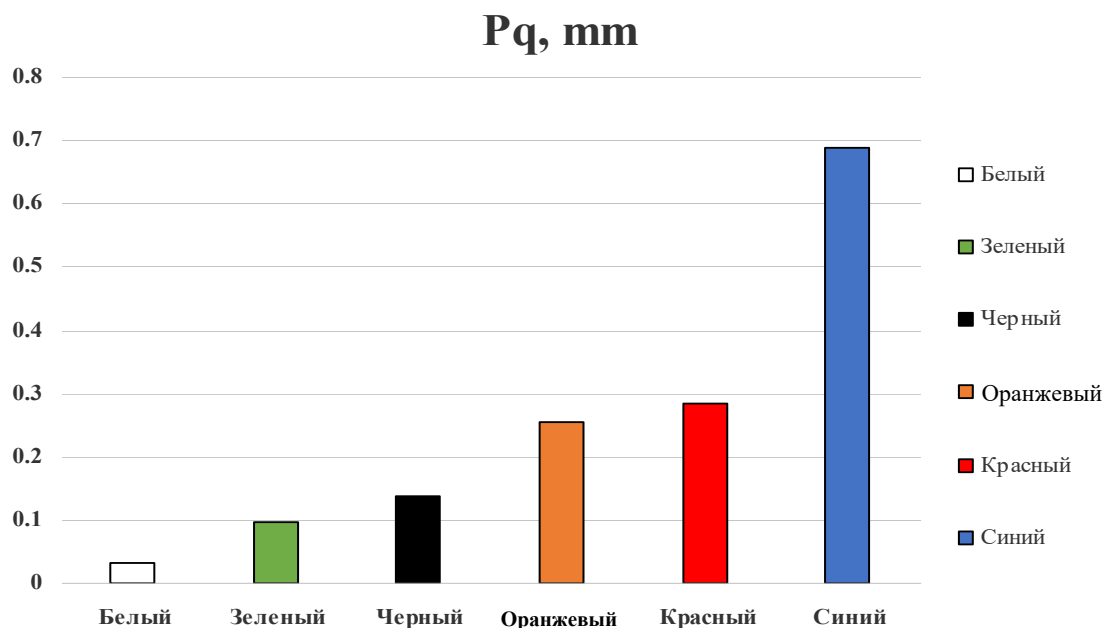


Рис. 7. Влияние цвета поверхности на среднееквadrатичное отклонение P_q погрешности измерения координаты Y точек поверхности

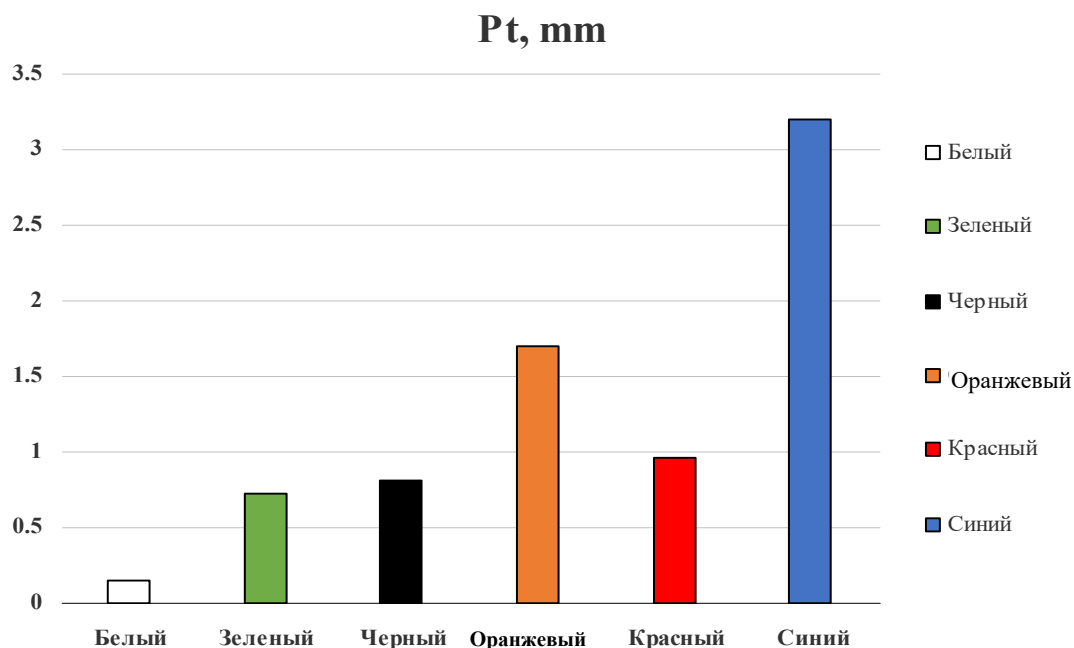


Рис. 8. Влияние цвета поверхности на размах P_t погрешности измерения координаты Y точек поверхности

В результате проведенных исследований установлено, что наибольшие погрешности измерения координат точек возникают при сканировании поверхностей, имеющих черную, зеленую, синюю, оранжевую, красную окраску. Так, для поверхности, окрашенной в черный цвет, размах значений погрешности измерения координат точек P_i достигает значения 0,8 мм, для поверхности, окрашенной в синий цвет, – более 3 мм. Оценки среднеквадратичных значений погрешности P_q для этих цветов составили соответственно 0,14 и 0,7 мм.

Наименьшие погрешности достигаются при сканировании поверхностей, имеющих окраску светлых тонов (белая, серая, желтая окраска). Оценки среднеквадратичных значений погрешности P_q для этих цветов составили не более 0,035 мм. Размах значений погрешности P_i не превысил в исследованиях 0,13 мм.

Высокоточное сканирование и построение моделей поверхностей может быть выполнено для обработанных поверхностей из наиболее распространенных конструкционных материалов без нанесения покрытия. Однако погрешность измерения координат точек поверхностей в этом случае существенно зависит от шероховатости поверхности, формы поверхности и алгоритма сканирования. Значения погрешности измерения координат точек для технических поверхностей без специальной подготовки может составлять до десятков миллиметров.

Заключение

1. Проведены исследования погрешности измерения координат точек поверхностей, окрашенных в различные цвета.
2. Для уменьшения погрешности рекомендуется окрашивать сканируемые поверхности в светлые цвета (белый, светло-серый, желтый). При этом наносимое покрытие не должно иметь блеска. Блестящие поверхности требуют нанесения антибликового покрытия. Толщина слоя покрытия составляет 6–12 мкм, может быть точно измерена и учтена в результатах измерения геометрических параметров.
3. Результаты, полученные при исследовании влияния цвета поверхности на погрешность измерения координат точек в лазерных сканирующих системах, могут быть использованы также для других типов многокоординатных сканирующих измерительных систем, построенных на принципах триангуляции, фотограмметрии и лазерной дальнометрии.

Библиографический список

1. Пьей Сони Вин. Исследование погрешности измерения деталей в 3D сканирующих оптоэлектронных измерительных системах / Пьей Сони Вин, А. В. Шулепов // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2018) : материалы XI Междунар. конф. – Москва : МГТУ «СТАНКИН», 2018. – С. 55–61.
2. Зуйков, А. А. Повышение точности измерений малогабаритных объектов с применением специальных систем визирования в компьютеризированных измерительных микроскопах / А. А. Зуйков, А. В. Шулепов // Приборы. – 2012. – № 9 (147). – С. 39–44.
3. Марков, Б. Н. Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости / Б. Н. Марков, А. В. Шулепов // Измерительная техника. – 2015. – № 7. – С. 4–7.
4. Леун, Е. В. Исследование и разработка сапфировых измерительных наконечников для приборов активного контроля размерных параметров изделий / Е. В. Леун, А. В. Шулепов // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С. 91–95.
5. Латонов, И. В. Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа / И. В. Латонов, А. В. Шулепов // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 1 (24). – С. 141–145.
6. Разработка системы обработки изображения измерительного комплекса для настройки инструмента станков с ЧПУ / А. В. Шулепов, С. Н. Герасимов, И. Е. Холин, Д. А. Мастеренко, Н. В. Шулепова // Вестник МГТУ Станкин. – 2015. – № 4 (35). – С. 89–94.
7. Марков, Б. Н. Зарубежная практика нормирования параметров 3D-рельефа шероховатости поверхностей / Б. Н. Марков, П. Н. Емельянов // Вестник МГТУ Станкин. – 2015. – № 4 (35). – С. 95–100.

8. Зуйков, А. А. Повышение точности измерения малогабаритных отверстий с помощью измерительного микроскопа на основе цифровой обработки изображения / А. А. Зуйков, А. В. Шулепов // Вопросы электромеханики : труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 127, № 2. – С. 45–48.
9. Марков, Б. Н. Двухмерные фильтры изображения шероховатости поверхности / Б. Н. Марков, А. В. Шулепов // Измерительная техника. – 2015. – № 8. – С. 3–5.
10. Марков, Б. Н. Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности / Б. Н. Марков, О. Н. Меликова, А. В. Шулепов // Измерительная техника. – 2017. – № 5. – С. 30–33.
11. Марков, Б. Н. Методика вычисления нормируемых стандартами ISO функциональных параметров трехмерной структуры шероховатости поверхности / Б. Н. Марков, П. Н. Емельянов, А. В. Глубоков, А. В. Шулепов // Измерительная техника. – 2018. – № 2. – С. 23–27.
12. Разработка прибора для измерения отклонений формы и шероховатости поверхностей особо точных деталей / Д. А. Мастеренко, П. Н. Емельянов, М. Г. Ковальский, А. Ю. Байковский, С. Ю. Алабин // Измерительная техника. – 2014. – № 3. – С. 24–28.
13. Разработка измерительного комплекса для автоматизированной настройки инструментальных наладок для станков с ЧПУ / А. В. Шулепов, И. Е. Холин, С. Н. Герасимов, Д. А. Дударов, А. Ю. Байковский, В. А. Куликов // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 32–35.
14. Телешевский, В. И. Измерительная информационная система для контроля линейных и угловых размеров изделий на принципах интеллектуальной компьютерной микроскопии / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, Е. М. Роздина // Приборы. – 2012. – № 4 (142). – С. 24–27.
15. Zaimovic-Uzunovic, N. Influence of Surface Parameters on Laser 3D Scanning / N. Zaimovic-Uzunovic, S. Lemes // 10th International Symposium on Measurement and Quality Control. – 2010, September 5-9. – P. 408–411. – URL: www.am.unze.ba

Шулепов Алексей Виленинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных измерительных систем
и технологий,
Московский государственный
технический университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1)
E-mail: avshul@yandex.ru

Shulepov Aleksey Vileninovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information measuring systems
and technologies,
Moscow State Technical University «STANKIN»
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Пьей Сони Вин

аспирант,
Московский государственный
технический университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1)
E-mail: rival.psw@gmail.com

Pye Sone Win

postgraduate student,
Moscow State Technical University «STANKIN»
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Шулепов, А. В. Исследование погрешности измерения геометрических параметров деталей в зависимости от цвета покрытия поверхности в лазерных сканирующих оптоэлектронных измерительных системах / А. В. Шулепов, Пьей Сони Вин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 55–62. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-8.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

УДК 621.42.068.2

DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-9

В. Я. Савицкий, А. А. Семенов, С. С. Серский

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАЛИВКИ И ЗАРЯДКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В ВОЙСКАХ

V. Ya. Savitsky, A. A. Semenov, S. S. Serskiy

AUTOMATION OF FILL AND BATTERY CHARGING IN THE ARMY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Автоматизация технического обслуживания и ремонта аккумуляторных батарей (АКБ) лежит в основе снижения времени обслуживания, улучшения качества обслуживания, снижения потерь электролита. Целью представленной работы является разработка автоматизированной системы заливки и зарядки аккумуляторных батарей. **Материалы и методы.** Для определения параметров разрабатываемой системы рассмотрена технология заливки и зарядки аккумуляторных батарей в войсках. Новизна системы анализировалась на основе патентных исследований и существующих устройств технического обслуживания АКБ. **Результаты.** В результате проведенных исследований разработана автоматизированная система заливки и зарядки аккумуляторных батарей, предназначенная для обслуживания кислотных и щелочных АКБ. Приводится технико-экономическая оценка эффективности системы на основе сетевого графика операций заливки и зарядки аккумуляторных батарей. **Выводы.** Применение автоматизированной системы в войсковом звене обеспечит сокращение времени с 64 до 18 ч, т.е. в 4 раза.

A b s t r a c t. Background. Automation of maintenance and repair of batteries (CRA) lies at the heart of reducing maintenance time, improve service quality, lower electrolyte losses. the aim of the submitted work is the development of an automated system and battery charging. **Materials and methods.** To define the settings of your system and fill technology considered battery charging troops. The novelty of the system was analysed on the basis of the patent research and existing devices maintenance battery. **Results.** As a result of the carried out researches designed automated system fills and charging batteries, designed for the maintenance of acid and alkaline batteries. When usual techno-economic evaluation of the effectiveness of the system based on a network graph operations fill and battery charging. **Conclusions.** Application of automated system in vojskovom link will provide reduced time with 64 hours before 6:00 pm, i.e. 4 times.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автоматизированная система, аккумуляторные батареи, рабочее состояние, режимы заряда.

К e y w o r d s: automated system, batteries, operating status, charge mode.

Введение

В различных отраслях промышленности и на транспорте широкое применение находят автоматизированные системы различного назначения с возможностью выполнения технологических задач. Необходимость применения этих систем и соответствующих информационных технологий обусловлена обработкой больших объемов разнообразной информации и сложностью решаемых задач, требующих оперативного получения и экспертного анализа этой информации с использованием соответствующей базы знаний. Обычно решение задач технического диагностирования военной техники в период боевых действий усложняется ограниченностью времени, отводимого на поиск неисправностей и восстановление техники.

С целью повышения военной техники необходимо при эксплуатации осуществлять контроль исправности систем и механизмов, а также остаточный ресурс, который с достаточной достоверностью позволит планировать выполнение различных производственных операций. Кроме того, важной задачей является планирование обслуживания и ремонта военной техники. Основой решения этих задач является диагностика неисправностей и состояния военной техники на базе применения разработанных общих теоретических положений с учетом конкретной специфики решаемых задач, конкретных критериев и ограничений.

Работоспособность техники во многом зависит от готовности аккумуляторов к выполнению задач по обеспечению эффективного функционирования систем. Вместе с тем принимаются меры по более рациональной эксплуатации аккумуляторных батарей (АКБ): снижению эксплуатационных потерь, продлению их сроков службы и повышению надежности в работе. Для эффективного использования АКБ необходимо повысить уровень культуры проведения работ по уходу за ними. Строгое соблюдение технологии приведения щелочных АКБ в рабочее состояние позволяет увеличить сроки их эксплуатации.

Анализ работ при подготовке ВВТ к эксплуатации показывает, что значительное время требуется для ввода в строй АКБ. В настоящее время на вооружении Российской армии состоят различные типы щелочных и кислотных АКБ. В войсковой эксплуатации находятся более 80 типов АКБ, которые требуют своевременного и качественного обслуживания, что обуславливает необходимость разработки автоматизированных систем заливки и зарядки АКБ.

Результаты исследования

Основными электрическими характеристиками аккумулятора являются электродвижущая сила (ЭДС), напряжение и емкость. Значение ЭДС исправного аккумулятора зависит от плотности электролита (степени его заряженности) и изменяется в пределах от 1,92 до 2,15 В. При эксплуатации АКБ по значению ЭДС ориентировочно определяют их состояние, а также проверяют короткое замыкание между разноименными электродами.

Напряжение при разряде аккумулятора зависит от величины разрядного тока, продолжительности разряда и температуры электролита; она всегда меньше величины ЭДС. Разряжать аккумулятор ниже определенного предела, называемого конечным разрядным напряжением, недопустимо, так как это может привести к переполусовке и разрушению активной массы электродов. Для разных величин разрядного тока принимается различное конечное разрядное напряжение. При разрядном токе 10-часового разрядного режима, например, конечное разрядное напряжение составляет 1,7 В. Напряжение при заряде зависит главным образом от степени заряженности аккумулятора, температуры электролита и всегда больше величины ЭДС.

Емкость аккумулятора зависит от количества активной массы (количества и размера электродов), разрядного тока, плотности и температуры электролита, срока службы аккумулятора и является его важнейшей эксплуатационной характеристикой. При больших величинах разрядных токов, при низких температурах электролита, а также в конце срока службы емкость, отдаваемая аккумулятором, снижается. За номинальную емкость аккумулятора принимается емкость, которую должен отдавать аккумулятор при его разряде током в течение 20 или 10 ч, т.е. при величине разрядного тока, численно равной соответственно 0,05 и 0,1 номинальной емкости. Для аккумуляторных батарей, применяемых в российской армии, основным является 10-часовой режим разряда.

Повышение эффективности технического обслуживания АКБ в современных условиях и сокращение времени приведения войск в боевую готовность может быть достигнуто путем автоматизации трудоемких процессов. Обеспечить техническое обслуживание большого числа АКБ, эксплуатируемых в войсках, без применения методов и средств автоматизации не представляется возможным.

Из большого числа операций при обслуживании АКБ целесообразно автоматизировать заливку электролита в аккумуляторы, заряд и перезаряд в течение которых проводятся часто повторяющиеся операции контроля, измерений и регулировки. Важное значение в процессе подготовки к эксплуатации имеет сокращение времени заливки электролита в АКБ и их заряда, что повышает экономичность их применения [1]. В условиях внедрения технологичных методов ускоренного режима заряда АКБ в основе лежат надежные способы определения момента окончания заряда.

Анализ оснащенности участка по зарядке АКБ войскового пункта технического обслуживания и ремонта (рис. 1) показывает наличие только различных примитивных приспособлений для заливки электролита, заряда и выполнения других операций. При этом возможны пролив и недолив электролита, что приводит к увеличению тока саморазряда через проводящий слой электролита между выводами аккумуляторов. Кроме того, при засорении электролита происходит временный выход АКБ из строя из-за карбонизации. Чтобы избежать перелива электролита, сохранить химическую чистоту, необходимо при первоначальной заливке строго дозировать его количество.



Рис. 1. Рабочее место для заливки и зарядки АКБ

В настоящее время разработано достаточно много различных автоматических и полуавтоматических приспособлений для заливки электролита в АКБ, контроля их энергетических характеристик. При поиске различных устройств и приспособлений [2–4] выявлено, что все существующие образцы достаточно сложны по устройству и при эксплуатации. Это делает практически невозможным их внедрение для проведения технического обслуживания в войсках, особенно в полевых условиях.

Известен комплекс для заряда и тренировки АКБ, содержащий общий источник питания, к которому подключены вольтметр, зарядные ячейки, переключатели «заряд-разряд», включенные последовательно с батареями, нагрузочный реостат, амперметр, предохранители. Система позволяет вручную через переключатели «заряд-разряд» выполнить заряд АКБ при постоянной величине зарядного тока, а также провести контрольно-тренировочный цикл посредством поочередного разряда и заряда АКБ. Требуемое напряжение поддерживается по вольтметру. Зарядный ток устанавливается по амперметру в начале заряда АКБ посредством нагрузочного реостата (Свинцовые стартерные аккумуляторные батареи : руководство [утв.

зам. начальника Главного бронетанкового управления и зам. начальника Автотракторного управления]. М. : Воениздат Мин. обороны СССР, 1983., рис. 41, с. 51; рис. 42, с. 52).

Недостатком известного комплекса является невозможность автоматического управления процессом заряда и разряда, а также невозможность автоматического контроля состояния АКБ как в целом, так и отдельных аккумуляторов АКБ в процессе заряда и разряда.

Наиболее близким к предлагаемому техническому решению является автоматизированный программно-аппаратный комплекс для заряда и тренировки АКБ «Призма» [литература], включающий управляющее программное устройство, М зарядных модулей, объединенных адресно-информационной сетью с управляющим программным устройством. При этом каждый из М зарядных модулей содержит АКБ, источник питания, устройство разряда, отличающийся тем, что адресно-информационная сеть представляет собой интерфейс, а управляющее программное устройство состоит из системного контроллера и персональной электронной вычислительной машины (ПЭВМ). Кроме того, источник питания выполнен импульсным программно-управляемым, а устройство разряда выполнено в виде блока разрядных резисторов, при этом в каждый модуль дополнительно введен программно управляемый измерительный адаптер и, подключенные к его входу, датчик температуры электролита и датчик напряжения. Датчик температуры электролита установлен в среднем аккумуляторе в отверстии для заливки электролита. Датчик напряжения измеряет напряжения как на АКБ, так и на отдельных аккумуляторах. Программно управляемый измерительный адаптер снабжен панелью индикации, выполненной с возможностью отображения информации: включение; заряд; разряд; блокировка; шкала уровня заряда АКБ; работа; наличие связи с ПЭВМ. Выходы источника питания и блока разрядных резисторов соединены и подключены к входу АКБ, при этом входы-выходы измерительного адаптера, входы-выходы блока разрядных резисторов и входы-выходы источника питания соединены с системным контроллером и ПЭВМ через интерфейс (Патент на изобретение RU №2387054, МПК H01M10/42, H02J7/02, опубл. 20.04.2010 г.).

Недостаток автоматизированного программно-аппаратного комплекса заключается в том, что он не позволяет отслеживать параметры, такие как плотность электролита и полноту заливки электролита.

Предлагаемая авторами система (рис. 2) направлена на расширение возможностей автоматизированной системы зарядки аккумуляторных батарей в режиме функционирования. Это достигается тем, что в автоматизированной системе заряда АКБ батарей, содержащей блоки управления, вызова программ, выполненных в ПЭВМ, блок источника питания, тестовых воздействий, измерительный, коммутатор входных и выходных сигналов, выполненные в виде блока сопряжения и коммутации, согласующих блоков и датчиков, блоков сопряжения и коммутации с датчиками, соединенными с ПЭВМ через согласующие устройства. Дополнительно установлены: датчики плотности и уровня электролита, емкости для заливки электролита, дистиллированной воды, кислоты (щелочи) с устройством подачи. Аналитические блоки с входами – выходами связаны через усилители и аналого-цифровые преобразователи с датчиками. Информационный блок, блок хранения информации, блок анализа информации соединены через многоканальный вход – выход соответственно с цифровым выходом – входом ПЭВМ. Цифроаналоговые преобразователи, связанные с ПЭВМ и блоками усиления, сопрягаемые с исполнительными устройствами подачи напряжения (тока) с блока питания, устройствами подачи жидкостей (электролита, дистиллированной воды, кислоты (щелочи)). Это обеспечивает расширение возможностей по получению информации о плотности электролита, полноте заливки электролита в АКБ, автоматическую заливку и зарядку АКБ, вывод данных, полученных в результате обследования на табло, хранить эту информацию в отдельном блоке, при необходимости считывать ее. Полученные динамические и контрольные параметры вводятся в блок анализа информации для определения необходимого количества заливки жидкости и заряда АКБ.

Автоматизированная система включает заряд АКБ, содержащую блоки управления вызова программ (БУ) 3 и (БУЦ) 7, выполненные в ПЭВМ 1, блок источника питания 11, тестовых воздействий, измерительный, информационный блок 13, коммутатор входных и выходных сигналов, выполненные в виде блока сопряжения и коммутации (АБ) 5, и (БС) 9 согласующий и датчики 2, соединенные с ЭВМ через согласующие устройства, в которой дополнительно введены: датчики 2 измерения плотности электролита, уровня электролита,

уровня расходных жидкостей (кислоты, щелочи, дистиллированной воды) связанные с аналого-цифровыми преобразователями и через аналитические блоки 5 с входами – выходами ПЭВМ, емкости для заливки 8 электролита, дистиллированной воды, кислоты (щелочи) с устройством подачи и контроля уровня жидкости, связанные через блоки усиления 7 и цифро-аналоговые преобразователи с блоком сопряжения с входами – выходами ПЭВМ, блок хранения информации 12, блок анализа информации 14, соединенные через многоканальный вход и выход соответственно с цифровым выходом и входом ЭВМ.

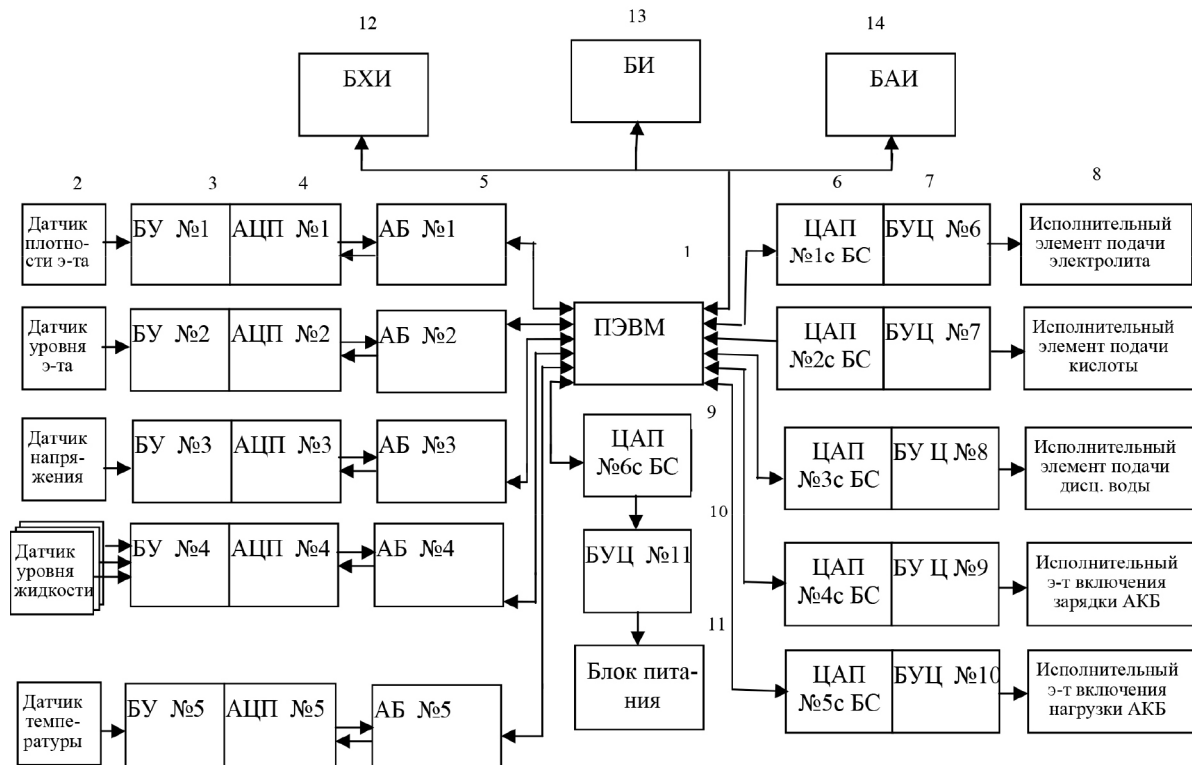


Рис. 2. Схема автоматизированной системы заливки и зарядки аккумуляторных батарей

Работает система следующим образом.

Блоки ЦАП с БС 6 по командам ПЭВМ 1 производят коммутацию и цифровую обработку сигналов, поступающих с выходов ПЭВМ и усиленными БУЦ 7 электрическими параметрами, при необходимости подают тестовые сигналы на входы объектов исполнительных элементов 8. Это позволяет проводить управление подачей жидкости в аккумуляторы и напряжения на клеммы аккумулятора в соответствии с сигналами блока анализа. После цифровой обработки сигналов их параметры в двоичном коде передаются в ПЭВМ 1.

Блоки аналитические АБ 5, выполняя команды ПЭВМ 1, производят коммутацию и цифровую обработку сигналов, поступающих с выходов специализированных датчиков 2, передающихся с блоков усиления 3 через аналого-цифровые преобразователи. После цифровой обработки сигналов в АЦП их параметры в двоичном коде передаются в ПЭВМ.

Все полученные параметры поступают в блок анализа информации 14 ПЭВМ 1, где автоматически производится их сравнительная оценка и дается заключение о подаче жидкости (электролита, дистиллированной воды, кислоты), подаче необходимого напряжения, поддержания режима заряд-разряд. Если аккумуляторная батарея не заряжается, ПЭВМ 1 дает рекомендации по ее ремонту.

Полученные значения диагностируемых параметров от ПЭВМ 1 поступают в блок информации (БИ) 13 и последовательно отображаются в мониторе.

Параллельно эта же информация поступает в блок хранения диагностической информации (БХИ) 12 и записывается на магнитные носители для хранения и возможного считывания для документирования и анализа.

Предлагаемая система имеет более широкие функциональные возможности за счет диагностирования электрических параметров, плотности электролита и уровня электролита. Расширением исполнительных качеств автоматизированной системы, кроме зарядки, система обеспечивает подготовку аккумуляторов к зарядке, проверку наличия и состава жидкости, при необходимости ее пополнение, а затем зарядку аккумуляторов.

Автоматизированная система относится к электроизмерительной технике и автоматике и может быть использована для организации автоматических режимов заливки и заряда аккумуляторных батарей.

Для определения количества времени, затрачиваемого для подготовки АКБ к работе с предлагаемой автоматизированной системой, рассчитан и построен сетевой график.

Перечень операций и работ, проводимых при заряде АКБ и аккумуляторов, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень работ проводимых при зарядки АКБ

Обозначение	Содержание операций	min	ср	max	Шифр
0-1	Постановка задач, инструктаж, подготовка рабочего места и ЗРУ	0	5	20	м, в
1-2	Обслуживание АКБ, общий осмотр	5	0	45	м, в
2-3	Проверить состояние вентиляных пробок и прокладок	5	0	35	в
2-4	Проверить правильность последовательного соединения «+» и «-» выводов АКБ	5	0	45	м
3-5	Заливка АКБ электролитом	7	10	70	в
4-6	Заливка АКБ электролитом	7	10	70	м
6-7	Пропитка пластин АКБ электролитом	5	0	65	м, в
7-8	Довести до нормы уровень электролита и его плотность	5	0	45	м, в
8-9	Собрать аккумуляторы в отдельные группы	5	0	35	м, в
9-10	Подключить АКБ к ЗРУ	7	0	13	м, в
10-11	Зарядка АКБ ускоренным режимом	20	40	260	м, в
11-12	Отключить АКБ от ЗРУ	5	0	35	м, в
12-14	Проверить напряжение банок	0	10	140	м
12-13	Проверка уровня и плотности электролита	0	0	70	в
13-15	Обслуживание АКБ после заряда	0	5	50	в
14-16	Оформление документации	5	0	25	м
16-17	Подведение итогов	5	0	15	м, в

Согласно табл. 1 составим сетевой график, на котором отметим номер операции, время, отведенное на операцию, кто проводит ее и последовательность выполнения (рис. 2).

Благодаря этому графику рационально распределяется время, что позволяет сократить время приведения АКБ в рабочее состояние.

Определим продолжительность путей сетевого графика (СГ):

$$t_B = t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-3} + t_{3-5} + t_{6-7} + t_{7-8} + t_{8-9} + t_{9-10} + t_{10-11} + t_{11-12} + t_{12-13} + t_{13-15} + t_{16-17} = 720 \text{ мин};$$

$$t_M = t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-4} + t_{4-6} + t_{6-7} + t_{7-8} + t_{8-9} + t_{9-10} + t_{10-11} + t_{11-12} + t_{12-14} + t_{14-16} + t_{16-17} = 745 \text{ мин},$$

где t_M – путь специалиста аккумуляторщика; t_B – путь водителя аккумуляторщика.

При заливке электролита в АКБ с помощью штатных приспособлений, перелива в сосуды, переноски возможны потери электролита, которые составляют примерно 10-15 % от общего количества и составят по стоимости 70–110 руб.

Внедрение в процесс обслуживания АКБ, предложенных приспособлений, прежде всего, сокращает время приведения АКБ в рабочее состояние. Автоматизированное устройство для заливки и зарядки АКБ позволяет сократить время заливки одного аккумулятора с 3–4 мин до 25 с, что в масштабе артиллерийского полка составляет сокращение времени с 64 до 18 ч, т.е. в 4 раза.

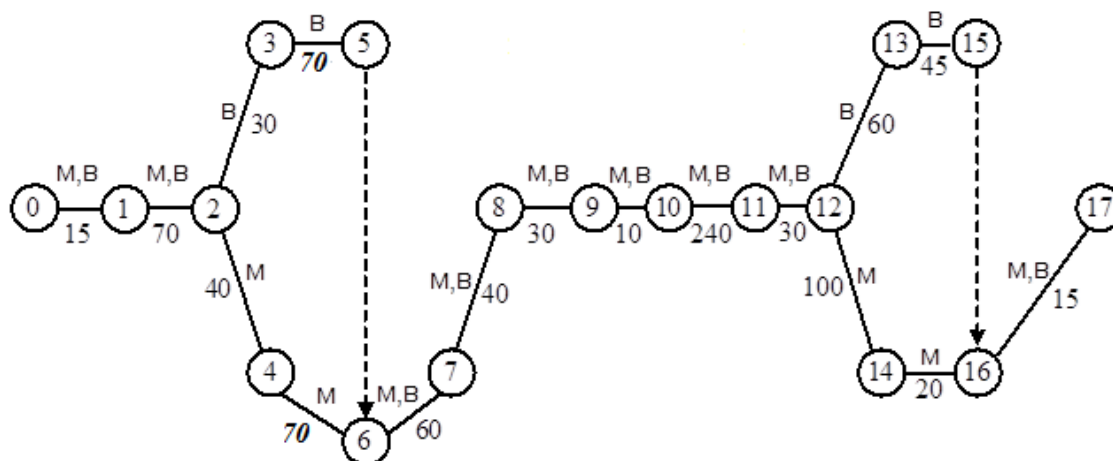


Рис. 2. Сетевой график проведения работ по техническому обслуживанию и заряду щелочных аккумуляторных батарей

Заключение

В заключение следует отметить, что в войсковом звене имеются более ста различных аккумуляторов [5–8]. С целью обеспечения их боеготовности необходимо своевременно проводить технические обслуживания соответственно типам, характеристикам и параметрам батарей. Наибольшее время при обслуживании затрачивается при проведении операций заливки и зарядки аккумуляторных батарей. К сожалению, в обслуживающих подразделениях ДАРМ в основном применяются примитивные устройства для выполнения этих операций. В результате выявляются большие временные затраты при обслуживании, требующие ручного труда. Предложенная автоматизированная система заливки и зарядки аккумуляторных батарей позволяет сократить временные и материальные затраты при проведении технического обслуживания, обеспечить безопасность при выполнении работ.

Библиографический список

1. Влияние режима эксплуатации на стабильность характеристик герметичных НЕС аккумуляторов / В. В. Теньковцев, Б. А. Борисов, Л. Ш. Ткачева // Сб. работ по ХИТ. – Санкт-Петербург : Энергия, 2012. – С. 59–70.
2. Руководство по организации эксплуатации и хранения щелочных аккумуляторов, применяемых в образцах ракетно-артиллерийского вооружения. Часть 1. – Москва : Воениздат, 1990. – 152 с.
3. Войлов, А. М. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей / А. М. Войлов. – Москва : Связь, 1995. – 152 с.
4. Полковая артиллерийская ремонтная мастерская ПМ-2-85. Руководство по эксплуатации. 12У341-0000000-20 РЭ. – Москва : Воениздат, 2005. – 100 с.
5. Багоцкий, В. С. Химические источники тока / В. С. Багоцкий, А. М. Скундин. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
6. Таганова, А. А. Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры : справочник / А. А. Таганова, И. А. Пак. – Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2003. – 208 с.
7. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы / Д. А. Хрусталева. – Москва : Изумруд, 2003. – 224 с.
8. Савицкий, В. Я. Ремонт ракетно-артиллерийского вооружения : учеб. пособие для вузов / В. Я. Савицкий. – Пенза : ПФВАМТО, 2013. – 377 с.

Савицкий Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
общепрофессиональных дисциплин,
филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева (г. Пенза)
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок, корп. 112)
E-mail: al11091952@yandex.ru

Savitsky Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of general professional disciplines,
Branch of the Military Academy of Material
and Technical Support named after
army general A. V. Khrulev (Penza)
(building 112, Voennyy gorodok,
Penza-5, Russia)

Семенов Александр Алексеевич

кандидат технических наук,
старший преподаватель,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева (г. Пенза)
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок, корп. 112)
E-mail: al11091952@yandex.ru

Серский Сергей Сергеевич

курсант,
филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева (г. Пенза)
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок, корп. 112)
E-mail: al11091952@yandex.ru

Semenov Aleksandr Alekseyevich

candidate of technical sciences, senior lecturer,
sub-department of general professional disciplines,
Branch of the Military Academy of Material
and Technical Support named after
army general A. V. Khrulev (Penza)
(building 112, Voennyy gorodok,
Penza-5, Russia)

Serskiy Sergey Sergeyevich

student,
Branch of the Military Academy of Material
and Technical Support named after
army general A. V. Khrulev (Penza)
(building 112, Voennyy gorodok,
Penza-5, Russia)

Образец цитирования:

Савицкий, В. Я. Автоматизация заливки и зарядки аккумуляторных батарей в войсках / В. Я. Савицкий, А. А. Семенов, С. С. Серский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 63–70. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-9.

Ю. В. Гришанович, Д. С. Потехин, С. Д. Потехин, И. Е. Тарасов

ОБРАБОТКА МИОСИГНАЛОВ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИИ МОРЛЕ

Yu. V. Grishanovich, D. S. Potehin, S. D. Potehin, I. E. Tarasov

MIOSIGNALS PROCESSING BY SPECTRAL ANALYSIS METHODS USING MODIFIED THE MORLE WAVELET FUNCTIONS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Анализ биомедицинских сигналов с учетом важности здравоохранения как отрасли и уровня развития современной вычислительной техники позволяет улучшить характеристики медицинских устройств по ряду направлений. В частности, регистрация электрических сигналов, возникающих в мышцах (миография), может быть использована как в диагностических целях, так и в спортивной медицине или для управления различными техническими устройствами: протезами, экзоскелетами и т.п. С технической точки зрения миосигналы являются сигналами с нестационарными параметрами, поэтому для их анализа необходимо разрабатывать и применять соответствующие методы. **Материалы и методы.** В статье предлагается обработка миосигналов с помощью вейвлет-анализа, модифицированной функцией Морле, обеспечивающей обработку сигналов с нестационарными параметрами с возможностью регулирования соотношения полосы пропускания и локализации во временной области. **Результаты.** Предложенная методика применяется для качественного распознавания миосигнала, снятого с бицепса в стационарном состоянии и с физической нагрузкой. В работе показана возможность идентификации сигналов, посланных мозгом от сигналов ответной реакции мышц на нагрузку. **Выводы.** Использование вейвлет-преобразования модифицированной функцией Морле пригодно для анализа миосигналов с нестационарными параметрами и позволяет определять их характеристики.

Abstract. Background. Analysis of biomedical signals, taking into account the importance of health care as an industry and the level of development of modern computing technology, allows to improve the characteristics of medical devices in a number of areas. In particular, the registration of electrical signals arising in the muscles (myography) can be used both for diagnostic purposes and in sports medicine or for controlling various technical devices: prostheses, exoskeletons, etc. From a technical point of view, the miosignals are signals with non-stationary parameters, therefore, for their analysis it is necessary to develop and apply appropriate methods. **Materials and methods.** The article proposes the processing of myosignals using wavelet analysis with a modified Morlet function, which provides processing of signals with non-stationary parameters with the ability to control the ratio of bandwidth and timeline location. **Results.** The proposed methods is used for the qualitative recognition of the myosignal taken from the biceps in a steady state and with physical load. The article shows the possibility of identifying the signals sent by the brain from the signals of the response of the muscles to the physical load. **Conclusions.** Using of the wavelet transform with the modified Morlet function is useful for myosignals analysis with non-stationary parameters and allows to determine their characteristics.

К л ю ч е в ы е с л о в а: миоcигналы, цифровая обработка сигналов, вейвлет-преобразование, вейвлет-функция Морле.

Key words: myosignals, digital signal processing, wavelet transform, Morlet wavelet function.

Любой процесс возбуждения, протекающий в живой ткани, всегда сопровождается возникновением и изменением в ней биоэлектрических потенциалов [1].

Задача использования биоэлектрических сигналов для управления техническими устройствами сводится, прежде всего, к разработке эффективных методов отведения биоэлектрических сигналов, созданию методов и средств усиления и декодирования этих сигналов с целью выделения полезной информации [2]. Основные требования к методам обработки сигналов на современном этапе развития вычислительных средств – это возможность обработки нестационарных сигналов; возможность применения быстрых алгоритмов и удобство аппаратной реализации; высокая адаптивность.

Для решения поставленной задачи часто используют цифровую фильтрацию миоcигналов. Наиболее распространенными являются фильтры Бесселя, Баттерворта, Чебышева и др., а также класс фильтров, обладающих частотной характеристикой, получаемой с помощью операции прямого преобразования Фурье. Для устранения случайных шумов, в том числе шумов квантования, высокочастотных артефактов и помех, для сглаживания сигнала наиболее часто используется фильтрация скользящего среднего [3, 4]. Указанные виды фильтрации хорошо подходят для случаев, когда характеристики сигналов и помех являются стационарными и известными. Однако фильтры такого вида неприменимы в тех случаях, когда характеристики сигнала или шума изменяются во времени (большинство биомедицинских сигналов представляют собой нестационарные процессы).

Одна из проблем заключается в том, что непосредственный анализ миоcигналов затруднен из-за чувствительности их параметров к месту и способу крепления датчиков, физиологических особенностей людей, таких как различное сопротивление кожи человека, различные уровни электрических сигналов и т.д. Все это не позволяет получать однозначных характеристик для разных людей.

Для решения задачи необходимо разрабатывать методики анализа миоcигналов, обладающие минимальной чувствительностью к вышеперечисленным факторам, параметры которых будут адаптироваться к изменяющимся характеристикам сигнала и помех.

Кроме пороговых методов, в аналоговой технике часто используется дифференцирование, но такие методы в цифровой технике часто проигрывают методам, основанным на интегрировании [5].

Вейвлет-функции, обозначаемые как $\psi(\tau)$, занимают промежуточное положение между крайними случаями – дельта-функциями и бесконечными синусоидами и образуют некоторый набор функций, удовлетворяющий условиям:

– конечная амплитуда, т.е.

$$\psi(\tau) = 0 \text{ при } \tau \rightarrow \infty \text{ и } \tau \rightarrow -\infty; \quad (1)$$

– нулевое среднее значение, или

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau) d\tau = 0. \quad (2)$$

От вида базисных функций (вейвлет-функций) зависит возможность решения различных задач. Выбор вейвлет-функции для анализа конкретного сигнала является достаточно сложной задачей, от корректности решения которой в значительной степени зависит точность получаемых результатов и возможность их использования в последующих вычислениях. Ввиду того, что на вид вейвлет-функции не накладываются существенные ограничения, в настоящее время существуют различные их классы, обладающие специфическими свойствами. Обоснование выбора конкретной вейвлет-функции или ее синтез является необходимым этапом разработки способа цифрового анализа сигнала применительно к каждой конкретной задаче.

Вейвлет-преобразование заключается в вычислении интеграла вида

$$W_f(t, a) = \frac{1}{a} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \psi\left(\frac{\tau - t}{a}\right) \cdot X(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где t – время; a – масштаб вейвлет-функции; $\psi(\tau)$ – вейвлет-функция; $X(\tau)$ – исследуемый сигнал; τ_1 и τ_2 – границы интегрирования, которые обычно выбираются одинаковыми по модулю, т.е. $-\tau_1 = \tau_2 = \tau_p$.

Таким образом, применение вейвлет-преобразования к некоторому входному сигналу позволяет получить его представление в виде элементарной функции $\psi(\tau, a)$, спектральная плотность которой может изменяться во времени. В этом состоит коренное отличие вейвлет-преобразования от преобразования Фурье, которое позволяет представить исследуемый сигнал только в виде суммы бесконечных гармонических рядов.

Можно выделить две большие группы: вейвлет-функции, предназначенные для анализа пространственных характеристик сигнала и предназначенные для анализа его частотных характеристик. Такое разграничение связано с принципом неопределенности, устанавливающим соотношение между длительностью сигнала Δt и его полосой частот Δf :

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{\pi}. \quad (4)$$

Поскольку выражение (4) является неравенством, имеется функция некоторого вида, обеспечивающая минимальное значение произведения длительности сигнала на его полосу частот. Такой функцией является, например, функция Гаусса вида

$$\psi(\tau) = e^{-\frac{(2\pi f_0 \tau)^2}{k}}, \quad (5)$$

где f_0 – центральная частота; k – коэффициент затухания. Функция Гаусса обладает следующим свойством: функция ее спектральной плотности имеет тот же вид, что и исходная функция.

Однако использование функции Гаусса непосредственно для декомпозиции исследуемого сигнала малоэффективно, поскольку она является вещественной и, следовательно, непригодна для анализа сигналов с произвольной начальной фазой. Таким образом, для непрерывного вейвлет-анализа необходимо использование функции, сочетающей свойства синус-косинусного ряда Фурье и функции Гаусса. В теории вейвлет-анализа для этой цели предлагается использование вейвлет-функции Морле, ее классическое представление выражается формулой

$$\psi(x) = (\cos 5x + j \sin 5x) e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (6)$$

и вейвлет-преобразование имеет вид

$$W_f(t, a) = \frac{1}{a} \int_{-4\pi}^{+4\pi} \psi\left(\frac{x - t}{a}\right) f(x) dx, \quad (7)$$

но это представление не позволяет менять свойства вейвлет-функции Морле, поэтому ее приходится модифицировать к виду

$$\psi(\tau) = (\cos 2\pi f_0 \tau + j \sin 2\pi f_0 \tau) e^{-\frac{(2\pi f_0 \tau)^2}{k}}. \quad (8)$$

При этом в выражении (8) изменен смысл границ интегрирования, классически задаваемых в радианах, и масштаба a . В модифицированном виде границы интегрирования выражаются в единицах времени, коэффициент a имеет смысл масштабного коэффициента.

Пользуясь свойством коммутативности свертки, с учетом (8) можно переписать выражение (7)

$$W_f(t, a) = \frac{1}{a} \int_{-\tau_{\text{rp}}}^{\tau_{\text{rp}}} (\cos 2\pi f_0 \tau + j \sin 2\pi f_0 \tau) e^{-\frac{(2\pi f_0 \tau)^2}{k}} X(t - \tau) d\tau. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает модифицированное вейвлет-преобразование функций Морле, для которой границы интегрирования, выраженные в количестве полупериодов x анализируемого сигнала:

$$\pm \tau_{\text{rp}} = \pm x T = \pm x \frac{1}{f}, \quad (10)$$

где f и T – частота и период сигнала соответственно.

Соответствие классических и модифицированных границ: $\pm 4\pi$ означает, что вейвлет-функция занимает четыре полупериода x [6].

Для отслеживания миосигналов в режиме реального времени предлагается применить спектральный анализ с использованием модифицированной вейвлет-функции Морле.

На рис. 1 показан миосигнал с бицепса мужчины, выполняющего упражнение с гантелями в 5 кг (сгибание руки в локтевом суставе до угла в 90° и разгибание ее).

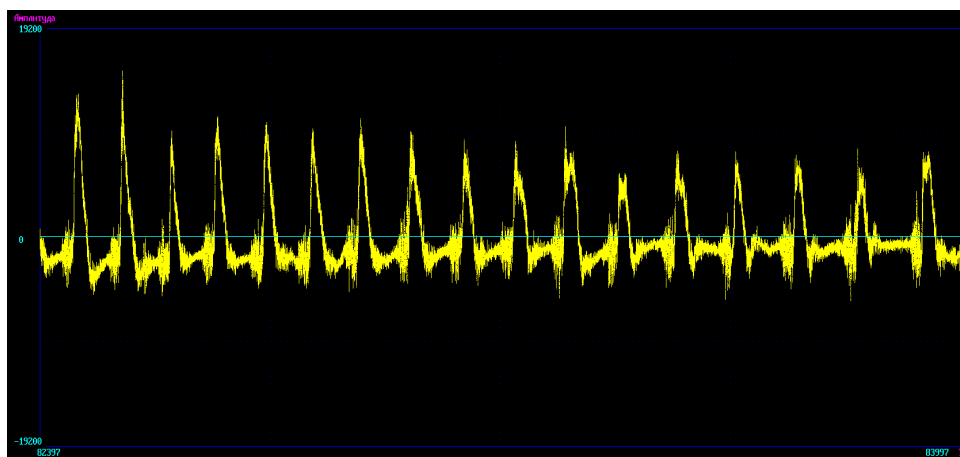


Рис. 1. Миосигнал, снятый с бицепса при многократном сгибании руки в локтевом суставе до угла в 90° с гантелями весом 5 кг

На рис. 2 показан результат вейвлет-анализа модифицированной функцией Морле. По оси абсцисс отложено время (порядка 100 с), по оси ординат – частота в герцах (частоты от 1 до 500 Гц). Цветом отображается интенсивность сигнала на определенной частоте в конкретный момент времени. Черный цвет соответствует полному отсутствию сигнала, далее красный, желтый и самый интенсивный – белый.

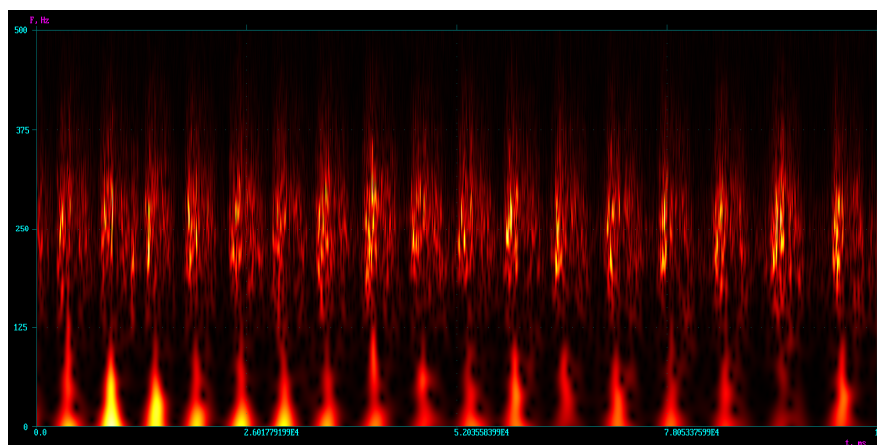


Рис. 2. Вейвлет-преобразование сигнала, представленного на рис. 1

Как видно, на рис. 2 просматривается максимум спектральной плотности на частотах около 250 Гц. Также можно отметить, что основной спектр расположен в диапазоне частот от 100 до 400 Гц. Для сравнения был проведен опыт со сгибанием руки в локтевом суставе без гантели (рис. 3). В низкочастотной области (ниже 100 Гц) также видны сигналы, которые будут описаны далее.

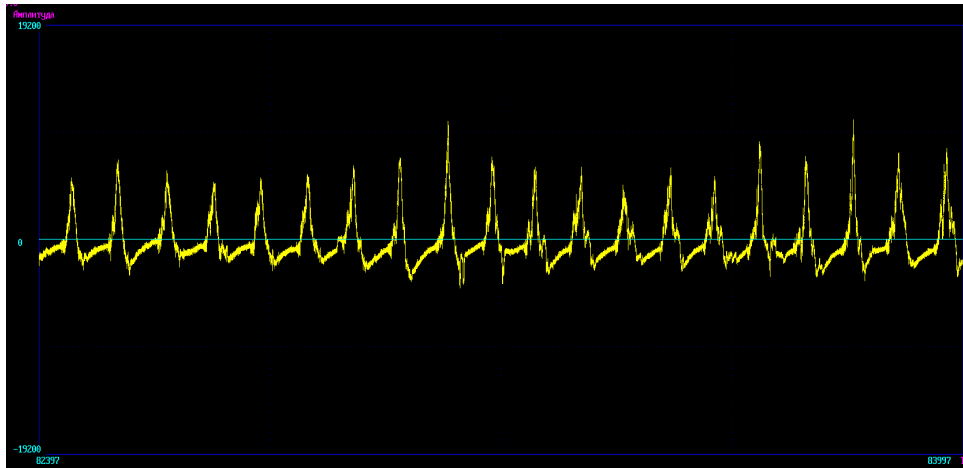


Рис. 3. Миосигнал, снятый с бицепса при многократном сгибании руки в локтевом суставе до угла в 90° без гантели

При сравнении миосигналов, представленных на рис. 1 и 3, можно отметить меньший уровень шума на последнем сигнале. Амплитуда сигналов существенно не отличается. Более того, если на сигналы наложить фильтры нижних частот, то сигналы будут неразличимы. Но сравнение вейвлет-анализов этих сигналов (рис. 2 и 4) дает качественное изменение картины.

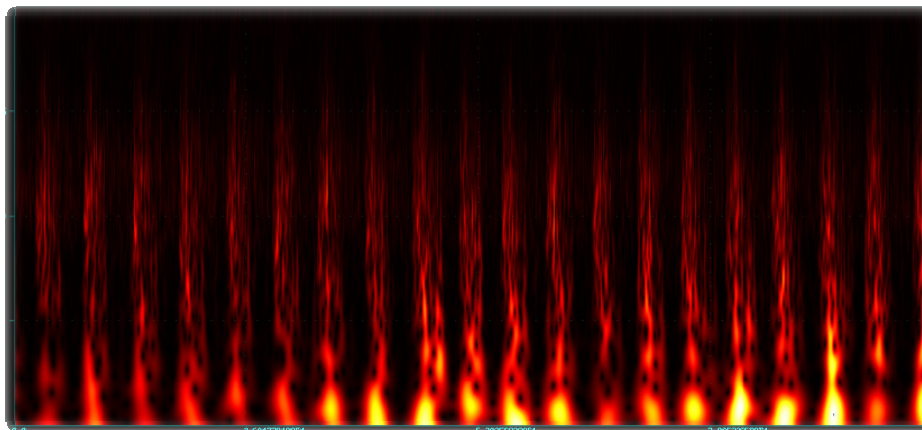


Рис. 4. Вейвлет-преобразование сигнала, представленного на рис. 3

Главное, на что следует обратить внимание, – это отсутствие ярко выраженного максимума на частоте 250 Гц. Ниже 100 Гц частоты имеют одинаковую интенсивность. Сравнение графиков и их спектров позволяет сделать предположение, что низкочастотный сигнал характеризует сигнал к сокращению мышцы, а более высокочастотные компоненты сигнала характеризуют отклик мышц на реальную нагрузку.

Для дальнейшего исследования был проведен опыт со статической нагрузкой бицепса гантелей весом 5 кг (рис. 5).

График миосигнала на рис. 5 похож на белый шум [7]. В центре можно отметить произвольное сокращение мышцы. На рис. 6 приведен вейвлет-анализ миосигнала, представленного на рис. 5.

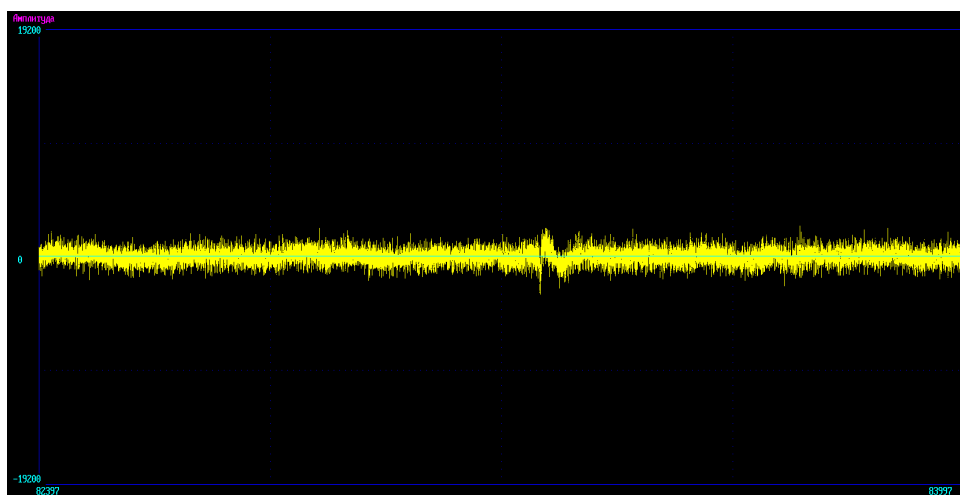


Рис. 5. Миосигнал, снятый с бицепса при статической нагрузке гантелей весом 5 кг

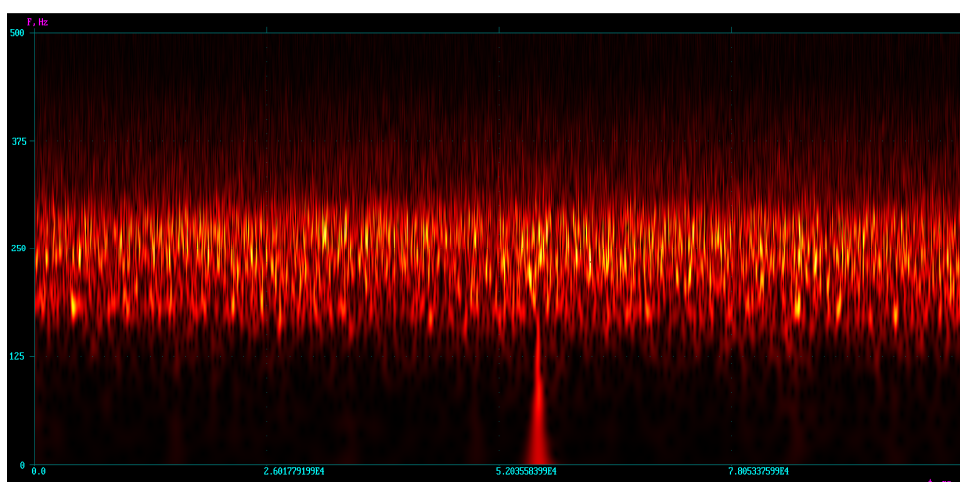


Рис. 6. Вейвлет-преобразование сигнала, представленного на рис. 5

Сравнительный анализ рис. 2 и 6 показывает, что в момент одинаковой нагрузки спектры имеют высокую степень сходства. Просматривается спектральный максимум на частоте близкой к 250 Гц. Таким образом, вид спектра может указывать на величину нагрузки, приложенной к мышцам.

Таким образом, применение модифицированной вейвлет-функции Морле для цифровой обработки миосигналов позволяет по анализу спектров качественно распознать миосигналы, снятые с бицепса в стационарном состоянии и с нагрузкой. В работе показана возможность идентификации сигналов, посланных мозгом от сигналов, ответной реакции мышц на нагрузку. Дальнейшие исследования в этой области с помощью разработанной методики направлены на определение различной нагрузки на разные виды (группы) мышц.

Библиографический список.

1. Физиология человека / под ред. Г. И. Косицкого. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва, 1985. – 544 с.
2. Кобринский, А. Е. Использование биотоков для целей управления / А. Е. Кобринский // Энергетика и автоматика. – 1959. – № 3.
3. Федотов, А. А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга / А. А. Федотов, С. А. Акулов. – Москва : Радио и связь, 2013. – 248 с.
4. Давыдов, А. В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции. – Екатеринбург : УГГУ, ИГиГ, 2007. – URL: <http://www.prodav.narod.ru/dsp/index.html>

5. Потехин, Д. С. Интегральный метод восстановления векторной диаграммы в системах цифровой обработки данных / Д. С. Потехин // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 2.1 (44). – С. 161–164.
6. Потехин, Д. С. Влияние коэффициентов и пределов интегрирования вейвлет-функции Морле на точность результатов анализа гармонических сигналов с нестационарными параметрами / Д. С. Потехин, И. Е. Тарасов, Е. П. Тетерин // Научное приборостроение. – 2002. – № 1, т. 12. – С. 90–95.
7. Потехин, Д. С. Влияние белого шума на точность определения амплитуды и фазы гармонических сигналов с использованием вейвлет-преобразования функцией Морле / Д. С. Потехин // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 4.1 (38). – С. 180–183.

Гришанович Юлия Васильевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Ковровская государственная
технологическая академия им. В. А. Дегтярева
(Россия, г. Ковров, ул. Маяковского, 9)
E-mail: ulagri.kovrov@mail.ru

Grishanovich Yuliya Vasilevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics,
Kovrov State Technological Academy
named after V. A. Degtyarev
(9 Mayakovskogo street, Kovrov, Russia)

Потехин Дмитрий Станиславович

доктор технических наук, профессор,
кафедра корпоративных информационных систем,
Российский технологический университет МИРЭА
(Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78)
E-mail: msyst@msyst.ru

Potehin Dmitry Stanislavovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of corporate informational systems,
Russian Technological University MIREA
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Потехин Сергей Дмитриевич

инженер,
ООО «Бизнес-объединение
Измерительные системы»
(Россия, г. Ковров, ул. Еловая, 92)
E-mail: vexilurz@gmail.com

Potehin Sergey Dmitrievich

engineer,
LLC «Business Association Measuring Systems»
(92, Elovaya street, Kovrov, Russia)

Тарасов Илья Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра корпоративных информационных систем,
Российский технологический университет МИРЭА
(Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78)
E-mail: ilya_e_tarasov@mail.ru

Tarasov Ilya Evgenievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of corporate informational systems,
Russian Technological University MIREA
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Гришанович, Ю. В. Обработка миосигналов методами спектрального анализа с использованием модифицированной вейвлет-функции Морле / Ю. В. Гришанович, Д. С. Потехин, С. Д. Потехин, И. Е. Тарасов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 71–77. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-10.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 612.173; 536.758

DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-11

*О. Н. Бодин, З. И. Баусова, О. Е. Безбородова, А. Г. Убиенных*ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ «КАРДИОВИД»*O. N. Bodin, Z. I. Bausova, O. E. Bezborodova, A. G. Ubiennykh*IMITATION MODELING OF MULTIAGENT TECHNOLOGY
IN COMPUTER DIAGNOSTIC SYSTEM «CARDIOVID»

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является разработка и исследование многоагентной имитационной модели управления процессами в компьютерной диагностической системе для определения эффективности распределения ресурсов медицинских учреждений между пациентами. **Материалы и методы.** Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды в области неинвазивной кардиодиагностики, теории систем массового обслуживания и имитационного моделирования. В ходе исследований проанализированы алгоритмы поведения агентов системы для поиска оптимальных сценариев оказания медицинской помощи. При проведении исследований использовались методы кардиологии, система имитационного моделирования GPSS World. **Результаты.** Проведено имитационное (компьютерное) моделирование работы компьютерной диагностической системы «Кардиовид» с двумя и тремя медицинскими работниками. Из данных с применением аналитической платформы Deductor Studio Academic в кардиологическом отделении выявлены пациенты, которые наиболее всего нуждаются в медицинской помощи. Анализ данных показал, что система будет эффективно работать с тремя медицинскими сотрудниками. **Выводы.** Полученные результаты имитационного моделирования на основе многоагентной технологии позволят повысить эффективность выявления пациентов кардиологического отделения наиболее остро нуждающихся в медицинской помощи.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to develop and study a multiagent simulation model of process control in a computer diagnostic system to determine the efficiency of resource allocation of medical institutions between patients. **Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of the research works made in the field of non-invasive cardio diagnosis, queuing system theory and simulation modeling. The studies analyzed algorithms of the behavior agents of the system were analyzed to find the optimal scenarios for the provision of medical care. In conducting research were used methods cardiology, GPSS World simulation system. **Results.** Simulated (computer) modeling of the computer diagnostic system «Cardiovid» work with two and three medical workers was carried out. From the data using

the analytic platform *Deductor Studio Academic* in the cardiology department, the patients who most need medical care are identified. Data analysis showed that the system will work effectively with three medical workers. **Conclusions.** The results of simulation modeling based on multiagent technology will increase the efficiency of identifying patients of the cardiology department who most need medical care.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многоагентная технология, компьютерная диагностическая система, имитационное моделирование, многоагентная имитационная модель, статистические данные.

Key words: multiagent technology, computer diagnostic system, simulation modeling, multiagent simulation model, statistical data.

Введение

Многоагентная модель – это модель многоагентной системы, состоящей из функциональных элементов, представляющих интеллектуальные агенты (ИА), которые отражают состояние и поведение уровней управления оказания медицинской помощи [1]. При условии изменения состояния одного агента происходит изменение состояния другого агента в системе. Агенты характеризуются параметрами состояния, целей, а также поведением и информационными связями с другими агентами.

Стохастические свойства агентов и процессов функционирования системы «Кардиовид» обуславливает необходимость применения имитационного моделирования для определения эффективности работы системы при заданной структуре и параметрах. Изменяя параметры системы, пациент поступает в отделение. Врач определяет услуги, необходимые для оказания медицинской помощи пациенту, а также временные затраты на диагностику и лечение. Определить допустимые управляющие воздействия позволяет имитационное моделирование, при проведении которого выполняются вычислительные эксперименты с целью выявления влияния отдельных показателей на оказание медицинской помощи [2].

Система «Кардиовид» является системой массового обслуживания, поэтому для определения эффективности работы медицинских работников и параметров очереди за время обслуживания при использовании системы управления процессами необходимы:

- постановка задачи;
- практическое решение поставленной задачи;
- интерпретация результатов.

Уровни агентов

Модели ИА объединяются в многоагентную имитационную модель системы, воспроизводящую динамическое взаимодействие интеллектуальных агентов с возможностью идентификации их состояния и прогнозирования оптимальных сценариев достижения цели. Вся система управления медицинской помощи разделена на ряд функциональных областей, осуществляющих управление в своих сферах деятельности.

Выделяют три уровня агентов:

- 1) стратегический;
- 2) решающий центральный;
- 3) исполнительный (рис. 1).

Обмен данными между агентами разных уровней происходит через интерфейс информационной системы (ИС), а также области разделяемой памяти ИС, обеспечивающей диалоговый режим работы с имитационной моделью. В многоагентной модели система управления медицинской помощи представляется в виде совокупности взаимосвязанных агентов $\{A\}$ $\{A_1, A_2, ..., A_m\}$, описывающих процессы управления медицинской помощи [2].

Принцип работы

В процессе работы медицинский работник заносит в базу данных системы сведения о пациентах. При этом каждому пациенту соответствует список необходимых ему услуг (рис. 2).

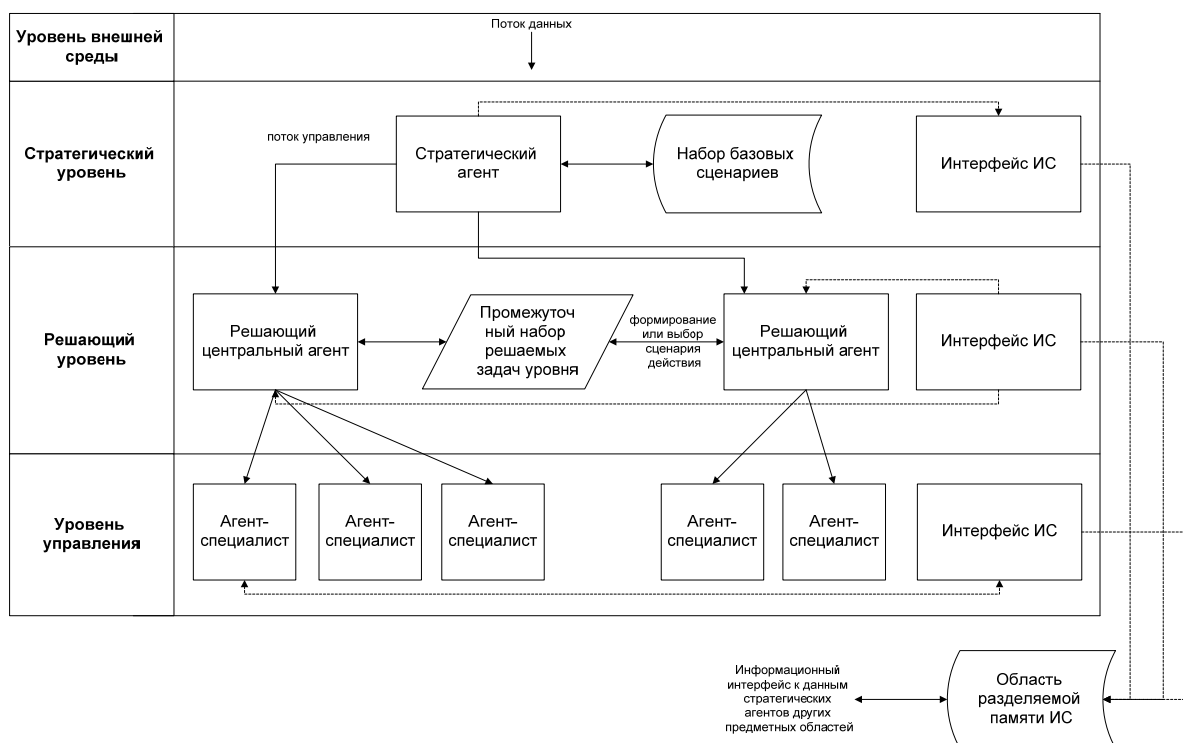


Рис. 1. Архитектура многоагентной системы оказания медицинской помощи

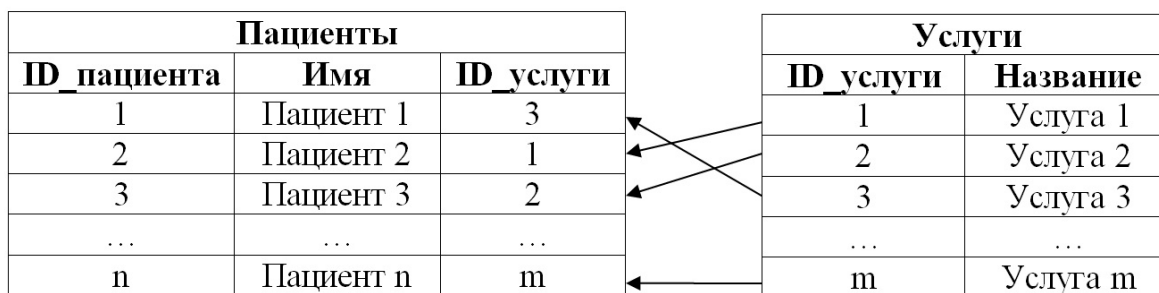


Рис. 2. Структура базы данных

Каждый пациент может нуждаться в одной или нескольких видах услуг. При определенном количестве ресурсов и неограниченном количестве пациентов необходимо оптимально распределить услуги медицинского учреждения между пациентами [1, 2].

Концепция

Имеются пациенты медицинского учреждения, являющиеся агентами системы. Услуги и оборудование медицинского учреждения являются ресурсами системы [3]. В задачи системы входит нахождение соответствия каждому агенту из этих групп: каждому пациенту необходимо оказать медицинскую помощь, основываясь на приоритетности и доступности медицинских услуг, а также оборудования медицинского учреждения. Агенты взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой, образуя систему. При этом окружающая среда оказывает влияние на поведение агентов [3].

Взаимодействие агентов осуществляется на основании установленных правил и исходных данных. В качестве исходных данных задаются сведения о пациентах и необходимых услугах. Таким образом, на вход системы моделирования взаимодействия пациентов и услуг подаются уже сформированные зависимости, определяющие услуги, необходимые конкретному пациенту (рис. 3).

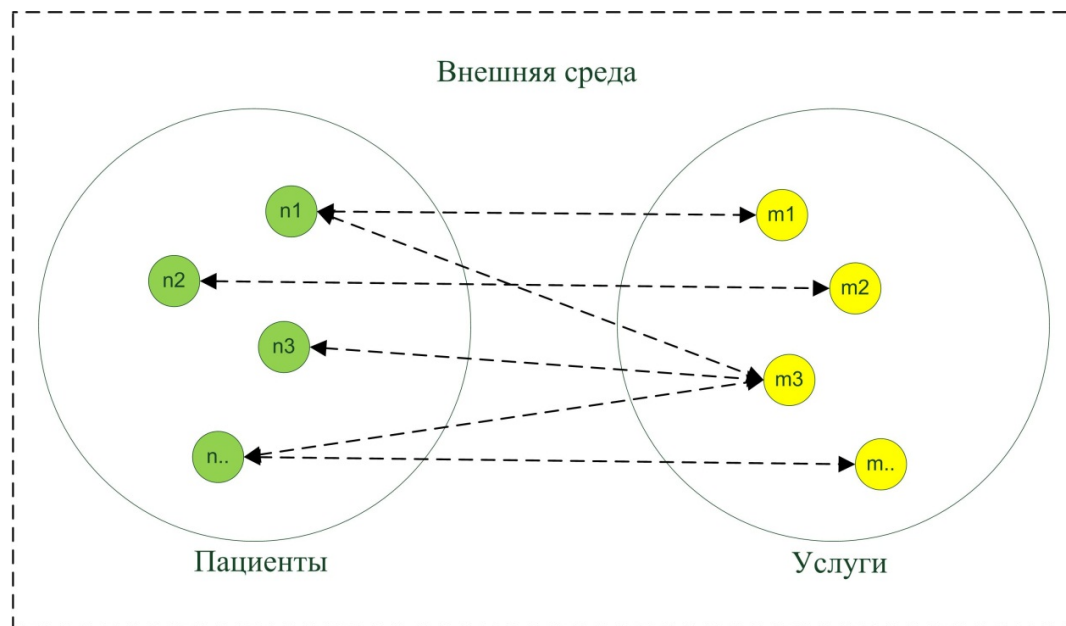


Рис. 3. Представление взаимодействия агентов в подсистеме мониторинга

Первая группа содержит пациентов медицинского учреждения (зеленый цвет), а вторая группа содержит услуги и оборудование медицинского учреждения (желтый цвет). Из рис. 3 видно, что чем больше будет пациентов, нуждающихся в медицинской помощи, тем больше ресурсов будет расходоваться на оказание медицинской помощи, что вызовет нехватку ресурсов медицинского учреждения [5].

Имитационное (компьютерное) моделирование

На данный момент было решено начать процесс моделирования системы с третьего исполнительного уровня (уровень управления) с помощью среды имитационного моделирования *GPSS World*. Данную систему можно рассматривать как многоканальную систему массового обслуживания (СМО), в которой в качестве каналов обслуживания выступают агенты, выполняющие обработку антропометрических данных, снимки флюорографии, оценивающие параметры здоровья пациента и принимающие определенные решения в зависимости от состояния здоровья пациента. Для определения эффективности работы системы необходимо решить задачу анализа со следующей постановкой.

В отделении кардиологии работают медицинские работники, занимающиеся обработкой электрокардиосигналов (ЭКС) и прочих антропометрических данных, передающихся с датчиков на пульт управления КДС «Кардиовид». Датчики проводят периодический мониторинг общего состояния здоровья пациента с предынфарктным состоянием. ЭКС на обработку поступают со средним интервалом 5 мин, при одинаковом уровне приоритета, обслуживаясь в порядке обслуживания «первым пришел – первым обслужился». Время передачи ЭКС распределено по экспоненциальному закону с интервалом времени 10 мин. Задача: определить эффективность работы медицинских работников и параметры очереди за время обслуживания в течение суток при числе медицинских работников 2 и 3 соответственно.

При исследовании системы целесообразно применить метод имитационного (компьютерного) моделирования с реализацией в среде *GPSS World* [6]. Целью моделирования данной системы является определение оптимального количества медицинских работников, при которых система будет работать эффективно.

Моделью исследуемой системы является многоканальное устройство (МКУ), которому присвоено имя *MEDIC*, а очередь необработанных медицинским работником ЭКС выступает с названием *Q SIGNAL*. С помощью блоков *GENERATE* и *TERMINATE* в модели осуществляется соответственно поступление транзактов-электрокардиосигналов, снятых с обследуемых пациентов, и удаление их из модели после обслуживания. За единицу модельного времени принята минута.

В модели воспроизводятся [6]:

- для устранения влияния начального периода (переходного процесса) работы системы на результаты моделирования осуществляется 200 прогонов модели;
- сброс статистики начального периода;
- возобновление моделирования для получения статистики по результатам системы в течение 24-часового периода ее работы;
- переопределение емкости МКУ, подготовка модели к прогону при новом значении емкости МКУ.

Имитацию работы данной системы позволяет произвести последовательность следующих команд: *START*, *RESET*, *START*, *CLEAR*, *STORAGE*, *START*, *RESET*, *START*, *CLEAR*, *STORAGE* и т.д. с необходимыми операндами. Текст программы, написанной на языке *GPSS*, представлен на рис. 4.

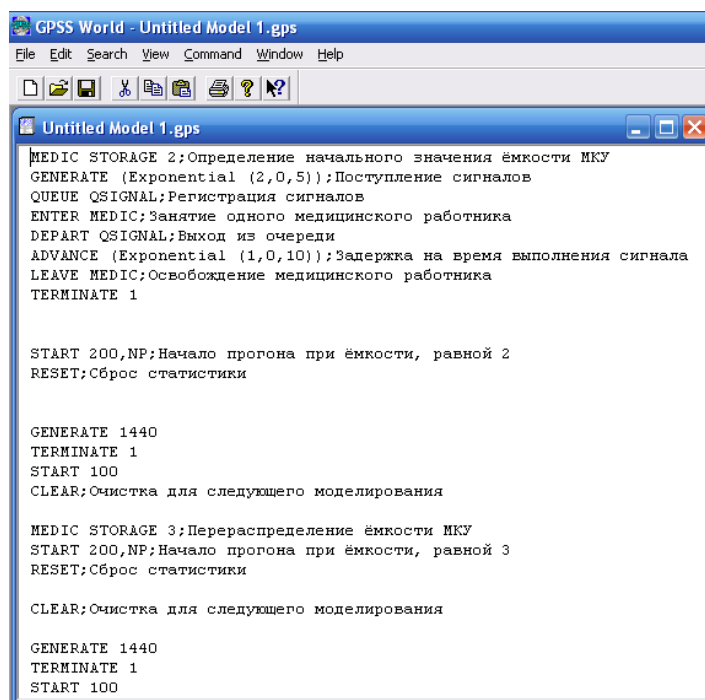


Рис. 4. Программа в среде *GPSS World*

Осуществить отмену формирования отчета за время моделирования (200 прогонов) позволяет запись операнда *NP* в поле *B* команд *START*.

Таблица 1 отражает некоторые результаты моделирования из стандартного отчета, необходимые для решения поставленной задачи.

Таблица 1

Результаты моделирования

Число операторов	Многоканальное устройство MEDIC		Очередь QSIGNA		
	Среднее содержимое	Коэффициент использования	Содержимое		Среднее время/транзакт
			максимальное	среднее	
2	2	1	22	14,213	65,189
3	1,748	0,583	3	0,186	1,029

Из табл. 1 следует, что при числе медицинских работников, равном 2, система справляется с обработкой поступающих ЭКС (максимальная длина очереди больше среднего содержимого МКУ *QSIGNA*), но при возникновении экстренной ситуации время обработки данных неприемлемо. В случае удаления одного из медицинских работников работа системы становится неудовлетворительной. При количестве медицинских работников, равным 3, длина очереди за время моделирования не привысила 3, коэффициент использования системы соста-

вил 0,583. Можно сделать вывод о том, что исследуемая система обладает достаточным запасом надежности.

Также актуальной задачей является выявление в кардиологическом отделении пациентов, особо нуждающихся в медицинской помощи. Для помощи врачу целесообразно применить аналитическую платформу *Deductor Studio Academic* и инструмент «Калькулятор», позволяющий при имеющихся статистических данных определить пациентов со слабым здоровьем [4].

В ходе моделирования был создан текстовый файл с информацией о пациентах. Данные файла изображены на рис. 5.

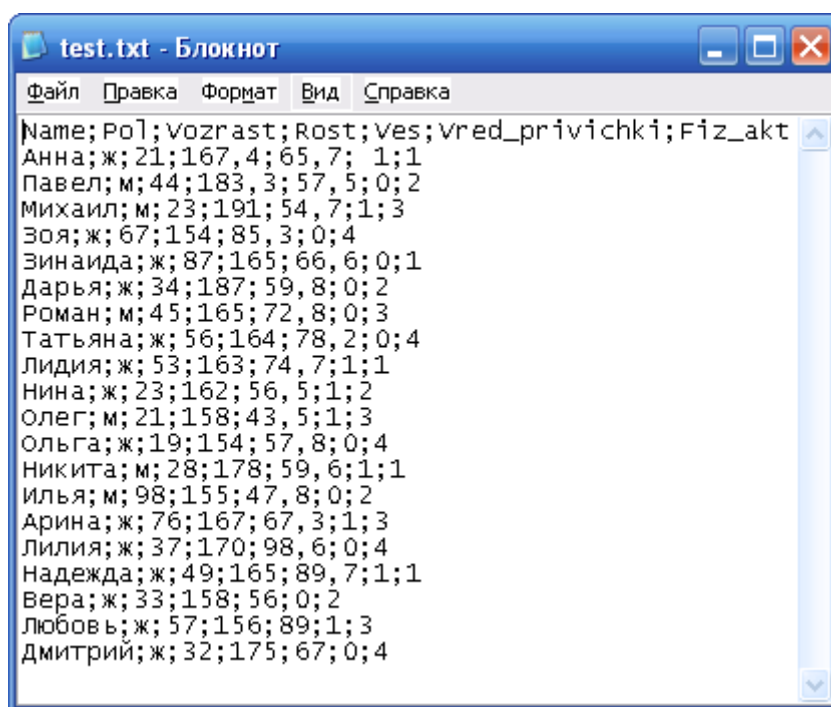


Рис. 5. Файл с данными о пациентах

После загрузки файла в виде сценария, была осуществлена его обработка.

С помощью «Мастера обработки» (рис. 6) был выбран инструмент «Калькулятор», предназначенный для добавления в набор данных новых полей, которые рассчитываются по определенным правилам на основе столбцов данных и встроенных функций [4].

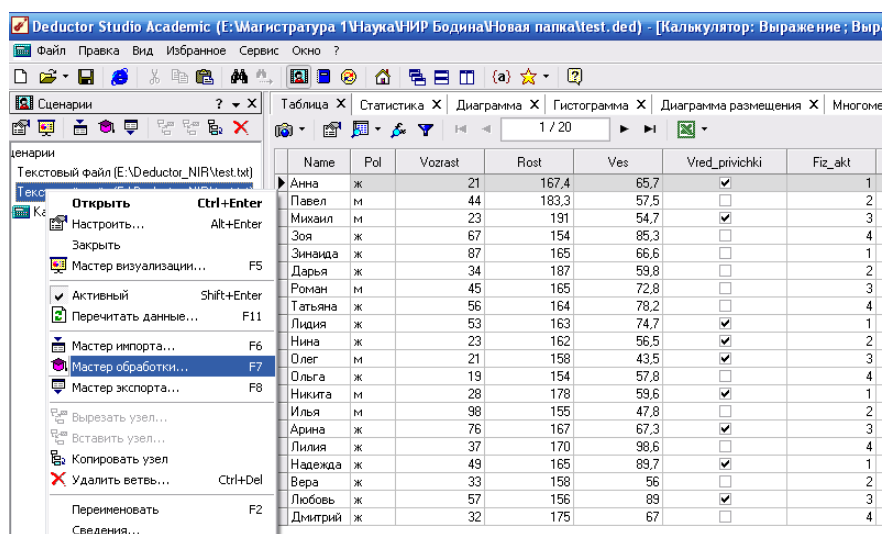


Рис. 6. Выбор «Мастера обработки»

В калькуляторе были заданы выражения для вычисления и отбора данных по конкретным полям таблицы:

- коэффициента избыточного веса, вычисляемый в соответствии со стандартной формулой расчета веса, равной $\text{Вес}/(\text{Рост}/100)^2$, выражение для отбора $\text{Ves}/((\text{Rost}/100)*(\text{Rost}/100))$;
- вредные привычки: если 1, то имеются вредные привычки (значение «Плохой»), если 0, то нет вредных привычек (значение «Хороший»), выражение для отбора $\text{IF}(\text{Vred_privichki} = 1; \text{“ПЛОХОЙ”}; \text{“ХОРОШИЙ”})$;
- для выявления пациентов с избыточным весом задано условие: если коэффициент избыточного веса больше 25, то пациент «плохой» и имеет избыточный вес, выражение для отбора $\text{IF}(\text{EXPR} > 25; \text{“ПЛОХОЙ”}; \text{“ХОРОШИЙ”})$;
- условие: если физическая активность отсутствует, то значение «Плохой», если наоборот – значение «Хороший», выражение для отбора $\text{IF}((\text{Fiz_akt} > 2); \text{“ПЛОХОЙ”}; \text{“ХОРОШИЙ”})$;
- итоговое условие: если все ранее рассчитанные значения равны «Плохой», то на данного пациента стоит обратить внимание.

Выражение итогового условия выглядит следующим образом: $\text{IF} ((\text{EXPR}_1 = \text{«Плохой»}) \text{ and } (\text{EXPR}_2 = \text{«Плохой»}) \text{ and } (\text{EXPR}_3 = \text{«Плохой»}); \text{«Плохой»}; \text{«Хороший»})$.

Тип данных выражений «Строковый». В следующем окне «Способ отображения» были выбраны «Таблица» и «Статистика». С помощью визуализатора «Статистика» можно увидеть, что имеется 2 «Плохих» пациента в группе риска, что составляет 10 % всех пациентов и имеется 18 «Хороших» пациентов, что составляет 90 % всех пациентов.

Для проверки правильности классификации был выбран мастер обработки «Логистическая регрессия». Таблица сопряженности, полученная в результате применения «Логистической регрессии», показывает, что все пациенты из группы риска были классифицированы верно (100 %) (рис. 7). Этот результат совпадает с вычисленным ранее с помощью инструмента «Калькулятор».

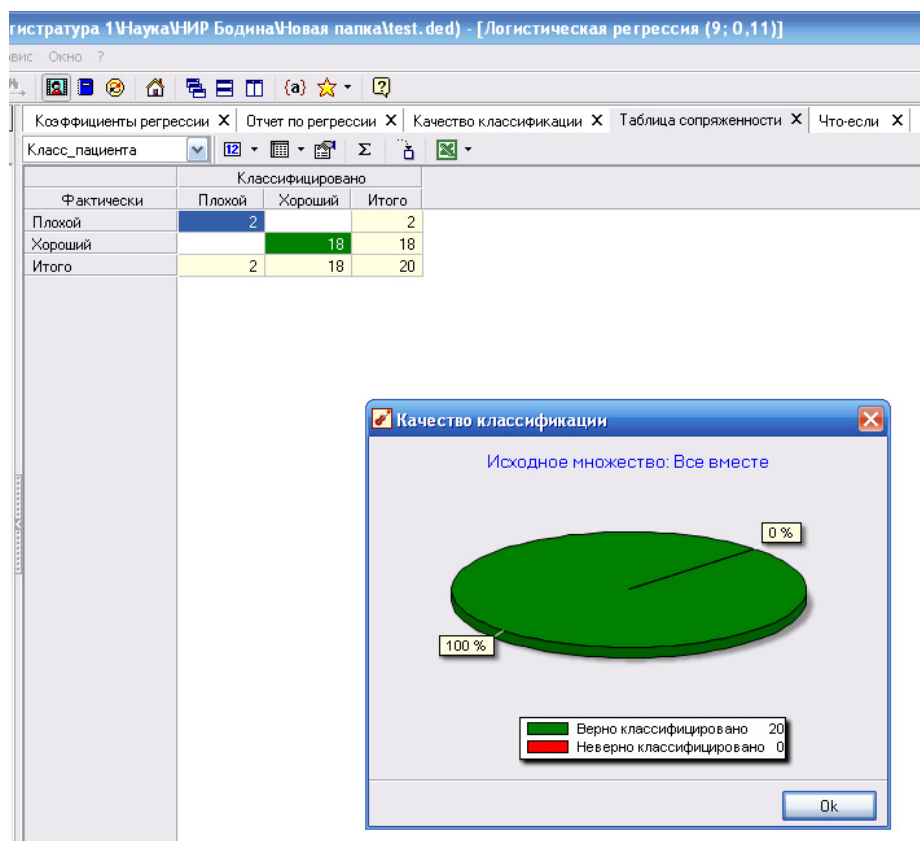


Рис. 7. Таблица сопряженности

Заключение

Задача многоагентной системы заключается в нахождении соответствия и взаимодействия между группами агентов, при этом важнейшим принципом является приоритет очередности оказания медицинской помощи конкретному пациенту. Это является актуальной задачей в силу ограниченности ресурсов медицинского учреждения и возможного неограниченного потока пациентов.

Предлагаемая подсистема позволит эффективно распределять ресурсы медицинского учреждения между пациентами, проходящими процедуру мониторинга.

В результате применения многоагентных технологий для реализации подсистемы мониторинга повысится качество оказания медицинской помощи за счет эффективного распределения ресурсов медицинского учреждения между пациентами.

Процесс моделирования был проведен на третьем (исполнительном) уровне с помощью программной среды *GPSS World*, так как для планирования эксплуатации многоагентной подсистемы мониторинга требовалось определить оптимальное количество сотрудников медицинского учреждения и эффективность использования их рабочего времени. В результате проведенного имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что для эффективной работы медицинских работников при возникновении критических ситуаций и наиболее быстрого реагирования на сигналы системы, стоит предусмотреть расширение штата для выполнения данной работы. Анализ данных показал, что система будет эффективно работать с тремя сотрудниками. Благодаря быстрому и своевременному реагированию на сигналы системы и их интерпретированию возрастет возможность снизить смертность от инфаркта миокарда.

В ходе аналитической обработки данных с помощью платформы *Deductor Studio Academic* был проведен отбор пациентов с наиболее слабыми физическими характеристиками здоровья. Благодаря этому врач сможет определить, кому из пациентов необходимо оказывать медицинскую помощь в первую очередь.

Библиографический список

1. Городецкий, В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. Модели многоагентной самоорганизации / В. И. Городецкий // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.
2. Городецкий, В. И. Инструментальные средства для открытых сетей агентов / В. И. Городецкий, О. В. Карсаев, В. В. Самойлов, С. В. Серебряков // Известия РАН. Теория и Системы Управления. – 2008. – № 3. – С. 106–124.
3. Старикова, А. Ю. К вопросу применения имитационного моделирования для управления интеллектуальной собственностью / А. Ю. Старикова, З. И. Баусова, Э. Ф. Шадрина // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2015) : сб. науч. ст. XII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 264–265.
4. Шадрина, Э. Ф. Оценка эффективности работы системы контроля и учета результатов интеллектуальной деятельности / Э. Ф. Шадрина, З. И. Баусова, А. Ю. Старикова // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. III Ежегодной межвуз. студен. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 147–149.
5. Distributed Computer Diagnostic System KardioVid on the Base of the Multi-Agent Technologies / O. N. Bodin, A. G. Ubiennykh, A. S. Sergeenkov, S. A. Balakhonova, F. K. Rakhmatullov, K. A. Ozhikenov // 18th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017 (Novosibirsk, 29 June – 3 July 2017). – Novosibirsk, 2017. – P. 610–612.
6. Сергеенков, А. С. Применение многоагентных технологий для реализации подсистемы мониторинга пациентов / А. С. Сергеенков // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2016) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С. А. Прохорова. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. – С. 592–595.

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительная техника и метрология,
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)

Баусова Зоя Ивановна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-
вычислительные системы,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40),
E-mail: bausovazoya@mail.ru

Безбородова Оксана Евгеньевна

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

Убиенных Анатолий Геннадьевич

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

Bausova Zoya Ivanovna

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

Bezborodova Oksana Evgen'evna

candidate of technical sciences,
associate professor, sub-department
of technosphere safety,
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)

Образец цитирования:

Бодин, О. Н. Имитационное моделирование многоагентной технологии в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» / О. Н. Бодин, З. И. Баусова, О. Е. Безбородова, А. Г. Убиенных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 78–86. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-11.

А. В. Кузьмин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИПОЛЬНЫХ МОМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕРДЦА С МОДИФИКАЦИЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ¹

A. V. Kuzmin

DIPOLE MOMENTS ESTIMATION FOR MODELING OF ELECTRICAL ACTIVITY OF HEART WITH MODIFICATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью настоящего исследования является разработка способа динамического изменения геометрических параметров трехмерной модели в процессе моделирования электрической активности сердца с использованием многодипольной модели эквивалентного электрического генератора сердца, предложенной Л. И. Титомиром, и электрокардиографических данных. *Материалы и методы.* Теоретическую и методологическую основу исследования представляют фундаментальные труды в области эквивалентного электрического генератора сердца и взаимосвязи электрофизиологических характеристик сердца. В работе используются трехмерные модели на основе опорных точек, схематично представляющие сердце и расположение диполей, при этом используются методы геометрического моделирования. Для определения моментальных значений электрофизиологических параметров при решении систем линейных алгебраических уравнений СЛАУ используются численные методы. *Результаты.* В первой части работы предложен и описан способ динамического изменения геометрических параметров модели сердца на основе электрокардиографических данных. Представлен процесс получения параметров многодипольной модели эквивалентного электрического генератора сердца. Определены ограничения на значения параметров, которые необходимо учитывать в процессе решения для сохранения физического смысла и корректности полученных результатов. Выполнен численный эксперимент с использованием реальных исходных данных и схематичной трехмерной модели пространственного расположения диполей, который показал возможность решения поставленной задачи. Приведены результаты вычислительного эксперимента. *Выводы.* Приведена последовательность этапов модификации геометрических параметров модели сердца, раскрыт этап получения значения дипольных моментов модели, проведен соответствующий вычислительный эксперимент. Результаты исследования позволяют разработать способ динамического изменения геометрических параметров трехмерной модели сердца для использования в качестве программного компонента систем неинвазивной диагностики и симуляционного обучения.

¹ Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (мероприятие «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными, номер проекта 17-71-20029).

A b s t r a c t. Background. The aim of this research is the development of method of dynamic modification of heart 3D model geometrical parameters during the process of electrical activity of heart on the base of multi-dipole model of equivalent electric generator of heart proposed by L.I. Titomir and non-invasive electrocardiographic data. **Materials and methods.** Theoretical and methodological base of the investigation consists of fundamental works in the areas of equivalent electrical generator of the heart and interrelation of electrocardiographic parameters of heart. 3D models methods based on reference points that schematically represent heart and spatial location of dipoles and geometrical modeling methods in general are used in the research. Numerical methods of solving linear algebraic equations systems are used for estimation of instant values of electrophysiological parameters of heart. **Results.** In the first part of the work the method of dynamic modification of geometrical parameters of model of heart on the base of electrocardiographical data is proposed and described. The process of estimating the parameters of multi-dipole model of equivalent electrical generator of heart is presented. The author determined the limitations of values of parameters that should be taken into account to keep physical meaning and correctness of the results. Computational experiment with real input data and schematic 3D model of dipole spatial location showed the possibility of solving the task. The results of the computational experiment and values are presented. **Conclusions.** In the paper a sequence of steps of modification of geometric model of heart is proposed, the step of estimation of values of dipole moments is experimentally demonstrated. The results allow developing the method of dynamic modification of geometric model of heart for application as a part of software component of non-invasive diagnostic and simulation training systems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая активность сердца, дипольные моменты, многодипольная модель, трехмерная модель сердца.

K e y w o r d s: electrical activity of a heart, dipole moments, multi-dipole model, 3D model of a heart.

Введение

Сердце человека представляет собой один из наиболее интересных объектов для исследования со стороны разных наук. Этот интерес продиктован и практическими соображениями: значительной распространенностью заболеваний сердечно-сосудистой системы, приводящих к потере трудоспособности, а также важнейшей ролью сердца в организме человека.

Что касается задач диагностики, то до сих пор не теряет своей актуальности электрокардиография – наиболее распространенный метод неинвазивной оценки работы сердца. Однако на данном этапе развития информационно-измерительной техники задачи диагностики не сводятся к применению какого-либо метода анализа электрокардиосигнала (ЭКС), например, амплитудно-временного или нейросетевого. Актуальной является задача моделирования электрической активности сердца (ЭАС) на основе неинвазивно полученных электрокардиографических данных [1].

Одной из реализаций такого подхода является программная система «Дэкарто» [2], предназначенная для топической диагностики. В результате работы системы на основе ЭКГ вычисляются параметры ЭАС. Геометрические характеристики сердца определяются шаром, описанным вокруг сердца, и представляют статичную модель.

Моделирование ЭАС востребовано не только в области диагностики, но и в области симуляционного обучения. В качестве примера можно привести программную систему моделирования и визуализации сердца ECGSim [3]. Она предназначена для изучения ЭАС и моделирования распределения электрических потенциалов по желудочкам сердца, по торсу, а также ЭКГ в произвольных точках. Используются упрощенные статические трехмерные модели сердца и торса.

При этом электрическая активность сердца неразрывно связана с изменением его геометрических параметров [4]. Таким образом, моделирование электрической активности сердца с учетом динамического изменения параметров геометрической модели является актуальной и

востребованной задачей. Ее решение позволит разрабатывать диагностические информационно-измерительные системы для стационарного и мобильного использования для мониторинга работы сердца в повседневном режиме широким кругом пользователей, программные и аппаратно-программные системы для симуляционного обучения [5].

Описание модели ЭАС с динамической составляющей

В качестве основы в данном исследовании использована многодипольная модель ЭАС, разработанная Л. И. Титомиром [6]. Выбор продиктован возможностью ее использования для решения обратной задачи электрокардиографии и присутствием в уравнениях в явном виде геометрических параметров, определяемых взаимным пространственным положением поверхностей сердца и торса. Это необходимо для реализации динамического изменения геометрических параметров модели сердца.

Многодипольная модель эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС) связывает потенциал в точке отведения на поверхности торса с параметрами диполей, расположенных на поверхности сердца уравнением [6]

$$\phi_j(t) = \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^I \frac{\cos \alpha_{ji}}{r_{ji}^2} D_i(t), \quad j=1 \dots N, \quad (1)$$

где $\phi_j(t)$, В – потенциал в точке измерения j ; ρ , Ом·м – среднее удельное сопротивление тела; α_{ji} – угол между вектором дипольного момента D_i и прямой, соединяющей j точку отведения с i диполем сердца; r_{ji} , м – расстояние от i диполя до j точки отведений; $D_i(t)$, А·м – дипольный момент i диполя модели сердца ($i = 1 \dots I$) в момент времени t ; I – количество диполей модели сердца; N – количество точек измерения.

Присутствующие в выражении (1) угол α_{ji} и расстояние r_{ji} вычисляются методами аналитической геометрии из трехмерных представлений моделей сердца и торса. Причем достаточно иметь поверхностные модели этих объектов. Предполагается, что эти геометрические модели статичны и параметры, связанные с геометрией, не изменяются в ходе расчета.

В данном исследовании в качестве моделей приняты модели, имеющие простую геометрическую форму и организованные сходным образом (рис. 1): геометрический центр располагается в начале координат; число вершин – 12; трехуровневая структура (по оси y) с 4 вершинами на каждом уровне. В вершинах всех тестовых моделей располагаются диполи, имеющие дипольные моменты $D_1 \dots D_{12}$, вектор дипольного момента соответствует нормали в рассматриваемой точке. Такие модели рассматривались в работах [7, 8] для определения геометрического места точек, в которых расположены диполи на поверхности сердца.

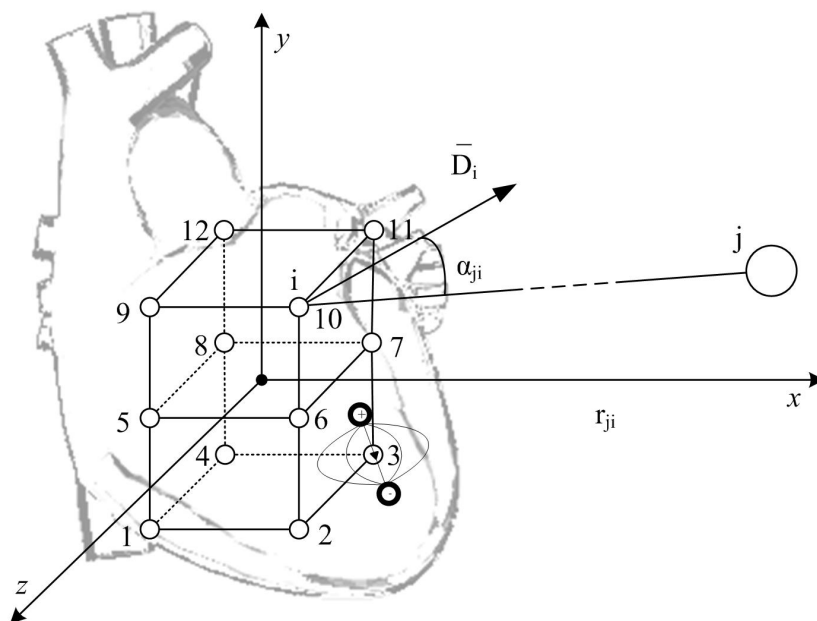


Рис. 1. Пример схематического расположения диполей и точки отведения

Для получения параметров ЭАС сердца с использованием многодипольной модели требуется решить обратную задачу по отношению к выражению (1). В этом случае для каждого временного отсчета t набора определяются значения дипольных моментов путем решения СЛАУ [7] с учетом набора соответствующих углов α и расстояний r . Левая часть СЛАУ представлена вектором значений потенциалов в точках на поверхности тела в момент времени t , т.е. $ECS(t)$. Значения дипольных моментов в момент времени t есть функция от зарегистрированных потенциалов в этот же момент времени, углов и расстояний [5]:

$$D(t) = f(ECS(t), \alpha, r), \quad (2)$$

где α – массив углов α_{ji} ; r – массив расстояний r_{ji} ; $D(t)$ – массив дипольных моментов D_i , рассчитанных для момента времени t .

Параметры α и r являются статичными на всем анализируемом временном отрезке. С концептуальной точки зрения реализация динамического изменения геометрических параметров модели требует перехода к выражению [3]

$$D(t) = f(ECS(t), \alpha(t), r(t)). \quad (3)$$

Выражение (3) описывает моделирование ЭАС с динамическим изменением геометрических параметров в общем виде.

Динамическое изменения геометрических параметров модели.

Алгоритм моделирования ЭАС с динамическим изменением геометрических параметров геометрической модели приведен на рис. 2. Этапы 1–4 являются предварительными и выполняются в параллельном режиме один раз перед началом исследования.

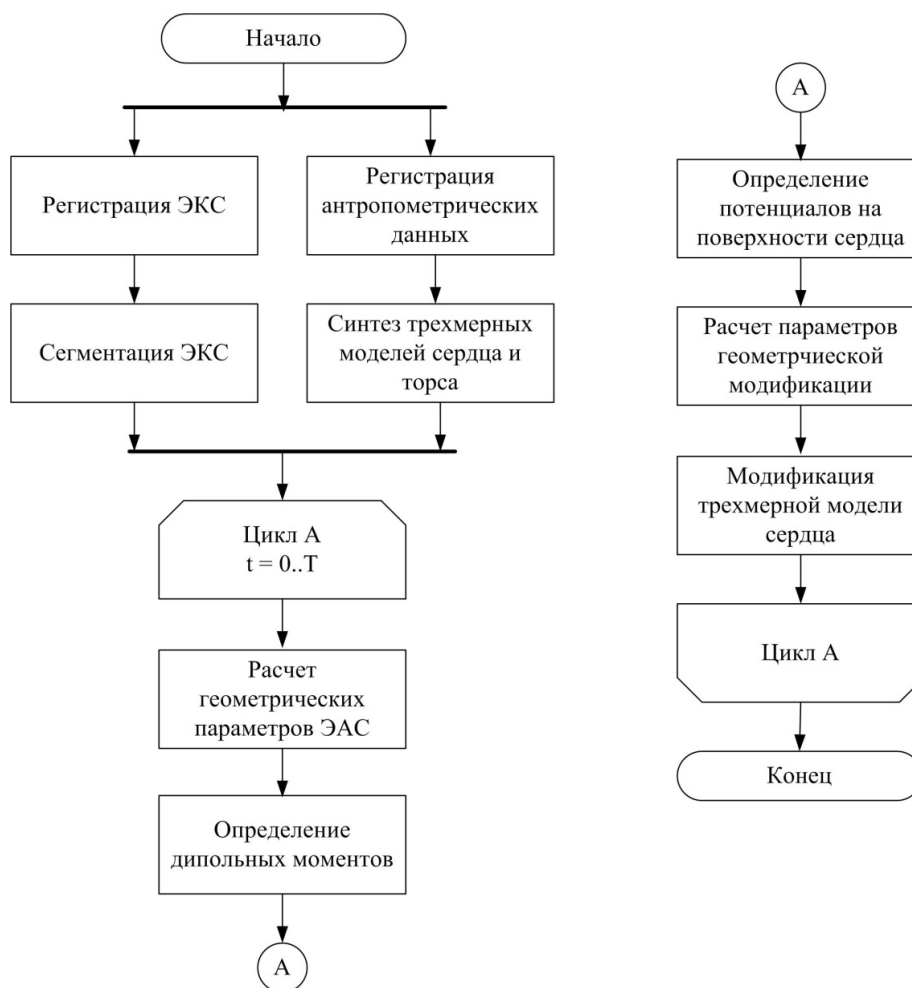


Рис. 2. Алгоритм модификации геометрических параметров модели сердца

Регистрация ЭКС выполняется с использованием цифрового электрокардиографа с использованием системы отведений ЭКГ-12, хотя могут использоваться и альтернативные системы отведений.

Сегментация ЭКС выполняется известными средствами [9], целью этого этапа является выделение основных элементов ЭКГ на оси времени t .

Регистрация антропометрических данных может выполняться с использованием способа [10]. В результате должны быть получены геометрические параметры моделей сердца и торса, соответствующие индивидуальным особенностям.

В соответствии с полученными индивидуальными геометрическими параметрами синтезируются поверхностные модели сердца и торса пациента, при этом могут использоваться модели, основанные на опорных точках, например, полученные с помощью триангуляции Делоне. Эти модели соответствуют антропометрическим данным человека.

Следующие шаги 5–9 (см. рис. 2) выполняются в цикле с единичным шагом для каждого временного отсчета ЭКС t от 0 до T , где T – максимальный номер отсчета. В данном исследовании используется один кардиоцикл, который разбит на 100 отсчетов.

Расчет геометрических параметров модели ЭАС (блок 5 на рис. 2) включает расчет параметров $\alpha(t)$ и $r(t)$ на основе геометрических моделей сердца и торса, соответствующих текущему состоянию на момент времени t .

Определение дипольных моментов (блок 6 на рис. 2) выполняется путем решения СЛАУ [7, 8] в соответствии с многодипольной моделью ЭАС. Затем осуществляется переход от дипольных моментов к потенциалам участков поверхности сердца (блок 7 на рис. 2), которые отражают активность клеток миокарда [11]. На основе этих данных рассчитываются параметры геометрической модели сердца и выполняется ее модификация (блок 8, 9 на рис. 2).

Далее операция расчета геометрических параметров модели ЭАС повторяется с учетом модификации геометрической модели для нового момента времени $t = t + 1$. После чего повторяются остальные шаги расчета.

Получение значений дипольных моментов

Для определения дипольных моментов модели в каждый момент времени t требуется решить СЛАУ, правую часть которой составляют дипольные моменты D_1 – D_{12} , а левую часть – зарегистрированные на поверхности тела потенциалы ϕ_1 – ϕ_{12} (см. рис. 1). В случае соблюдения требований к моделям можно получить совместную систему, решаемую матричным способом [8]. Такое решение в виде набора дипольных моментов будет вполне адекватно отражать общую электрическую активность сердца относительно удаленных точек на поверхности грудной клетки. Если ставится цель использования этих значений для расчета локальных изменений геометрической модели сердца, то следует учитывать физиологический аспект процесса.

Известны данные об электрической активности анатомических отделов сердца в различные фазы кардиоцикла [12]. Фазы активности предсердий и желудочков схематично приведены на рис. 3. Кардиоцикл схематично разделен на основных семь фаз (см. рис. 3), соответствующих состоянию деполяризации, реполяризации и покоя предсердий и желудочков.

Таким образом, до начала расчетов дипольных моментов имеется некоторая априорная информация о них, определяемая физиологией активности миокарда. Предлагается учитывать эту информацию в виде ограничений при решении сформированной СЛАУ [7, 8].

Одним из допущений является то, что за состояние покоя принимается нулевое значение дипольного момента. Следуя схеме, приведенной на рис. 1, диполи D_9 – D_{12} отражают электрическую активность предсердий, диполи D_1 – D_8 – желудочков. Это разделение весьма условное, но необходимое для проведения соответствующих вычислительных экспериментов. Использование 8 диполей для моделирования электрической активности желудочков и 4 для предсердий объясняется тем, что, как правило, электрическая активность желудочков представляет больший интерес для целей диагностики и обучения. В системе ECGSim [2] предсердия вообще не рассматриваются.

Следуя принятым допущениям в фазы 1–3 (см. рис. 3), желудочки считаются не активными, а следовательно, соответствующие дипольные моменты необходимо считать нулевыми. В фазы 5–7 дипольные моменты, относящиеся к участкам предсердий, необходимо считать нулевыми.

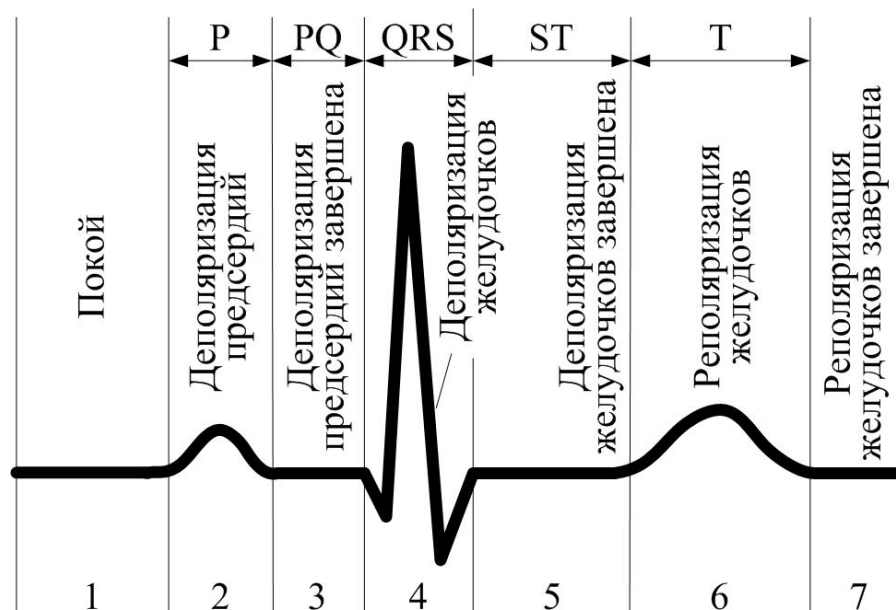


Рис. 3. Фазы сегментации ЭКГ

Эти ограничения должны быть учтены при решении СЛАУ, которая записывается и решается в матричном виде. При этом каждая строка – это уравнение, определяющее наблюдаемый потенциал в одной определенной точке отведения на поверхности тела, а каждый столбец – это вклад одного определенного диполя в формирование наблюдаемого потенциала.

В соответствии с условиями эксперимента сформирована система, представленная квадратной матрицей 12×12 элементов [8]. Чтобы задать заранее известные нулевые значения дипольных моментов, столбцы, соответствующие им, необходимо удалить. В результате этого матрица из квадратной превращается в прямоугольную, причем число уравнений превышает число неизвестных. Такие системы относятся к переопределенным и не могут быть решены стандартным способом, например матричным [13].

Одним из решений такой системы может быть сокращение числа уравнений на столько, сколько было удалено столбцов из матрицы. В результате можно будет применить простейший матричный метод и получить точные решения для тех уравнений, которые остались в системе. Случае проверки полученных решений для исходной системы может наблюдаться значительная погрешность при расчете потенциалов в рассматриваемых точках. Это объясняется удалением из внимания части важной информации об имеющихся в системе связях и закономерностях в виде уравнений, связывающих диполи модели ЭАС и регистрируемые потенциалы в точках отведений.

Другим вариантом, позволяющим избежать удаления важных условий из СЛАУ, является применение какого-либо метода, позволяющего найти из множества решений наиболее подходящее решение по заданному критерию. Одним из таких методов, применимых в данной ситуации, является метод наименьших квадратов, основанный на минимизации квадрата невязки между левыми и правыми частями уравнений [13]. Недостатком является то, что он позволяет найти «псевдорешение», наилучшим образом соответствующее заданным условиям с учетом ограничений по числу итераций и целевому значению погрешности.

Предложенные варианты решения рассмотрены в данной работе в ходе вычислительных экспериментов в среде Matlab с использованием реальных ЭКС. Результаты приведены на рис. 4.

На рис. 4 приведен один кардиоцикл ЭКС отведения v_6 . Данное отведение было выбрано, так как уравнение этого отведения при решении СЛАУ методом сокращения системы было удалено. В данном отведении наблюдаются недопустимые погрешности. В других отведениях ЭКС был восстановлен без погрешности. Метод наименьших квадратов позволил получить решения для всех отведений с допустимой на практике погрешностью. В данном случае максимальное значение абсолютной погрешности $\Delta_{\max} = 0,025$, среднеквадратическое отклонение $S = 0,0224$. Это позволяет для решения поставленной задачи выбрать метод наименьших квадратов.

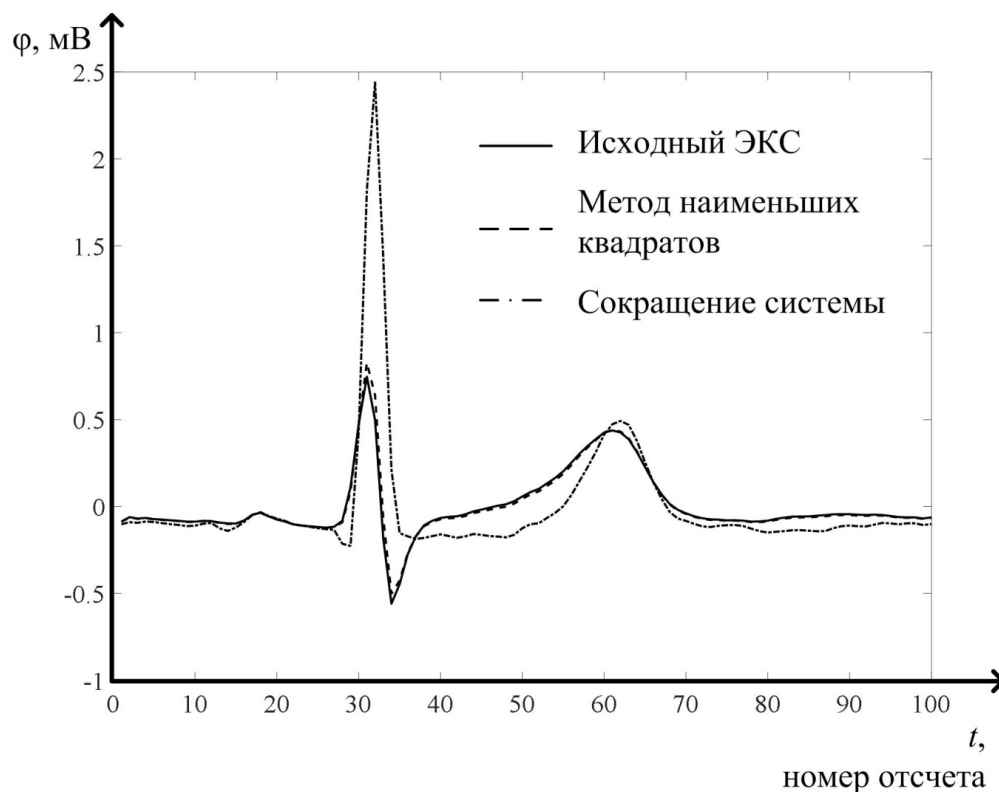


Рис. 4. Результаты восстановления кардиоцикла ЭКС

Заключение

Предложен алгоритм моделирования ЭАС с модификацией геометрических параметров модели. Рассмотрен важный этап получения дипольных моментов модели ЭАС с использованием матричного метода и метода наименьших квадратов. Результаты вычислительного эксперимента показывают возможность решения с помощью метода наименьших квадратов с допустимой для практики погрешностью $\Delta_{\max} = 0,025$.

Библиографический список

1. Для диагностики будущего // Наука Урала. – 2004. – № 25. – С. 4. – URL: http://www3.uran.ru/gazetanu/2004/10/nu25/nu_252004.pdf (дата обращения: 15.01.2019).
2. Официальный сайт проекта ECGSim. – URL: <http://www.ecgsim.org> (дата обращения: 15.01.2018).
3. Mateasik, A. DECARTO – a tool for superposition of functional and structural characteristics of the heart / A. Mateasik, L. Bacharova, J. Kniz, L. I. Titomir // Biomedizinische Technik. – 2001. – Вып. 46, № 2. – С. 79–81.
4. Титомир, Л. И. Электрический генератор сердца / Л. И. Титомир. – Москва : Наука, 1980. – 371 с.
5. Кузьмин, А. В. Анализ и моделирование электрической активности сердца с динамическим изменением геометрических параметров модели / А. В. Кузьмин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 1 (63). – С. 95–102.
6. Титомир, Л. И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука ; Физматлит, 1999. – 447 с.
7. Митрохина, Н. Ю. Анализ электрической активности сердца с использованием геометрических параметров / Н. Ю. Митрохина, А. В. Кузьмин, Е. В. Петрунина // Медицинская техника. – 2013. – № 6. – С. 38–41.
8. Кузьмин, А. В. Исследование влияния геометрических параметров модели на ошибку определения параметров электрической активности сердца / А. В. Кузьмин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 4. – 103–112.

9. *Clifford, G.* Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis / G. Clifford, F. Azuaje, P. McSharry. – Norwood : Artech House, 2006. – 384 с.
10. Пат. 2639018 Российская Федерация. Способ автоматического определения геометрических параметров сердца и торса пациента по флюорографическим снимкам и их визуализации / Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Левашов И. А., Ожигенов К. А., Сергеев А. С. ; заявл. 17.05.2016 ; опубл. 19.12.2017, Бюл. № 35.
11. *Полосин, В. Г.* Система стохастического мониторинга состояния электрофизиологических характеристик сердца на основе энтропийно-параметрического анализа : дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.17 / Полосин В. Г. – Пенза, 2017. – 368 с.
12. *Плонси, Р.* Биоэлектричество. Количественный подход : пер. с англ. / Р. Плонси, Р. Барр ; под ред. чл.-корр. АН СССР Л. М. Чайлахяна и проф. Л. И. Титомира. – Москва : Мир, 1991. – 366 с.
13. *Шевцов, Г. С.* Линейная алгебра: теория и прикладные аспекты : учеб. пособие / Г. С. Шевцов. – Москва : Финансы и статистика, 2003. – 576 с.

Кузьмин Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Kuz'min Andrey Viktorovich

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

Образец цитирования:

Кузьмин, А. В. Определение дипольных моментов при моделировании электрической активности сердца с модификацией геометрических параметров / А. В. Кузьмин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 87–94. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-12.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 531.7.08

DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-13

Б. А. Свистунов, А. Ф. Зубков, Ю. С. Гусынина

МЕТОД ВЫБОРА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА ЭНТРОПИИ

B. L. Svistunov, A. F. Zubkov, Y. S. Gusynina

METHOD OF SELECTING THE DENSITY OF DISTRIBUTION OF A RANDOM VALUE OF EVALUATING THE VALUE OF THE MEASUREMENT RESULT ON THE BASIS OF THE PRINCIPLE OF THE MAXIMUM OF ENTROPY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается задача получения в результате измерительного эксперимента действительных оценок физических величин. **Материалы и методы.** Результатом измерительного эксперимента является получение оценок действительных значений физических величин. Показателем степени доверия к полученным оценкам является погрешность их определения. Достоверность оценки погрешностей определяют на основе теории вероятностей и математической статистики. Это дает возможность для каждого конкретного случая выбирать средства и методы измерений, обеспечивающие получение результата, с погрешностью, не превышающей заданных границ с необходимой достоверностью. Задание неопределенности в виде n -мерной доверительной области, которая включает действительные значения определяемых в ходе эксперимента величин z_i с некоторым уровнем значимости $1-\alpha$, требует знания распределения вероятностей переменных z_i . **Результаты.** Во многих случаях достаточно сложно предложить гипотезу о распределении оценки z_i . Обоснованным является предположение о распределении оценки результатов измерений на основе использования нормального закона распределения, что формулируется на основе выводов центральной предельной теоремы. В этом случае представляется естественным рассматривать n -мерный эллипсоид E как доверительную область, внутри которой лежит действительное значение определяемых в ходе эксперимента величин. В реальных условиях при небольшом n предположение о нормальном распределении может не выполняться; в этих случаях предложено выдвигать другую гипотезу о плотности распределения оценки Z . Предположение о распределении $f(z)$ заменяется условием, для которого нормальное распределение имеет максимальную энтропию. **Выводы.** При выборе подходящего распределения в вычис-

лении оптимального значения уровня значимости Z рассматривается принцип максимума энтропии. В решении задачи используются стандартные математические преобразования, позволяющие определить число n и оптимальные значения уровня значимости $1 - \alpha_0 = f(n)$. Предельный случай больших n может быть успешно использован в описании функциональных зависимостей.

A b s t r a c t. Background. In this paper, we consider the problem of obtaining, as a result of the measurement experiment, real estimates of physical quantities. **Materials and methods.** The result of the measurement experiment is to obtain estimates of the real values of physical quantities. An indicator of the assurance level in the estimates is the error in determining them. The reliability of error estimation is determined on the basis of probability theory and mathematical statistics. This makes it possible, for each specific case, to choose the means and methods of measurement that ensure the obtaining of the result, with an error not exceeding the prescribed limits with the required reliability. Setting the uncertainty in the form of an n -dimensional confidence area that includes the actual values of the z_i values determined during the experiment with a certain level of significance $1 - \alpha$ requires knowledge of the probability distribution of the variables z_i . **Results.** In many cases it is rather difficult to propose a hypothesis about the distribution of the estimate z_i . The proposal to distribute the evaluation of measurement results based on the use of the normal distribution law is justified, which is based on the conclusions of the central limit theorem. In this case, it seems natural to consider the n -dimensional ellipsoid ε as a confidence area, within which lies the real value of the quantities determined in the course of the experiment. Under real conditions, with a small n , the assumption of a normal distribution may not be fulfilled; in these cases it is suggested to put forward another hypothesis about the distribution density of the estimate Z . The assumption of the distribution of $f(z)$ is replaced by the condition for which the normal distribution has the maximum entropy. **Conclusions.** When choosing the appropriate distribution in the calculation of the optimal value of the significance level Z , the maximum entropy principle is considered. The solution of the problem uses standard mathematical transformations, which allow to determine the number n and the optimal values of significance level $1 - \alpha_0 = f(n)$. The limiting case of large n can be successfully used in the description of functional dependencies.

К л ю ч е в ы е с л о в а: результат измерения, энтропия, закон распределения, уровень значимости.

K e y w o r d s: result of measurement, entropy, distribution law, significance level.

Описание явлений реального мира, поведения систем тесно связано с проведением экспериментов, получением результатов n -измерений, последующей их обработкой с целью получения действительных значений физических величин. Степень доверия к полученным результатам определяется погрешностью их вычислений [1]. В качестве меры неопределенности полученных оценок можно представить неопределенность в виде n -мерной доверительной области, которая покрывает действительные значения, определенные в ходе эксперимента величин с некоторым уровнем значимости $1 - \alpha$.

В рассматриваемом случае требуется знать распределение вероятностей случайных величин z_i , являющихся оценкой реальных значений измерений величин. В простейшем случае прямых и многократных измерений единственной физической величины [2] и предположении нормального распределения погрешности при отсутствии ее систематической ошибки можно рассматривать распределение Стюдента. В сложных случаях достаточно трудно вычислить распределение оценки z_i на основе использования гипотез об известных или предполагаемых распределениях измеряемых величин [3]. Обоснованным является наиболее вероятное пред-

положение о распределении оценки обработки результатов измерений, например, нормальное распределение [4]. В общем случае гипотеза о нормальном распределении принимается на основе выводов центральной предельной теоремы для случайных величин, входящих в систему и влияющих на ее конечный результат в одинаковой степени.

Случайная величина z_i может быть представлена нормальным распределением систем [5] двух случайных величин (X, Y) , которому отвечает функция плотности

$$f(x, y) = (2\pi\sigma_x\sigma_y)^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{x-a_x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-a_y}{\sigma_y}\right)^2\right)\right), \quad (1)$$

где $a_x = \mu(x)$, $a_y = \mu(y)$ – математические ожидания случайных величин X и Y ;

$\sigma_x = (D(x))^{1/2}$, $\sigma_y = (D(y))^{1/2}$ – средние квадратические отклонения случайных величин X, Y .

Геометрическим местом точек, каждой из которых отвечает равенство значений функции $f(x, y)$, является эллипс. Одинаковым значениям функции плотности $f(x, y)$ отвечает постоянное значение показателя степени

$$\begin{cases} (x-a_x)^2 \sigma_x^{-2} + (y-a_y)^2 \sigma_y^{-2} = \text{const} = k^2, \\ (x-a_x)^2 (\sigma_x k)^{-2} + (y-a_y)^2 (\sigma_y k)^{-2} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (2) является уравнением эллипса с центром в точке (a_x, a_y) и главными полуосью $k\sigma_x, k\sigma_y$, параллельными соответствующим координатным осям.

При изменении $k \in (0; \infty)$ получаем семейство подобных и одинаково расположенных эллипсов, каждому из которых отвечает свое, постоянное значение функции $f(x, y)$. Эллипсы являются эллипсами равной плотности вероятности.

Для условий

$$\begin{cases} E_x = \rho\sqrt{2}\sigma_x, \\ E_y = \rho\sqrt{2}\sigma_y \end{cases} \quad (3)$$

выражение (2) представим

$$(x-a_x)^2 (kE_x)^{-2} + (y-a_y)^2 (kE_y)^{-2} = 1. \quad (4)$$

Из условия (4) при $k=1$ получаем уравнение единичного эллипса главных срединных отклонений, при $k=4$ – полного эллипса рассеивания.

Если элементы z_i, y_i матрицы – столбцов Z и Y интерпретировать как координаты n -мерного евклидова пространства, то плотность вероятностей можно представить

$$f^0(Z) = (\sqrt{2\pi \det S_y})^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2}(z-y)^T S_y^{-1}(z-y)\right), \quad (5)$$

где оценки значений y и S_y используются в качестве ожидаемых значений $\mu = (\mu_i)$ и ковариационной матрицы $\Sigma = S_y$ оценки, принимается

$$\mu = a_\mu = y. \quad (6)$$

Оценки Z следует рассматривать как случайные величины, $p = (z \in R)$ является вероятностью того, что область R охватывает точку с действительным значением измеряемой величины [6].

Из условия (5) плотность вероятности постоянна на поверхности n -мерного эллипсоида ε , образуемого всеми z , для которых выполняется условие

$$(z - y)^T S_y^{-1} (z - y) \leq \text{const} = \chi^2(n, 1 - \alpha). \quad (7)$$

Эллипсоид, представленный условием (7), можно рассмотреть как доверительную область, внутри которой лежит действительное значение определяемых в ходе эксперимента величин. Условия (2) и (7) равнозначны в рассматриваемой схеме решений. Постоянная в условии (7) определяется из равенства $(1 - \alpha)$ – квантиля распределения $\chi^2(n, 1 - \alpha)$ с n степенями свободы, интегралу нормального распределения (5) по эллипсоиду ε

$$p(z \in \varepsilon) = \int_{\varepsilon} f(z) dz = 1 - \alpha. \quad (8)$$

Эллипсоид ε является областью минимального объема среди всех областей R с $p(z \in \varepsilon) > 1 - \alpha$, поэтому он выбран в качестве доверительной области.

Предположение о нормальном распределении в равенстве оценок математическому ожиданию и ковариационной матрице (в соответствии с уравнениями (5) и (6)) может не выполняться, поэтому необходимо искать способы их замены.

Если предположить, что оценка Z имеет некоторую неизвестную плотность распределения, то интегрирование, аналогичное выражению (8), по тому же самому эллипсоиду, определяемому уравнением (7), даст вероятность

$$P(Z \in \varepsilon) = \int_{\varepsilon} f(z) dz = p \neq 1 - \alpha. \quad (9)$$

Показано, что имеется оптимальный уровень значимости $1 - \alpha_0$, на основании которого определяется соответствующая вероятность $p = p^*$ (вычисленная с использованием выражения (5)), характерная для всех распределений, в некотором смысле близких к нормальному. Для специальных распределений p^* может сильно отличаться от $1 - \alpha_0$ [8], поэтому p может быть равно $1 - \alpha$ для некоторого неоптимального значения $1 - \alpha$. Поскольку действительное распределение неизвестно, следует принимать во внимание все возможные распределения.

Вышеуказанные предположения о распределении $f(z)$ заменяются более слабым условием

$$\int (z - y)^T S_y^{-1} (z - y) f_z(z) dz = n. \quad (10)$$

Нормальное распределение не только удовлетворяет этому условию, но и имеет максимальную энтропию $\int f(z) \ln f(z) dz$ среди всех плотностей вероятностей, удовлетворяющих (10). Это существенно, так как при выборе подходящего распределения используется принцип максимума энтропии [7].

Первым шагом в вычислении оптимального значения уровня значимости является стандартное преобразование $U = (B^T)^{-1} (z - y)$ оценки Z с помощью верхней треугольной матрицы B , получаемой путем декомпозиции $S_y = B^T B$ ковариационной матрицы S_y по Cholesky. Матрица B существует и несингулярна, если S_y несингулярна и положительно определена.

Пусть $f^0(u)$ является плотностью вероятности случайной величины U . Ее нормальное распределение имеет вид

$$f^0(u) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n}} \exp\left(-\frac{1}{2} u^T u\right). \quad (11)$$

Доверительный эллипсоид ε трансформируется в n -мерную сферу Φ радиуса r , получаемого из равенства $u^T u \leq r^2 = \chi^2(n, 1-\alpha)$ в соответствии с выражением (7). С учетом того, что $B = \sqrt{\det S_y}$, выражения (9) и (10) принимают вид

$$P(Z \in \varepsilon) = P(U \in \Phi) = \int_{\Phi} f(u) du = p \neq 1 - \alpha, \quad (12)$$

$$\int U^T U f_U(u) du = n. \quad (13)$$

На втором шаге U преобразуется в случайные величины $T = \frac{1}{2} U^T U$ и $\Omega = U / \sqrt{2T}$, соответствующие n -мерному единичному вектору или пространственному углу.

Пусть $f_T(t)$ является плотностью вероятностей T . Тогда интегрирование по углу в выражениях (8) и (9) дает

$$P(Z \in \varepsilon) = P(U \in \Phi) = P\left(0 \leq T \leq \frac{r^2}{2}\right) = \int_0^{r^2/2} f_T(t) dt = p \neq 1 - \alpha, \quad (14)$$

$$2 \int_0^{\infty} f_T(t) dt = n. \quad (15)$$

Равенство $p = 1 - \alpha$ выполняется для нормальной плотности распределения, определенной выражением (11), путем интегрирования по углу

$$f_T^0(T) = \frac{1}{\Gamma(n/2)} t^{(n/2-1)} e^{-t}. \quad (16)$$

Для условия $T = x^2 / 2$ получается распределение χ^2 с n степенями свободы.

Следовательно, из выражения (14) следует, что r^2 является действительно $(1-\alpha)$ -квантилью распределения $\chi^2(n, 1-\alpha)$.

Неизвестная плотность распределения $f_T(t)$ разлагается в ряд с использованием обобщенных ортогональных полиномов Лагерра $L_k^{(v)}(t)$:

$$f_T(t) = f_T^0(t) \sum_{k=0}^{\infty} a_k L_k^{\left(\frac{n}{2}-1\right)}(t). \quad (17)$$

Полиномы при $v = -1$ определяются выражением

$$L_k^{(v)}(t) = \frac{1}{k!} t^{-v} e^t \frac{d^k}{dt^k} (t^{v+k} e^{-t}) \quad (18)$$

и для них справедливо отношение ортогональности

$$\int_0^{\infty} t^v e^{-t} L_j^{(v)}(t) L_k^{(v)}(t) dt = \frac{1}{k!} \Gamma(v+k+1) \delta_{jk}. \quad (19)$$

Коэффициенты a_k в выражении (17) определяются следующим образом:

$$a_k = \frac{k! \Gamma(n/2)}{\Gamma(n/2+k)} \int_0^{\infty} f_T(t) L_k^{(n/2-1)}(t) dt. \quad (20)$$

Когда $L_0^{(v)}(t) = 1$ из уравнения (20) получается, что $a_0 = 1$, поскольку плотность вероятности нормализуется.

Производя то же самое с $L_1^{(v)}(t) = v + 1 - t$ и принимая во внимание уравнение (15), получим, что $a_1 = 0$ и

$$f_T(T) = f_T^0(t) \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} a_k L_k^{\left(\frac{n-1}{2}\right)}(t) \right). \quad (21)$$

Это условие должно быть проинтегрировано в соответствии с выражением (14), чтобы получить p :

$$p = 1 - \alpha + a_2 \int_0^{\frac{r^2}{2}} f_T^0(t) L_2^{\left(\frac{n-1}{2}\right)}(t) dt + R_3. \quad (22)$$

Остаточный член R_3 содержит все дополнительные составляющие, обусловленные интегрированием членов разложения плотности распределения с коэффициентами a_k ($k \geq 3$). Интеграл в последнем выражении может быть взят, если учесть выражения (16) и (18):

$$2\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \int_0^{\frac{r^2}{2}} f_T(t) L_2^{\left(\frac{n-1}{2}\right)}(t) dt = \int_0^{\frac{r^2}{2}} \frac{d^2}{dt^2} \left(t^{(n/2-1)} e^{-t} \right) dt = \frac{d}{dt} \left(t^{\frac{n}{2}+1} e^{-t} \right) \Bigg|_{t=0}^{t=\frac{r^2}{2}} = t^{\frac{n}{2}} e^{-t} \left(\frac{n}{2} + 1 - t \right). \quad (23)$$

Вклад этого интеграла в p уравнения (22) стремится к нулю при $t = \frac{r^2}{2} = n/2 + 1$ или $r^2 = x^2(n, 1 - \alpha_0) = n + 2$.

Это является лучшим выбором $(1 - \alpha)$ -квантиля, так что

$$P = p^* = 1 - \alpha_0 + R_3,$$

т.е. при этом имеется только отличие третьего порядка p^* от соответствующего уровня значимости $1 - \alpha$, который получается в ходе оптимизации и определяется выражением

$$1 - \alpha_0 = \frac{1}{\Gamma(n/2)} \int_0^{n/2+1} t^{n/2-1} e^{-t} dt, \quad (24)$$

соответствующим уравнениям (16) и (14), p^* равна $1 - \alpha_0$ для всех плотностей, удовлетворяющих выражениям (10) или (13) и содержащих коэффициенты $a_k = 0, (k \geq 3)$. Зависимость от пространственного угла может быть произвольной.

При $n = 1$ доверительный эллипсоид вырождается в доверительный интервал, пределы которого при $1 - \alpha_0 = 91,67\%$, в условии (1) $S_{y1} = \sigma_{y1}$ – среднее квадратическое отклонение.

Заключение

1. Случай больших n характерен при определении множества точек функциональной зависимости при уровне значимости, зависящем от n .
2. Предложенный метод позволяет получить действительные оценки физических величин в проводимых экспериментах, обеспечивая погрешность до 4-го знака.

Библиографический список

1. Петров, Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров, В. А. Виктор, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – Москва : Наука, 1976. – 243 с.

2. *Свистунов, Б. Л.* Преобразователи параметров емкостных и индуктивных датчиков в напряжение / Б. Л. Свистунов // Измерительная техника. – 2001. – № 6. – С. 50–52.
3. *Гусынина, Ю. С.* Математико-статистическое моделирование производственной системы / Ю. С. Гусынина // Человек, общество и государство в современном мире : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. – Пенза, 2016. – С. 241–244.
4. *Зубков, А. Ф.* Построение вероятностной модели эксплуатации технических систем с учетом стоимостных показателей их состояний / А. Ф. Зубков, О. В. Деркаченко, Ю. С. Гусынина // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2007. – № 52-4. – С. 284–289.
5. *Розенберг, В. Я.* Введение в теорию точности измерительных систем / В. Я. Розенберг. – Москва : Сов. радио, 1975. – 304 с.
6. *Свистунов, Б. Л.* Вторичные измерительные преобразователи для взаимноиндуктивных датчиков / Б. Л. Свистунов, В. Г. Полосин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 90 с.
7. *Туз, Ю. М.* Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1976. – 285 с.
8. *Свистунов, Б. Л.* Двухканальные устройства измерения параметров электрических цепей с промежуточным частотно-временным преобразованием / Б. Л. Свистунов // Датчики и системы. – 2001. – № 4. – С. 25–28.

Свистунов Борис Львович

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

Svistunov Boris Lvovitch

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of physics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Зубков Александр Федорович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра математики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: zubkova@penzgtu.ru

Zubkov Alexander Fedorovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of mathematics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Гусынина Юлия Сергеевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: gusynina@mail.ru

Gusynina Yuliya Sergeevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of mathematics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Образец цитирования:

Свистунов, Б. А. Метод выбора плотности распределения случайной величины оценки действительного значения результата измерения на основе принципа максимума энтропии / Б. А. Свистунов, А. Ф. Зубков, Ю. С. Гусынина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1 (27). – С. 95–102. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-1-13.