ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Левенец А. В., Нефедьев Д. И., Симаков С. Р. Алгоритм коррекции телеметрических измерений по данным автоматизированных информационно-измерительных систем учета электроэнергии

Щербакова А. А., Полосин В. Г., Морозова М. Н. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ ПРОТОЧНОЙ КЮВЕТЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕНЗИНОВ

Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Шерстнев В. В., Спиркин А. Н., Трилисский В. О. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Волчихин В. И., Иванов А. И., Карпов А. П., Юнин А. П. УСЛОВИЯ КОРРЕКТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНТРОПИИ ОСМЫСЛЕННЫХ ДЛИННЫХ ПАРОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ СВЕРТОК ХЭММИНГА С ЭТАЛОННЫМИ ТЕКСТАМИ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ

33

6

14

23

№ 3 (29), 2019

Колдов А. С., Светлов А. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ	39
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ ЕСТЕСТВЕННО ВЫРАЖЕННЫХ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ	48
Крамм М. Н. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТОРСА И КВАЗИЭПИКАРДА	61
Кузьмин А. В. РАСЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕРДЦА	69
Убиенных А. Г., Убиенных Г. Ф., Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Тычков А. Ю., Тимохина О. А. ПРИМЕНЕНИЕ КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ СБОРА И ОБРАБОТКИ КАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	77
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	
Москалев С. А., Чебурахин И. Н., Волков В. С., Кикот В. В., Кошкин Г. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	87
Таишев С.Р. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ	95
Михайлов П. Г., Глебова Т. А., Соколов А. В., Аналиева А. У., Михайлов А. П., Фадеев Е. Д. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ	
СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ	102

Гурин С. А., Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Фимин А. В., Николаев К. О. КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО И СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ	111
Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Крайнова К. Ю., Голубков П. Е., Сибринин Б. П. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОВОРОТА	110

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

№ 3 (29), 2019

6

14

23

33

39

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Levenets A. V., Nefedyev D. I., Simakov S. R. THE CORRECTION ALGORITHM OF TELEMETRY DATA ACCORDING TO THE DATA OF AUTOMATED INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS OF ELECTRIC POWER ACCOUNTING

Shcherbakova A. A., Polosin V. G., Morosova M. N. THE CALCULATION OF THE OPTIMUM OPTICAL PATH LENGTH FLOW CELL IN THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF A GASOLINE SPECTROMETRIC RESEARCH

Bezborodova O. E., Bodin O. N., Sherstnev V. V., Spirkin A. N., Trilisskiy V. O. PRINCIPLES OF CREATING AN INTELLECTUAL INFORMATION MEASURING AND MANAGING SYSTEM OF COMPLEX MONITORING OF THE CONDITION OF TERRITORIAL TECHNOSPHERE

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Karpov A. P., Yunin A. P. CONDITIONS FOR THE CORRECT CALCULATION OF THE ENTROPY OF MEANINGFUL LONG PASSWORDS IN THE HAMMING CONVOLUTION SPACE WITH REFERENCE TEXTS IN RUSSIAN AND ENGLISH

Koldov A. S., Svetlov A. V. DETERMINING OF NON-RESONANT FOUR-ELEMENT CIRCUIT PARAMETERS WITH USING OF AGGREGATE MEASUREMENTS METHOD

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS	
Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P. A METHOD FOR AUTOMATED SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS TO DETERMINE TEMPORAL PATTERNS OF NATURALLY EXPRESSED PSYCHO-EMOTIONAL STATES	48
Kramm M. N. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CHOICE OF THE NUMBER OF ELECTRODES ON THE ELECTRIC POTENTIAL DISTRIBUTION MAPS ON THE TORSO SURFACES AND QUASI-EPICARDIUM	61
<i>Kuzmin A. V.</i> ESTIMATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS MODIFICATION FOR MODELING OF ELECTRICAL ACTIVITY OF HEART	69
Ubiennykh A. G., Ubiennykh G. F., Bodin O. N., Kuzmin A. V., Tychkov A. Y., Timokhina O. A. APPLICATION OF CHANNEL CODING IN THE DISTRIBUTED SYSTEM FOR COLLECTION AND PROCESSING OF CARDIOGRAPHIC INFORMATION	77
TECHNOLOGY INSTRUMENTATION	
Moskalev S. A., Cheburakhin I. N., Volkov V. S., Kikot V. V., Koshkin G. A. THE TEMPORAL STABILITY OF THE PIEZOCERAMIC SENSITIVE ELEMENTS CHARACTERISTICS FOR THE SENSORS OF MECHANICAL VALUES	87
Taishev S. R. PIEZOELECTRIC ELEMENTS METALLIZATION RESEARCHES TO IMPROVE THE PARAMETERS STABILITY	95
Mikhailov P. G., Glebova T. A., Sokolov A. V., Analieva A. U., Mikhailov A. P., Fadeev E. D. MANAGEMENT OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE POLYSILICON SENSORY STRUCTURES OF MICROELECTRONIC SENSORS	102
<i>Gurin S. A., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Fimin A. V., Nikolaev K. O.</i> STRUCTURES AND TECHNOLOGICAL REGIMES OF FORMING SENSITIVE ELEMENTS OF MICROELECTRONIC SENSORS OF FAST ALTERNATING AND STATIC PRESSURE	111
Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Krainova K. Yu., Golubkov P. E., Sibrinin B. P. AUTOMATED SYSTEM FOR TURNING THE DIFFRACTION	
GRATING OF THE SPECTROPHOTOMETER	119

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.398; 004.67

6

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-1

А. В. Левенец, Д. И. Нефедьев, С. Р. Симаков

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

A. V. Levenets, D. I. Nefedyev, S. R. Simakov

THE CORRECTION ALGORITHM OF TELEMETRY DATA ACCORDING TO THE DATA OF AUTOMATED INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS OF ELECTRIC POWER ACCOUNTING

Аннотация. Актуальность и цели. Целью работы является экспериментальная проверка возможности применения коррекции данных телеметрии по данным автоматизированных систем учета электроэнергии для уменьшения отклонения значений этих источников данных, что позволит повысить эффективность управления энергетическими системами. Материалы и методы. Для коррекции данных предлагается использовать алгоритм, в основе которого лежит построение зависимости «отклонение – значение автоматизированной системы учета» с последующей ее аппроксимацией ступенчатой функцией и дальнейшей корректировкой данных телеметрии. Проверка работоспособности алгоритма проводилась на данных, полученных по ряду подключений энергетических объектов Дальнего Востока России. Результаты. Показано, что величины отклонений для различных подключений и различных временных участков в случае применения алгоритма коррекции существенно снижаются. Это наблюдается при работе с данными, имеющими как стационарный, так и нестационарный характер. Также снижаются величины математического ожидания и дисперсии откорректированного потока данных телеметрии. Выводы. Применение предложенного алгоритма коррекции данных телеметрии приводит в большинстве случаев к существенному снижению (в два-три раза) погрешности оценки мощности. Однако для корректной работы алгоритма необходимо обеспечивать приемлемое качество данных, полученных по линии телеметрии, в противном случае погрешность будет снижаться незначительно, не более чем на несколько процентов.

A b s t r a c t. *Background*. The aim of the work is to experimentally testing of the possibility of telemetry data correction based on the data of automated electricity metering systems to reduce the deviation of the values of these data sources, which will improve the efficiency of energy systems management. *Materials and methods*. To correct the data an algorithm based on the construction of the dependence «deviation – value of the automated accounting system»

© Левенец А. В., Нефедьев Д. И., Симаков С. Р., 2019

with its subsequent approximation by a step function and further correction of telemetry values, it is proposed to use. Verification of the algorithm performance was carried out on the data obtained for a number of connections of power facilities of the Far East of Russia. **Results**. It is shown that the values of deviations for different connections and different time zones, in the case of the correction algorithm are significantly reduced. This is observed when working with data having both stationary and non-stationary character. The values of expectation and variance of corrected telemetry data flow are also reduced. **Conclusions**. Application of the proposed algorithm of telemetry data correction leads in most cases to a significant reduction (two to three times) of the power estimation error. However, for the correct operation of the algorithm, it is necessary to ensure the acceptable quality of the data obtained through telemetry, otherwise the error will be reduced slightly, not more than a few percent.

Каючевые саова: отклонение, телеметрические данные, коррекция, алгоритм, система учета электроэнергии.

K e y w o r d s: deviation, telemetry data, correction, algorithm, electricity metering systems.

Введение

Управление современными промышленными объектами, например электрическими сетями, является достаточно сложной задачей в силу как пространственного распределения элементов объекта управления, так и сложности основных технологических процессов. Одной из важных проблем является обеспечение приемлемого уровня достоверности данных информационно-измерительных систем, использующихся для обоснования принятия решения [1–3]. Следует отметить, что проблеме верификации и достоверизации данных, несмотря на ее очевидную актуальность, уделяется существенно меньше внимания, чем такой задаче, как диагностика состояния технических средств [3].

Существенную актуальность проблема достоверизации принимает для такой важной области, как электроэнергетика [4–6]. В настоящее время для систем электроэнергетики выработка управляющих решений на стадии ведения режима, как правило, производится по показаниям оперативного информационного комплекса (ОИК), источником данных для которого являются системы телемеханики (ТМ) [2]. Следует отметить, что кроме аппаратуры ТМ на объектах электроэнергетики устанавливают оборудование автоматизированных информационно-измерительных систем учета электроэнергии (АИИС УЭ). При этом относительная погрешность средних получасовых значений мощности, полученных по данным ТМ, часто существенно превышает соответствующую погрешность АИИС УЭ и может достигать 5 % и более, что приводит к неправильному определению инициатив отклонений субъектов рынка.

Кардинальным решением приближения значений оперативных данных к данным коммерческого УЭ является массовое внедрение современных средств ТМ и последующее их постоянное обновление. Также возможна организация оперативной передачи данных АИИС УЭ в ОИК, что однако требует больших затрат времени и средств. В качестве паллиативного решения вышеуказанной проблемы при соответствующем изменении нормативной базы может быть применение коррекции данных ТМ на основании ранее проведенных измерений АИИС УЭ.

Исходные положения для процедуры коррекции

Одним из возможных технических вариантов повышения точности измерений средних значений мощности в ОИК является определение калибровочной функции, описывающей систематическое отклонение средних получасовых значений ТМ от данных АИИС УЭ за предыдущие периоды времени с последующей калибровкой текущих значений ТМ в ОИК. Такой подход основывается на следующих предположениях:

- измерения АИИС УЭ считаются образцовыми;

– погрешности ТМ и АИИС УЭ являются в основном систематическими с характерным временем изменения большим нескольких суток;

- зависимость погрешностей от мощности является плавной;

 – за характерное время 30 мин не происходит значительных изменений мощности, существенно влияющих на среднее значение;

– долями погрешности, связанными с расхождением начала времени интегрирования в ОИК и АИИС УЭ, сбоями в каналах связи ТМ, разрядностью ТМ в ОИК можно пренебречь;

 погрешности ТМ могут незначительно выходить за границы допустимых погрешностей.

Таким образом, предполагается стационарность поведения получаемых погрешностей на достаточно больших промежутках времени – до нескольких суток.

Наиболее простым алгоритмом компенсации отклонения является вычитание среднего отклонения из текущего значения ТИ. Однако систематические погрешности ТМ и АИИС УЭ зависят от мощности, что может привести к появлению существенных отклонений. Для оценки влияния данного фактора были проведены исследования повторяемости режимов перетоков по присоединениям.

В качестве критерия оценки степени повторяемости использовались коэффициенты автокорреляции R(k), вычисляемые по данным за сутки (48 получасовых значений) следующим образом:

$$R(k) = \frac{1}{\sigma_0 \sigma_k} \sum_{i=0}^{47} P_0(i) P_k(i),$$

где $P_0()$ – функция мощности за сутки, соответствующей началу отсчета, $P_k()$ – функция мощности за k-е сутки после начала отсчета, σ_0 – среднеквадратическое отклонение функции мощности за сутки – начало отсчета, σ_k – среднеквадратическое отклонение функции мощности за k-е сутки.

Такого рода исследование было проведено на данных, полученных по девяти присоединениям. Анализ полученных результатов показал, что для большинства присоединений при величине параметра не выше трех коэффициент корреляции принимает значение не менее чем 0,75 [7]. Другими словами, можно констатировать сильную временную зависимость режимов, проявляющуюся на временном интервале до трех суток. Таким образом, можно предположить, что величина среднего отклонения слабо зависит от нелинейности измерительных систем на указанных интервалах времени.

Алгоритм коррекции значений телемеханики

Таким образом, для обеспечения компенсации данных ТМ следует выполнить следующую последовательность действий:

1. Вычисляется функция отклонения как разность полученных за предыдущие сутки данных телеизмерений, усредненных по каждому получасу и соответствующих им получасовых данных АИИС УЭ.

2. Строится зависимость «отклонение – значение АИИС УЭ», что позволит поставить в соответствие величины отклонения и значения мощности. Можно предположить, что в самом общем случае эта зависимость будет иметь приблизительно линейный характер. Следует отметить, что на данном этапе необходимо провести фильтрацию аномальных отклонений, т.е. отклонений, величины которых превышают заданное допустимое значение, оцениваемое как сумма максимальных допустимых отклонений средних получасовых значений мощности АИИС УЭ и ТМ.

3. Исходя из предположения о том, что максимальные отклонения соответствуют максимальным возможным значениям мощности, полученная зависимость аппроксимируется ступенчатой функцией, так как ее наклон будет незначительным. При этом, разбивая полученную зависимость на достаточно большое количество ступеней, можно с достаточно высокой долей уверенности утверждать, что модули величин отклонений в пределах одной ступени будут описываться следующим неравенством:

$$|\varepsilon_{\rm ct}| \leq \varepsilon_{\rm gou} / N$$
,

где $|\varepsilon_{ct}|$ – модуль отклонения на ступени; ε_{don} – максимально допустимое отклонение для данной точки измерения; N – число ступеней.

4. Вычисляется среднее значение отклонения на каждой ступени. В том случае, если для некоторых ступеней отсутствуют соответствующие им значения, но в соседних (с обеих сто-

рон) ступенях данные имеются, значение отклонения для такой ступени вычисляется с помощью линейной аппроксимации по значениям соседних ступеней. Для крайних ступеней с отсутствующими данными корректировочное значение принимается равным нулю. Полученные таким образом N корректировочных значений будут использоваться для коррекции текущих значений телемеханики в последующие сутки следующим образом: при попадании значений телеизмерения в диапазон некоторой ступени из этого значения происходит вычитание корректирующей величины, соответствующей этой ступени.

Проверка качества данных

Для определения корректности проведения предложенной процедуры коррекции данных телеизмерений предлагается оценивать качество данных, по которым находятся корректирующие величины. Здесь под термином «качество данных» будет понимается число получасовых значений отклонений *K*, не превышающих заданное допустимое значение за сутки. На рис. 1 приведены примеры графиков качества данных, полученных для двух различных присоединений.





Следует отметить, что, судя по полученным данным, для некоторых присоединений метрологические свойства измерительной аппаратуры не соответствуют заявленным значениям. При этом можно предположить, что отсутствие корректных данных приведет к низкой эффективности компенсирующей процедуры, поэтому для проведения исследований по данным таких точек измерений следует искусственно повышать величину допустимого отклонения или отключать процедуру аномальной фильтрации.

Одним из основных предположений, легших в основу предлагаемой процедуры компенсации, является допущение плавности кривой зависимости «отклонение – данные АИИС УЭ». Для проверки этой гипотезы были построены такие зависимости для ряда точек измерений.

Наиболее характерные графики таких зависимостей представлены на рис. 2, где цифрами 1 и 2 обозначены предельно допустимые положительное и отрицательное отклонения соответственно. Следует отметить хорошую аппроксимацию экспериментальных кривых кусочно-линейными функциями. Форма кривой на рис. 2,6 объясняется нелинейной временной зависимостью отклонения для данного присоединения. Таким образом, согласно полученным данным можно сделать вывод о приемлемости допущений, положенный в основу предлагаемого способа компенсации.





Оценка эффективности процедуры компенсации

Исследование эффективности алгоритма компенсации было проведено на данных, полученных по ряду присоединений. Для оценки эффективности было предложено использовать два критерия: на основе оценки величины отклонения энергии и на основе оценки величины модуля средней ошибки, вычисленной за исследуемый период.

Первый критерий рассчитывается по следующей формуле:

$$L_{1} = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{A}(i) - \sum_{j=1}^{N} P_{T}(j)}{P_{\max}} \cdot 100\%,$$

где $P_A(i)$ – мощность за *i*-й получас по данным АИИС УЭ; $P_I(i)$ – мощность за *i*-й получас по телемеханическим данным; P_{max} – максимальная мощность по исследуемому присоединению; N – число получасовых значений в исследуемом периоде.

Второй критерий определяется следующим образом:

$$L_{2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |P_{A}(i) - P_{T}(i)|$$

Используя предложенные критерии, можно оценить как вероятную величину погрешности, так и общую погрешность за некоторый период.

Характерный пример функционирования алгоритма коррекции приведен на рис. 3, где цифрами обозначено: l – математическое ожидание отклонения по корректированным данным TM, 2 – математическое ожидание отклонения по некорректированным данным TM, 3 – отклонение по корректированным данным TM, 4 – отклонение по некорректированным данным TM, 5 и 6 – положительное и отрицательное допустимые отклонения соответственно.

Результаты исследования

Полученные в ходе проведенного исследования результаты сведены в табл. 1, где приведены вычисленные значения предложенных критериев, а также величины математических ожиданий (MO) и среднеквадратических отклонений (СКО) для нескольких различных присоединений и их временных отрезков как для случая отсутствия (TM), так и в случае проведения (TMк) коррекции.

Следует отметить, что как по первому, так и по второму критерию алгоритм компенсации работает с достаточной эффективностью – значение модуля средней погрешности (критерий L_2) уменьшается примерно в три раза, а значение погрешности определения мощности за период (критерий L_1) – примерно в пять раз.

Также важно отметить, что на нестационарных участках, а также для некоторых присоединений с нелинейными характеристиками измерительной системы, отклонения для откорректированных значений могут несколько увеличиваться, как это показано на рис. 3, б, где приведены результаты проведения компенсации для случая нелинейного поведения зависимости «отклонение – данные АИИС УЭ».



Рис. 3. Пример функционирования алгоритма компенсации на стационарном участке присоединении ПС «Хабаровская» 220 кВ АТ1 (*a*) и нестационарном участке присоединения Л500 кВ «ПримГРЭС – Чугуевка» (б)

Таблица 1

Т	L_1		L_2		MO		СКО	
Гочка измерения	TM	ТМк	TM	ТМк	TM	ТМк	TM	ТМк
ПС Хабаровская (428 суток)	4,82	0,95	3,32	0,97	-1,37	-0,32	8,11	7,59
ПС Хабаровская (стационарный участок, 11 суток)	4,85	0,05	5,36	1,25	-4,45	-0,05	0,59	0,72
ПС Хабаровская (нестационарный участок, 23 суток)	-6,73	3,46	2,98	0,94	0,28	0,15	3,12	1,51
ПС Амурская (весь диапазон, 428 суток)	1,04	0,39	1,73	1,36	-0,83	-0,31	10,39	10,42
ПС Амурская (стационарный участок, 25 суток)	0,43	0,00	0,83	0,55	-0,44	0,00	0,35	0,3
ПС Амурская (нестационарный участок, 15 суток)	3,12	-0,73	1,39	0,54	-0,55	0,13	1,37	0,78
ПримГРЭС-Чугуевка (183 суток)	-2,96	-1,11	5,07	2,26	-4,07	-1,82	4,42	4,04
ПримГРЭС-Чугуевка (стационарный участок, 40 суток)	-4,02	-0,22	5,62	0,40	-5,96	-0,33	1,65	1,41
ПримГРЭС-Чугуевка (нестационарный участок, 35 суток)	1,84	1,75	3,35	1,01	-1,09	-1,18	5,9	5,14

Экспериментальные данные работы алгоритма коррекции

Заключение

Для большинства исследованных присоединений предлагаемый алгоритм коррекции позволяет значительно (в два-три раза) снизить среднее значение отклонения для телемеханических данных. Тем не менее для некоторых присоединений даже после применения алгоритма коррекции отклонение снижается несущественно. Здесь следует отметить, что для таких присоединений характерно низкое качество входных данных, что, очевидно, оказывает значительное влияние на эффективность алгоритма компенсации. При этом даже полный отказ от фильтрации аномальных погрешностей приводит к незначительному снижению значений предложенных критериев оценки эффективности. В качестве объяснения такого факта можно предполагать нестационарное поведение отклонения для таких точек измерения, обусловленное метрологическими характеристиками аппаратуры измерения и/или связи.

Библиографический список

- 1. Современная телеметрия в теории и на практике : учеб. курс / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов, В. П. Обрученков, А. В. Древин, В. Б. Краскин, С. Г. Кудряков, А. И. Петров, С. М. Соколов, В. Л. Якимов, А. И. Лоскутов. Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2007. 672 с.
- Занин, А. С. Достоверизация телеизмерений в системах управления сложными структурами на примере ОАО «СО ЕЭС» / А. С. Занин, К. И. Бушмелева // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 7–8.
- 3. *Веревкин, А. П.* Диагностика, верификация и достоверизация данных для автоматизированных систем управления / А. П. Веревкин // Нефтегазовое дело. 2016. № 3. С. 239–254.
- 4. *Сухов, С. А.* Мониторинг оперативных диспетчерских данных средствами Интернет / С. А. Сухов // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 3. С. 24–30.
- 5. *Ухов, В. И.* Контроль и оценка качества передачи оперативной информации в распределенной системе сбора данных / В. И. Ухов, А. В. Мандрик // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 11. С. 30–32.
- Макоклюев, Б. И. Обработка данных коммерческого учета для формирования и планирования балансов энергокомпаний / Б. И. Макоклюев, А. В. Шалаев, А. А. Артемьев // Энергоэксперт. – 2012. – № 1. – С. 70–73.

 Симаков, С. Р. Исследование возможности коррекции телеметрических измерений по данным АИИС КУЭ и АСТУЭ / С. Р. Симаков, А. В. Левенец // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Благовещенск, 5–7 октября 2005 г.). – Благовещенск, 2005. – С. 142–146.

References

- Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V., Obruchenkov V. P., Drevin A. V., Kraskin V. B., Kudryakov S. G., Petrov A. I., Sokolov S. M., Yakimov V. L., Loskutov A. I. Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike: ucheb. kurs [Modern telemetry in theory and practice : studies. course]. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2007, 672 p. [In Russian]
- 2. Zanin A. S., Bushmeleva K. I. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 7–8. [In Russian]
- 3. Verevkin A. P. Neftegazovoe delo [Oil and gas business]. 2016, no. 3, pp. 239-254. [In Russian]
- 4. Sukhov S. A. Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii [Automation and modern technologies]. 2007, no. 3, pp. 24–30. [In Russian]
- 5. Ukhov V. I., Mandrik A. V. Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii [Automation and modern technologies]. 2008, no. 11, pp. 30–32. [In Russian]
- Makoklyuev B. I., Shalaev A. V., Artem'ev A. A. *Energoekspert* [Energoekspert]. 2012, no. 1, pp. 70–73. [In Russian]
- Simakov S. R., Levenets A. V. Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov: sb. tr. IV Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem (Blagoveshchensk, 5–7 oktyabrya 2005 g.) [Energy: management, quality and efficiency of energy resources: sat. Tr. IV Vseros. scientific.-tekhn. conf. with intern. participation (Blagoveshchensk, 5–7 October 2005)]. Blagoveshchensk, 2005, pp. 142–146. [In Russian]

Левенец Алексей Викторович

доктор технических наук, профессор, кафедра автоматики и системотехники, Тихоокеанский государственный университет (Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136) E-mail: levalvi@bk.ru

Нефедьев Дмитрий Иванович

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

Симаков Сергей Романович

кандидат физико-математических наук, ИП «Симаков Сергей Романович» (Россия, г. Хабаровск, ул. Ленина, 35) E-mail: ssr3000@rambler.ru

Levenets Alexey Viktorovitch

doctor of technical sciences, professor, sub-department of automation and systems engineering, Pacific National University (136, Tihookeanskaya street, Khabarovsk, Russia)

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

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

Simakov Sergey Romanovitch

candidate of physical and mathematical sciences, PE "Simakov Sergey Romanovitch" (35, Lenina street, Khabarovsk, Russia)

Образец цитирования:

Левенец, А. В. Алгоритм коррекции телеметрических измерений по данным автоматизированных информационно-измерительных систем учета электроэнергии / А. В. Левенец, Д. И. Нефедьев, С. Р. Симаков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 6–13. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-1.

УДК 004.942

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-2

А. А. Щербакова, В. Г. Полосин, М. Н. Морозова

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ ПРОТОЧНОЙ КЮВЕТЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕНЗИНОВ

A. A. Shcherbakova, V. G. Polosin, M. N. Morosova

THE CALCULATION OF THE OPTIMUM OPTICAL PATH LENGTH FLOW CELL IN THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF A GASOLINE SPECTROMETRIC RESEARCH

Аннотация. Актуальность и цели. Представлен расчет оптимальной длины оптического пути кюветы для товарных бензинов на основе спектральных коэффициентов поглощения бензинов и его компонентов в ближней инфракрасной области. Объектом исследования являются информационно-измерительная система для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости топлива. Предметом исследования являются спектральные характеристики бензинов и их компонентов. Целью работы является определение оптимальной длины оптического пути проточной системы информационно-измерительной системы на основе анализа спектров поглощения бензинов и их компонентов. Материалы и методы. Для решения поставленных задач использовались методы решения некорректных задач при спектральном анализе, методы математического моделирования, статистической обработки данных, метод энергетического расчета с помощью программы OptiSystem, расчет проведен в программной среде Visual Basic for Applications (VBA) Microsoft Excel. Результаты. Представлены критерий оценки и математическая модель длины оптического пути кюветы. По результатам расчетов определены рабочий диапазон коэффициентов пропускания и ошибки измерений. Выводы. Использование предлагаемого расчета оптимальной длины оптического пути кюветы является задачей спектроскопии и состоит в изучении спектрального состава светового излучения, характеризующегося функцией зависимости распределения плотности энергии по спектру от частоты. Расчет позволяет определить потери, вносимые исследуемым объектом (бензином в кювете с выбранной длиной оптического пути) в работу оптического тракта системы. Информация о потерях, вносимых кюветой с бензином, необходима для оценки потерь оптического тракта системы методом энергетического расчета и моделирования с помощью программного обеспечения OptiSystem.

A b s t r a c t. *Background*. The article presents the calculation of the optimal optical path length of the cell for commercial gasoline on the basis of spectral absorption coefficients of gasoline and its components in the near infrared region. The object of the study is an information-measuring system for the identification of components, determining the composition and detonation resistance of fuel. The subject of the study is the spectral characteristics of components and gasoline. The aim of the work is to determine the optimal length of the optical path of the flow system of information-measuring system based on the analysis of the absorption spectra of gasoline and its components. *Materials and methods*. To solve the problems we used the

© Щербакова А. А., Полосин В. Г., Морозова М. Н., 2019

methods of solving incorrect problems in spectral analysis, methods of mathematical modeling, statistical data processing, energy calculation method using the program OptiSystem, the calculation is carried out in the software environment Visual Basic for Applications (VBA) Microsoft Excel. **Results**. A criterion for estimating and mathematical model of the length of the optical path of the cell are presented. The calculations determined the working range of the coefficients of transmission and error measurements. **Conclusions**. The use of the proposed calculation of the optical path length flow cell is the task of spectroscopy and consists in the study of the spectral composition of light radiation characterized by the function of the dependence of the energy density distribution over the spectrum on the frequency. The calculation allows to determine the losses introduced by the object under study (gasoline in the cuvette with the selected optical path length) in the optical path of the system. Information about the losses introduced by the cuvette with gasoline in dB is necessary to estimate the losses of the optical path of the system by the method of energy calculation and modeling using the OptiSystem software.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бензин, проточная кювета, длина оптического пути кюветы, спектральный коэффициент поглощения, информационно-измерительная система.

K e y w o r d s: gasoline, flow cell, optical path length of the cell, spectral absorption coefficient, information and measuring system.

Наиболее информативным методом определения состава товарного бензина является спектроскопия в ближней инфракрасной (ИК) области в диапазоне длин волн 900–2550 нм, поскольку позволяет проводить измерения концентрации компонентов и октанового числа товарного бензина непосредственно на технологическом потоке в режиме реального времени, что особенно важно при построении современных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) [1, 2]. Использование основных доступных технологий, применяемых для оценки состава и детонационной стойкости бензинов в ближней ИК области заключается в выборе оптимального анализатора с системой отбора проб.

Современный рынок кювет для спектрофотометрических измерений представлен огромным ассортиментом кювет для исследования образцов жидких сред. Вид кюветы и длина оптического пути различны и определяются химико-физическими свойствами веществ. Оптические методы для исследования бензинов являются перспективным направлением в связи с возможностью применения их в искро-, взрывопожароопасных условиях эксплуатации.

Структура ИИС идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости высокооктанового топлива

Для измерения спектральных характеристик каждого отдельного компонента и бензинов в информационно-измерительной системе (ИИС) идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости топлива установка промышленных проточных кювет в технологический процесс приготовления товарного бензина предлагается в двух вариантах: с установкой промышленных проточных кювет на каждой технологической линии компонентов и готового бензина (рис. 1) и с установкой одной промышленной проточной кюветы на весь технологический поток (с подключением всех компонентов и готового бензина к одной кювете) (рис. 2).

Основными элементами ИИС являются: источник излучения, в качестве которого выбран перестраиваемый квантовый генератор (лазер) ближнего ИК диапазона длин волн, проточная кювета, соединенная волоконно-оптическим кабелем с источником излучения и фотоприемником (ФП), микроконтроллер (МК), выполняющий функции устройства преобразования информации и управления работой ИИС, персональный компьютер (ПК) для обработки измеренной информации. Число измерительных каналов определяется количеством технологических линий с исследуемыми объектами (компонентами и готовыми бензинами).



Рис. 2. Структура информационно-измерительной системы идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости топлива с одной проточной кюветой

В ИИС с проточными кюветами на каждой технологической линии достигается высокое быстродействие за счет одновременного опроса сигналов измерительных каналов на всех длинах волн [3].

ИИС с одной проточной кюветой работает на основе гидравлического мультиплексирования измерительных каналов, когда по команде МК через модуль ввода/вывода открывается гидравлический клапан измерительного канала 1 и промышленная проточная кювета заполняется исследуемым объектом. Измерительная информация сохраняется в ПК, после чего МК по интерфейсу RS-485 дает команду модулю ввода/вывода на закрытие гидравлического клапана измерительного канала 1 и открытие гидравлического клапана канала 2. Работа ИИС повторяется, пока не будут измерены и сохранены сигналы, соответствующие всем компонентам и бензинам.

Данная ИИС имеет низкое быстродействие, по сравнению с представленной выше ИИС, поскольку время измерений будет определяться транспортным запаздыванием в гидравлических линиях кюветы [4].

В первом случае длина кюветы определяется индивидуально для каждого компонента и смеси. Во втором случае необходимо подобрать такую длину оптического пути кюветы, которая для всех компонентов будет оптимальной.

Бензины в ИК области в спектре образуют полосы поглощения, а для получения максимальной информации с минимальной ошибкой измерения (3–5 отн. %) необходимо подобрать оптимальную длину пути кюветы таким образом, чтобы значения коэффициентов поглощения бензинов укладывались в интервале 0,3–1.

На практике длину пути кюветы выявляют экспериментально, заполняя кювету средней толщины 1 или 2 см тестовым компонентом или бензином. Если значения спектральных коэффициентов поглощения измеряемых жидкостей лежат в середине оптимального интервала (0,5–0,6), то длина оптического пути кюветы выбрана верно. Если значения спектральных коэффициентов поглощения измеряемых жидкостей выходят за пределы оптимального интервала, то проверяют соответствие измерений с кюветами меньшей или большей длины оптического пути [5].

Для решения задачи определения истинного спектра поглощения целесообразно применить метод некорректного решения задач при спектральном анализе [6], который сводится к решению интегрального уравнения относительно функции распределения плотности числа частиц и функции экспериментального спектра (пропуская излучение через измерительную аппаратуру).

Применение закона Бугера – Ламберта – Бера для расчета оптимальной длины пути кюветы для многокомпонентных смесей

Для выбора оптимальной длины оптического пути кюветы проверяют выполнение закона Бугера – Ламберта – Бера, в соответствии с которым спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda_i)$ для *m*-компонентной смеси определяется по формуле

$$\tau(\lambda_i) = e^{-L\sum_{j=1}^{m} k_j(\lambda_i)c_j},$$
(1)

где L – длина оптического пути кюветы; $k_j(\lambda_i)$ – спектральный коэффициент поглощения *j*-го компонента на *i*-й длине волны; c_j – концентрация *j*-го компонента. Здесь оптические коэффициенты являются функцией длины волны падающего излучения.

Изменение спектрального коэффициента пропускания бензина на *i*-й длине волны связано с изменением концентрации *j*-го компонента и определяется как дифференциал функции (1) по концентрации *j*-го компонента:

$$\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial c_i} = -k_j(\lambda_i) L e^{-L \sum_{j=1}^{k} k_j(\lambda_i) c_j}.$$
(2)

Очевидно, что чем больше $\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial c_j}$, тем меньше ошибка измерения.

Зная, что спектральный коэффициент пропускания зависит от коэффициента поглощения и длины оптического пути кюветы ($\Delta \tau(\lambda_i) = f(\Delta k(\lambda_i), \Delta L)$), получаем выражение

$$\Delta \tau(\lambda_i) = f(\sqrt{\Delta k(\lambda_i)^2 + \Delta L^2}).$$
(3)

Величины коэффициента поглощения и оптической плотности независимы, продифференцируем функцию (3) по двум показателям:

$$d\tau(\lambda_i) = \frac{\partial(e^{-k(\lambda_i)L})}{\partial k(\lambda_i)} dk(\lambda_i) + \frac{\partial(e^{-k(\lambda_i)L})}{\partial L} dL , \qquad (4)$$

где $\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)} = L \cdot e^{-k(\lambda_i)L}$ – дифференциал по коэффициенту поглощения, $\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial L} = k(\lambda_i) \cdot e^{-k(\lambda_i)L}$ –

дифференциал по оптической длине пути кюветы.

Подставим дифференциалы (5) и (6) в выражение (4):

$$d\tau(\lambda_i) = -Le^{-k(\lambda_i)L}dk(\lambda_i) - k(\lambda_i)e^{-k(\lambda_i)L}dL.$$
(5)

На основе этих выражений построен ряд кривых для различных стандартных размеров кювет 1–100 мм. Для удобства использования этих кривых при коэффициентах поглощения на различных длинах волн по оси ординат отложено отношение $\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)}$.

Оптимальной длиной кюветы является значение L, при котором максимальное приращение $d\tau(\lambda_i)$ соответствует максимальному приращению $dk(\lambda_i)$. Данное условие соответствует наибольшему значению графика, которое находится производной первого порядка.

Линия оптимума определяется производной первого порядка, приравненной к нулю

$$\left(\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)}\right) = 0 \text{ . Tогда: } k(\lambda_i) \cdot L \cdot e^{-k(\lambda_i)L} - e^{-k(\lambda_i)L} = 0 \text{ , } k(\lambda_i) \cdot L = 1 \text{ . Откуда}$$

$$L = \frac{1}{k(\lambda_i)}.$$
(6)

Из выражений (1) и (6) следует, что спектральный коэффициент пропускания исследуемого объекта в рабочем диапазоне длин волн будет определяться величиной, обратной экспоненте, и примерно равен 0,37 ($\tau(\lambda_i) = \frac{1}{e} \approx 0,37$)[5], при этом ошибка измерения будет минимальной.

Исследования спектров поглощения бензинов

Для исследования значений спектральных коэффициентов поглощения бензинов и его компонентов в зависимости от длины оптического пути кюветы выбран ближний ИК диапазон длин волн 1080–1230 нм, поскольку здесь имеют место зависимости спектрального поглощения бензина от его химического состава и от октанового числа, а интенсивность поглощения бензина на *i*-й длине волны определяется процентным содержанием в смеси соответствующего компонента. В табл. 1 представлены значения спектральных коэффициентов компонентов (*n*-гептан, изооктан, толуол, бензол) [7] и бензинов с различным процентным содержанием этих компонентов: А-80 (*n*-гептан – 19 %, изооктан – 76 %, толуол – 5 %, бензол – 0 %), АИ-92 (*n*-гептан – 10 %, изооктан – 83 %, толуол – 8 %, бензол – 0 %), АИ-95 (*n*-гептан – 5 %, изооктан – 84 %, толуол – 0 %, бензол – 11 %), АИ-98 (*n*-гептан – 3 %, изооктан – 78 %, толуол – 0 %, бензол – 19 %).

На рис. 3 представлены графики зависимости коэффициента пропускания бензина АИ-92 от длины пути кюветы, построенные по стандартному набору кювет от 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50 и 100 мм.

Таблица 1

Длина волны,	К	оэффициент компонен	г поглощени гов $k_j(\lambda_i)$	ІЯ	Коэффиц	иент поглог	цения смесе	й $k_{_{\rm CM}}(\lambda_i)$
HM	п-гептан	изооктан	толуол	бензол	A-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
1080	0,004	0,001	0,002	0,03	0,0017	0,0013	0,0041	0,004
1090	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
1100	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
1110	0,011	0,015	0,0125	0,042	0,0141	0,0145	0,0175	0,0176
1120	0,014	0,02	0,1	0,2	0,0228	0,0251	0,0376	0,0378
1130	0,049	0,05	0,325	0,5625	0,0636	0,0692	0,1012	0,1012
1140	0,075	0,125	1,15	1,9	0,1663	0,1923	0,2995	0,301
1150	0,3	0,3625	1,2	1,2	0,3919	0,4155	0,4425	0,4444
1160	0,345	0,4375	0,45	0,2875	0,4196	0,4301	0,4169	0,4197
1170	0,5125	0,6	0,3375	0,1625	0,5694	0,5738	0,551	0,5536
1180	0,75	0,8875	0,413	0,075	0,8363	0,8419	0,798	0,8021
1190	1,6	1,65	0,6	0,0625	1,5875	1,572	1,4883	1,4898
1200	1,45	1,35	0,45	0,0132	1,325	1,296	1,2223	1,2193
1210	1,78	0,7102	0,161	0,0126	0,8967	0,7680	0,7046	0,6725
1220	1,2	0,55	0,629	0,0116	0,6839	0,6140	0,5352	0,5157
1230	0.55	0.3	0.0612	0.0112	0.3381	0 3058	0 2861	0 2786

Спектральные коэффициенты поглощения компонентов и бензинов





Рис. 3. График зависимости спектральных коэффициентов пропускания от длины кюветы *L* для смеси АИ-92: *а* – график с длиной пути 1–100 мм; *б* – график с длиной пути 1–3 мм

Линия оптимума определяется по формуле (6), при этом значение коэффициента пропускания на каждой длине волны равно 0,37.

Рабочий диапазон пропускания спектрометров, в котором ошибка изменений минимальна, составляет 20–90 %. Поэтому длина кюветы при проведении количественного анализа

выбирается такой, чтобы значения коэффициентов пропускания бензинов с минимальным и максимальным содержанием анализируемого компонента не выходили за пределы рабочего интервала шкалы пропускания спектрометра.

Значение длины оптического пути кюветы, удовлетворяющее условию оптимума, составляет 3 мм.

Зная длину кюветы, находим коэффициент поглощения по формуле

$$k(\lambda_i) = -\frac{\ln \tau(\lambda_i)}{L}.$$
(7)

Определим спектральные коэффициенты поглощения $k(\lambda_i)$ для товарных бензинов, учитывая линию оптимума с длиной кюветы 3 мм (табл. 2).

Таблица 2

	$k(\lambda_i)$	$k(\lambda_i)$	$k(\lambda_i)$	$k(\lambda_i)$
длина волны, нм	A-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
1110	0,0017	0,0039	0,0257	0,0049
1120	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1130	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1140	0,0141	0,0148	0,0375	0,0173
1150	0,0228	0,0998	0,1840	0,0442
1160	0,0636	0,3169	0,5237	0,1245
1170	0,1663	1,1103	1,7760	0,3792
1180	0,3919	1,1246	1,1925	0,4962
1190	0,4196	0,4375	0,3123	0,4049
1200	0,5694	0,3489	0,1916	0,5194
1210	0,8363	0,4320	0,1310	0,7429
1220	1,5875	0,6569	0,1542	1,3984
1230	1,3250	0,5004	0,0881	1,1620

Коэффициент поглощения бензинов при L = 3 мм

Отсюда следует, что потери, вносимые бензином в работу оптического тракта ИИС, будут лежать в диапазоне 0,78–2,78 дБ. Эта информация необходима для энергетического расчета оптического тракта ВОИУС.

Таким образом, определен теоретический расчет оптимальной длины пути кюветы, который показал хорошую сходимость теоретических и экспериментальных результатов исследования товарных бензинов и его компонентов. Наиболее оптимальная длина кюветы составляет 3 мм, при этом поглотится излучения, пройдя кювету, наполненную бензином, не более 9,3 %, а рабочий интервал коэффициентов пропускания спектрометра составит 0,3 – 1. В данном случае ошибка измерений будет составлять от 1,25 до 3,13 %, что позволит идентифицировать компоненты, определить состав и детонационную стойкость бензинов по спектральным коэффициентам поглощения компонентов и бензинов в режиме реального времени.

Заключение

В данной статье обоснована структура ИИС для оценки состава и детонационной стойкости топлива путем расчета оптимальной длины оптического пути кюветы. Результаты показали, что длина оптического пути кюветы не должна превышать 3 мм. В работе предложена математическая модель обработки спектров поглощения компонентов и бензинов, причем точность измерений и необходимая достоверность идентификации компонентов и точность определения состава бензинов будет определяться калибровкой измерительного канала ИИС [8]. Предлагаемая ИИС с проточными кюветами позволит в режиме реального времени управлять процессами смешения нефтепродуктов. В связи с этим были определены перспективные направления совершенствования информационно-измерительной системы (ИИС) для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости товарного топлива, которая в автоматизированном режиме будет анализировать спектры поглощения бензинов и его компонентов.

Библиографический список

- 1. Bakeev, K. A. Process Analytical Technology / K. A. Bakeev. Blackwell Publishing Ltd, 2005. 445 c.
- 2. *Куляс, М. О.* Оптоэлектронные спектрометрические устройства измерения октанового числа бензинов : дис. ... канд. техн. наук / Куляс М. О. Самара, 2000. 166 с.
- 3. Щербакова, А. А. Промышленная система измерения спектральных коэффициентов поглощения бензинов в технологических линиях / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев // Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 3 (28). – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN315.pdf
- Щербакова, А. А. Информационно-измерительная система определения состава и октанового числа бензинов в промышленных условиях на основе параметрического квантового генератора / А. А. Щербакова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 38–42.
- 5. Вечкасов, И. А. Приборы и методы анализа в ближней инфракрасной области / И. А. Вечкасов, Н. А. Кручинин, А. И. Поляков, В. Ф. Резинкин. – Москва : Химия, 1977. – 280 с.
- 6. *Тихонов, А. Н.* Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. Москва : Наука, 1979. 285 с.
- Веснин, В. Л. Характерные особенности спектров поглощения бинарных смесей углеводородов в области длин волн 1090–1240 нм на примере изооктана, п-гептана, толуола, бензола / В. Л. Веснин, В. Г. Мурадов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 3. С. 29–32.
- Шербакова, А. А. Искусственная нейронная сеть для идентификации компонентов, определения состава топлива по спектральным коэффициентам поглощения / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев, Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 3 (35). С. 36–45.

References

- 1. Bakeev K. A. Process Analytical Technology. Blackwell Publishing Ltd, 2005, 445 p.
- Kulyas M. O. Optoelektronnye spektrometricheskie ustroystva izmereniya oktanovogo chisla benzinov: dis. kand. tekhn. nauk [Optoelectronic spectrometric devices for measuring the octane number of gasoline: dis... cand. tech. sciences]. Samara, 2000, 166 p. [In Russian]
- 3. Shcherbakova A. A., Solov'ev V. A. *Naukovedenie* [Science of science]. 2015, vol. 7, no. 3 (28). Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN315.pdf [In Russian]
- 4. Shcherbakova A. A. Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 38–42. [In Russian]
- 5. Vechkasov I. A., Kruchinin N. A., Polyakov A. I., Rezinkin V. F. *Pribory i metody analiza v blizhney infrakrasnoy oblasti* [Instruments and methods of analysis in the near infrared]. Moscow: Khimiya, 1977, 280 p. [In Russian]
- 6. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
- 7. Vesnin V. L., Muradov V. G. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2009, vol. 11, no. 3, pp. 29–32. [In Russian]
- Shcherbakova A. A., Solov'ev V. A., Artamonov D. V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 3 (35), pp. 36–45. [In Russian]

Щербакова Анна Алексеевна

программист, кафедра приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: anutka7790@mail.ru

Полосин Виталий Германович доктор технических наук, профессор, кафедра медицинской кибернетики и информатики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Shcherbakova Anna Alekseevna

programmer, sub-department of instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Polosin Vitalij Germanovich

doctor of technical sciences, professor, sub-department of medical cybernetics and informatics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Морозова Мария Николаевна

инженер-электроник, кандидат технических наук, научно-технический центр – 2, НПП «Рубин» (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2) E-mail: anutka7790@mail.ru

Morozova Mariya Nikolaevna

electronics engineer, candidate of technical sciences, scientific and technical center – 2, NPP «Rubin» (2 Baidukova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Щербакова, А. А. Расчет оптимальной длины оптического пути проточной кюветы в информационно-измерительной спектрометрической системе исследования бензинов / А. А. Щербакова, В. Г. Полосин, М. Н. Морозова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 14–22. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-2. УДК 504.064.36

О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, В. В. Шерстнев, А. Н. Спиркин, В. О. Трилисский

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

O. E. Bezborodova, O. N. Bodin, V. V. Sherstnev, A. N. Spirkin, V. O. Trilisskiy

PRINCIPLES OF CREATING AN INTELLECTUAL INFORMATION MEASURING AND MANAGING SYSTEM OF COMPLEX MONITORING OF THE CONDITION OF TERRITORIAL TECHNOSPHERE

Аннотация. Актуальность и цели. Анализ современных концепций экологического мониторинга (ЭМ) показал недостаточность традиционного подхода для обеспечения экологической безопасности территории. Существующие системы ЭМ не выполняют функцию анализа и управления качеством окружающей среды (ОС) и не интегрированы в единую сеть, поэтому проводят локальные измерения, для анализа и оценки которых необходимы дополнительное время, специалисты, административные ресурсы. Поэтому необходима система комплексного мониторинга (КМ) состояния территориальной техносферы (ТТ), выполненная на основе информационно-измерительной и управляющей системы (ИИиУС). Она предоставляет широкие возможности не только для проведения мониторинга ОС, но и выполняет функции диагностики ее качества, идентификации источников и факторов воздействия, сбора, анализа и представления информации в форме перечня мероприятий для лица, принимающего решения (ЛПР), чтобы сформировать управляющее воздействие. Целью работы является разработка функциональной схемы ИИиУС КМ состояния ТТ, реализующей все перечисленные функции. Материалы и методы. Для ее достижения сформулированы и обоснованы принципы построения ИИиУС КМ состояния ТТ, являющиеся основой концепции КМ состояния ТТ: аксиоматически-дедуктивный, интеллектуальности, свертывания гетерогенной информации (СГИ), моделирования и визуализации, необходимости и возможности коррекции (НиВК). Результаты и выводы. Результатом работы являются совокупность принципов и реализованная на их основе ИИиУС КМ состояния ТТ, которая может быть использована в качестве фундаментальной основы для создания территориальной системы комплексного мониторинга.

A **b** s **t r** a **c t**. *Background*. The analysis of modern concepts of environmental monitoring (EM) showed the insufficiency of the traditional approach to ensure the environmental safety of the territory. Existing EM systems do not perform the function of analysis and management of environmental quality (EQ) and are not integrated into a single network, so they conduct local measurements, for the analysis and evaluation of which additional time, specialists, administrative resources are needed. Therefore, a system of integrated monitoring (KM) of the state of the territorial technosphere (TT), made on the basis of information-measuring and control

© Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Шерстнев В. В., Спиркин А. Н., Трилисский В. О., 2019

23

system (IMCS). It provides ample opportunities not only for monitoring the EQ, but also performs the functions of diagnostics of its quality, identification of sources and factors of influence, collection, analysis and presentation of information in the form of a list of activities for the decision-maker to form a control action. The aim of the work is to develop a functional scheme of the IMCS KM state of the TT implementing all these functions. *Materials and methods*. To achieve it, the principles of construction of the IMCS KM state of TT, which are the basis of the concept of KM state of TT: axiomatic-deductive, intelligence, coagulation of heterogeneous information, modeling and visualization, the need and possibility of correction are formulated and justified. *Results and conclusions*. The result of the work is a set of principles and implemented on their basis IMCS KM state of TT, which can be used as a fundamental basis for the creation of a territorial system of integrated monitoring.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, комплексный мониторинг, территориальная техносфера, принципы.

K e y w o r d s: information-measuring and control system, comprehensive monitoring, territorial technosphere, principles.

Введение

Происходящие в современном мире чрезвычайные ситуации (ЧС) и связанные с ними угрозы всему сообществу породили проблему международной и национальной экологической безопасности. С точки зрения ведущих мировых экспертов по безопасности определение безопасности в его традиционном понимании (военная, политическая и экономическая угрозы национальному суверенитету) должно быть расширено за счет включения в него экологической составляющей. Главное в обеспечении экологической безопасности – предотвращение ЧС экологического характера как условие выживания человечества. Это требование устанавливает прямую связь между контролем качества ОС (мониторингом) и безопасностью человечества и возлагает на каждое государство обязанность осуществлять деятельность так, чтобы исключить экологические угрозы на всех уровнях функционирования.

КМ состояния ОС должен быть ориентирован на решение актуальных общечеловеческих экологических проблем, связанных с изменением качества ОС в результате функционирования объектов техносферы и вызываемых ими ЧС. Современный КМ состояния ТТ должен базироваться на достижениях биологических, физических, химических и технических наук, быть компьютеризированным и автоматизированным и осуществляться на основе ИИиУС.

Актуальность

Впервые идеи контроля за состоянием ОС, измененной техносферой, были озвучены на конференции ООН по проблемам окружающей среды в 1972 г. в Стокгольме. Группа ученых, возглавляемая профессором Гильбертом Уайтом [1], предложила проводить целенаправленные наблюдения за изменением состояния ОС, которые получили название «Экономический мониторинг». В Советском Союзе исследование техногенного влияния на ОС проводили группы ученых под руководством И. П. Герасимова и Ю. А. Израэля [2].

Общая теория мониторинга ОС, обоснование и определение основных принципов и связанных с ними понятий изложены в основополагающих работах И. П. Герасимова, Ю. А. Израэля, Ф. Я. Ровинского, В. Е. Соколова и других исследователей. У каждой из этих групп была своя концепция ЭМ (табл. 1) [3–8].

Постановка проблемы

Практика показала, что система ЭМ, предложенная Ю. А. Израэлем [5,6] и имеющая своей целью проведение эффективного контроля за поступлением загрязняющих веществ и составлением на основе многолетних наблюдений эффективного прогноза, является наиболее перспективной. И именно по такой схеме (рис. 1) созданы системы ЭМ различного уровня у нас в стране.

Таблица 1

Автор	Содержание	Предмет	Уровни (этапы)	Ogyopung bulleting
концепции	мониторинга	исследования	изучения	Основная функция
И. П. Герасимов	Наблюдения,	Совокупность	Биоэкологи-	Получение оперативной
(1975, 1982 гг.)	контроль	природных	ческий (санитарно-	информации о состоянии
[3, 4]		явлений,	гигиенический)	ОС и ее влиянии
		подверженная		на здоровье человека
		естественным и	Геоэкологический	Наблюдение за изменением
		антропогенным	(геосистемный)	состояния экосистем,
		динамическим		их преобразованием
		изменениям		из природных в природно-
				антропогенные
			Биосферный	Наблюдение за глобально-
			(глобальный)	фоновыми изменениями
				на планете
Ю. А. Израэль	Наблюдения,	Антропогенные	Наблюдения	Определить источники
(1977, 1984 гг.)	оценка,	изменения		воздействия, а также
[5, 6]	прогноз	биосферы		причины изменений
				в биосфере
			Оценка фактического	Оценить фактическое
			состояния	состояние биосферы
			Прогноз изменения	Выявить тенденции
			биосферы	изменения, дать прогноз
			Оценка прогноза	Оценить будущее состояние
				биосферы
А. Г. Емельянов	Наблюдения	Компоненты ОС	Гидрометеорологи-	Учет связей между
(1984 г.) [7]			ческий	отраслевыми звеньями
			Гидрогеологический	системы мониторинга;
			Геохимический	функциональное
			Биологический	подчинение геосистемному
				мониторингу других видов
				мониторинга
В. К. Епишин и	Наблюдения,	Природные	Контроль	Управление качеством ОС
В. Т. Трофимов	оценка,	и геологические	и управление	за счет систем инженерной
(1985 г.) [8]	прогноз,	среды		защиты
	управление			



Рис. 1. Блок-схема системы экологического мониторинга (по Ю. А. Израэлю, 1984)

Приведенная на рис. 1 система ЭМ не включает управление (регулирование) качеством ОС, поэтому в ней не реализованы функции автоматизации контроля параметров качества ОС, применения полученной информации для принятия решений, оперативного регулирования качества ОС. Очевидно, что для повышения эффективности управления качеством ОС необходима ИИиУС КМ состояния TT.

Разработка концепции КМ состояния ТТ направлена на:

– преобразование существующих систем ЭМ в ИИиУС КМ состояния TT различных уровней;

 – определение принципов ее построения с использованием современных средств и технологий сбора, обработки и представления информации;

 – осуществление мероприятий, направленных на интеграцию имеющихся информационных ресурсов в единую ИИиУС КМ состояния ТТ, включающую базу данных о состоянии ОС;

 повышение уровня и эффективности использования результатов КМ состояния ТТ для принятия управленческих решений.

Теория

Для перехода на качественно новый уровень ЭМ необходимо развитие теоретических положений, наличие математических моделей, описывающих функционирование ИИиУС КМ и наглядное представление состояния TT.

Комплексный мониторинг – это постоянно действующая система сбора, обработки и использования информации об изменении факторов и условий устойчивости, состава, свойств, структуры и функционирования объектов различного происхождения при различных техногенных воздействиях, имеющая контрольные, прогнозно-диагностические и управленческие цели.

Для сближения классического (по Ю. А. Израэлю) и предлагаемого подходов авторы используют предложенный в работе [9] метод. Согласно выводам американского ученого Т. Куна теория остается принятой научным сообществом до тех пор, пока не подвергается сомнению основная ее идея, по образцу которой организуется исследовательская практика ученых в данной области знаний в определенный исторический период. Согласно парадигме Т. Куна, примененной к ЭМ, концепция мониторинга ОС развивается по схеме, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Парадигма Т. Куна, примененная к ЭМ

По мнению авторов, КМ состояния ТТ должен основываться на принципах: аксиоматически дедуктивном, интеллектуальности, свертывания гетерогенной информации (СГИ), моделирования и визуализации, необходимости и возможности коррекции (НиВК).

Аксиоматически дедуктивный принцип. КМ состояния TT находится на стыке дисциплин, и междисциплинарный характер накладывает свой отпечаток на аксиоматику, лежащую в основе функционирования предлагаемой ИИиУС. Аксиомы постулируются в экологии, теории систем, измерительной технике и информатике. Суть аксиоматически дедуктивного принципа заключается в декомпозиции TT на однородные в функциональном смысле объекты, анализ и математическое описание которых ограничиваются только явлениями, происходящими в этих объектах, и не представляет существенных затруднений.

Принцип Ле Шателье – Брауна применим к ТТ как термодинамической системе, находящейся в неравновесном состоянии и выводимой из состояния равновесия не только внешним воздействием, но и под влиянием изменений, возникающих в самой техносфере [10].

При рассмотрении TT как термодинамической системы ее состояние будет определяться состояниями объектов территориальной техносферы (ОТТ), входящих в ее состав: техногеника, окружающая среда, социум (рис. 3).

ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ТЕХНОСФЕРА





Целью использования модели TT является разработка управляющего воздействия для каждого ОTT, входящего в ее состав, которое позволяет сохранять динамическое равновесие внутри TT с приоритетным обеспечением экологической безопасности. Поскольку TT имеет три составляющие, то в результате декомпозиции сложного объекта образуются однородные в функциональном смысле объекты: техногеника, социум и окружающая среда (биосфера), т.е. все ОTT находятся под воздействием термодинамических потоков, что и составляет основу функционирования TT.

На рис. 3 ТТ представлена как открытая система, обменивающаяся с окружающим ее пространством (другими ТТ) веществом (M_x) и энергией (E_x). Изменение энтропии в ТТ может происходить либо за счет процессов обмена с внешней средой (d_eS), либо за счет возникновения энтропии в самой ТТ вследствие внутренних необратимых изменений (d_iS).

Общее изменение энтропии TT (dS):

$$dS = d_{\rho}S + d_{i}S$$
.

В этом состоит исходное положение термодинамики необратимых процессов. Если внутри TT протекают обратимые изменения, то они не сопровождаются возникновением энтропии и $d_i S = 0$. В случае необратимых изменений $d_i S > 0$.

Если в ОТТ одновременно протекают различные необратимые процессы, то величина $d_i S > 0$ описывает приращение энтропии, являющееся следствием взаимодействия этих необратимых процессов друг с другом.

Скорость изменения энтропии TT dS/dt равна сумме скорости обмена энтропией между TT и окружающим пространством и скорости возникновения энтропии внутри TT (термодинамический постулат Пригожина И. Р.):

$$dS / dt = d_{e}S / dt + d_{i}S / dt$$
.

По определению $d_iS/dt > 0$, но если внутренние процессы в TT будут обратимыми и равновесными, то $d_iS/dt = 0$, а слагаемое d_eS/dt может быть как положительным, так и отрицательным. Приведенное выше уравнение Пригожина И. Р. описывает энергетические процессы, происходящие в TT. Применение этого принципа к процессам в TT позволяет проводить прогнозирование ситуации, основываясь на ее описании как саморегулирующейся динамической системы.

Принцип интеллектуальности. Поведение любой системы ЭМ определяется целью ее функционирования, которая предъявляет совокупность требований к структуре и конструктивным возможностям такой системы. Эти возможности реализуются при организации базового алгоритма функционирования системы ЭМ. Цель функционирования системы ЭМ либо закладывается (привносится) изначально извне, при ее создании, и не изменяется в течение всего времени ее эксплуатации, либо может формироваться в самой системе ЭМ в зависимости от ее структуры. Привносимые цели функционирования присущи классическим системам ЭМ и чаще всего реализуются через конструктивную организацию системы ЭМ, а также за счет меняющегося программного управления.

Для ИИиУС КМ состояния TT характерно интеллектуальное поведение (по современным воззрениям это высший тип поведения), отличающееся тем, что ИИиУС КМ состояния TT самостоятельно определяет будущее целевое состояние совокупности «ИИиУС + ОТТ» и, используя собственные возможности, движется к целевому состоянию из текущего состояния.

Иначе говоря, если традиционное поведение системы ЭМ – это фиксация параметров создавшейся ситуации, то интеллектуальное поведение ИИиУС КМ состояния TT – это организация новой целевой ситуации на основе анализа, прогнозирования и планирования, исходя из текущей ситуации и имеющихся возможностей самой ИИиУС. Интеллектуальное поведение ИИиУС КМ состояния TT реализуется использованием мультиагентных технологий.

Принцип свертывания гетерогенной информации (СГИ) многопараметрического объекта (МПО). СГИ – это совокупность операций аналитико-синтетической переработки измерительной информации, преследующих цель выразить содержание исходной информации в более краткой форме при сохранении или некотором уменьшении его информативности.

Оно дает параметр, изменение которого указывает на увеличение или уменьшение величины, характеризующей совокупность значимых свойств МПО.

Методология СГИ опирается на научное и интуитивное определение понятия качества МПО. Результатом СГИ является коэффициент, который фиксирует изменение качества МПО, а не абсолютное значение уровня качества. СГИ предполагает процедуру «нормировки» результатов измерений, т.е. их корректировку в соответствии с некоторыми математическими функциями преобразования, с целью сделать более удобными для сравнения. По таким коэффициентам отслеживают изменения качества МПО от одной временной и пространственной точки к другой.

Количественно коэффициент СГИ рассчитывается по формуле

$$d_i = \left(C_i - F_i\right) / \Pi Д \mathcal{Y}_i,$$

где C_i – измеренное значение параметра; i – номер параметра; ПДУ_i – предельно допустимый уровень (ПДУ) значения параметра; F_i – фоновое значение параметра.

В этом подходе легко построить комплексные коэффициенты СГИ:

$$\delta_i^{\text{KOMII}} = \sum_{j=1}^n p_j \cdot \delta_i,$$

где *p_j* – весовые коэффициенты для каждого конкретного коэффициента СГИ, определяемые, например, экспертной оценкой, причем

$$\sum_{j=1}^{n} p_j = 1.$$

Величина $\delta_i^{\text{комп}}$ является мерой изменения качества МПО, и если она увеличивается, то качество МПО ухудшается, и наоборот.

Для проведения дальнейшей оценки необходима шкала [11], связывающая количественное и качественное содержание коэффициента СГИ с целью последующей передачи полученной информации в систему принятия решений. Шкала является средством адекватного сопоставления и определения численных значений отдельных свойств и качеств различных объектов.

Для оценки состояния МПО предпочтительной является шкала порядков с фиксированными реперными (опорными) точками, с помощью которых классифицируются значения комплексных коэффициентов СГИ. Достоинством шкалы порядка является то, что с ее помощью инструментально не измеряемые величины (комплексных коэффициентов СГИ) можно оценить и качественно, и количественно.

Принцип моделирования и визуализации. Моделирование как метод научного познания является наилучшим способом изучения ТТ. Оно основывается на создании моделей, отражающих все необходимые для исследования свойства исследуемых объектов. Основная сложность моделирования заключается в обеспечении достоверности математических расчетов, так как математическая модель должна быть точно приближена к реальному поведению исследуемого объекта.

Помимо этого, результаты моделирования необходимо представить в визуальном виде, удобном для зрительного восприятия. Визуализация – способ представления информации в виде структурных схем, карт, 3D-моделей и т.д. – является важным этапом в моделировании. Ее главной функцией является обеспечение удобного представления результатов моделирования для зрительного наблюдения и анализа. Благодаря ей лицо, принимающее решение (ЛПР), может быстро обнаружить особенности, выявить закономерности и аномалии в больших объемах информации. Компьютерная графика позволяет отобразить результаты моделирования в удобной для восприятия ЛПР форме.

Принцип необходимости и возможности коррекции. Сущность принципа заключается в выборе порядка шкалы, дающего временную возможность ЛПР при необходимости успеть осуществить корректирующие действия, направленные на восстановление равновесного состояния МПО. Учитывая, что для качественной оценки ТТ как МПО используются значения ПДУ, их необходимо пронормировать так же, как и результаты измерений, и сформировать диапазоны значений, разделенные реперными точками.

Если при оценке в традиционной системе ЭМ существует только одна реперная точка, соответствующая значению ПДУ, то с учетом необходимости и возможности коррекции в каждом из диапазонов допустимых значений необходимо установить еще несколько реперных точек, устанавливающих предупредительные границы, позволяющие заранее реагировать на изменение значений комплексных коэффициентов СГИ и вовремя осуществить корректирующие действия.

Особенностью описанных выше принципов является совокупность свойств, характеризующих их как основу научной концепции. Совокупность и содержание принципов КМ состояния ТТ обусловлены структурой, функциями и сферой применения реализующей его ИИиУС. Это значит, что ИИиУС КМ состояния ТТ функционирует не произвольно, а в соответствии с объективными требованиями, которые отражаются в системе нормативных правовых актов и являются ее функциональной основой. Принципы любой концепции нельзя рассматривать отдельно от условий, структуры и содержания ИИиУС, которую они описывают. Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие свойства принципов КМ состояния TT:

 – научность – использование современных достижений науки при построении ИИиУС КМ состояния ТТ и обеспечения их функционирования;

- гибкость - адаптация ИИиУС к изменению целей, стратегий и тактики управления TT;

– эффективность – оптимизация затрат на формирование и функционирование ИИиУС КМ состояния ТТ;

– системность – формирование совокупности измеряемых параметров с учетом всех воздействий, оказывающих влияние на ОТТ;

 – соответствие – совместимость системы и методологии КМ состояния ТТ с административной системой региона или предприятия и технологиями принятия управленческих решений.

Практическая реализация

На рис. 4 приведена функциональная схема ИИиУС КМ состояния ТТ, состоящая из подсистем диагностики (прогнозирования) 1, сбора информации 2, идентификации 3, поддержки принятия решения 4 и накопления, хранения и управления информацией 5.

Подсистема 1 является центральной в ИИиУС КМ состояния TT, результатом ее работы являются данные о зонах возможного опасного загрязнения ОТТ по какому-либо загрязняющему веществу или территории распространения. Опасное загрязнение территории в данном случае рассматривается как доля, не превышающая 70 % ПДУ хотя бы по одному загрязняющему веществу, и является уровнем активации подсистемы (2).

Для работы подсистемы 1 необходимы данные о параметрах микроклимата (скорость ветра, его направление и температура ОС в данный момент времени). Эти данные подсистема 1 получает от подсистемы 2 через подсистему 5.

После работы подсистемы 2 определяется соответствие прогнозируемой ситуации реальному уровню воздействия (при наличии хотя бы одной зоны с вычисленным значением уровней воздействия 0,7 ПДК и более хотя бы по одному параметру), получаемому в результате проводимых измерений с помощью мобильной лаборатории. При уровне воздействия выше предполагаемого (вычисленного) происходит включение работы подсистемы 3.

Особенность подсистемы 3 заключается в том, что идентификация параметров воздействия на ОС происходит дистанционно (вне санитарно-защитной зоны предприятия). Определение параметров осуществляется для всех источников, влияющих на зону с опасным уровнем воздействия.

Задача подсистемы 4 – сформировать список возможных решений с их обоснованием и определить наименьшее суммарное ограничение параметров функционирования ОТТ с учетом всей совокупности воздействий. В основе работы данной подсистемы 4 лежит метод определения необходимости корректировки уровня воздействий, на базе которого определяется степень требуемой корректировки и формируются возможные решения по длительности и видам применяемых технологических режимов на ОТТ со стационарными источниками, которые позволят снизить воздействия на ОС. Также в долгосрочной перспективе определяется возможность снижения воздействий за счет проведения плановых мероприятий.



Рис. 4. Функциональная схема ИИиУС КМ состояния ТТ

Заключение

Существующая система ЭМ выполняет только измерения концентраций различных загрязняющих веществ и не содержит механизм оперативного управления качеством ОС. Кроме того, существует ряд проблем, связанных с техническим оборудованием станций мониторин-

га, их автономностью и недостаточным обеспечением аналитических лабораторий современными средствами измерений.

С учетом актуальности проблемы экологической безопасности указанные недостатки свидетельствуют о необходимости развития и модернизации системы ЭМ в России, внедрения автоматизированных систем непрерывного измерения и анализа уровней воздействий на ОС, разработки новых и пересмотра существующих методов измерения, а также совершенствования средств обработки, хранения и передачи информации.

Наиболее перспективными являются ИИиУС КМ состояния TT, основанные на совместном применении расчетных (прогностических) и инструментальных методов оценки состояния TT, а в качестве оценочных критериев используются не только нормативные правовые акты, но и комплексные параметры, основанные на СГИ и позволяющие оперативно принимать управляющие решения с использованием мультиагентных технологий.

Библиографический список

- 1. *Kates, R. W.* Gilbert F. White, 1911–2006, A Biographical Memoir / R. W. Kates. Washington, 2011. 25 p.
- Snytko, V. A. Environmental monitoring system in the scientific heritage of academics I. P. Gerasimov and Yu. A. Israel / V. A. Snytko, A. V. Sobisevich // Environmental status indication: theory, practice, education : Proceedings of the fifth international scientific and practical conference (Moscow, 30 November – 3 December 2017). – Moscow, 2017.
- 3. *Gerasimov, I. P.* Scientific basis of modern environmental monitoring / I. P. Gerasimov // Izvestiya USSR Academy of Sciences. Geography series. 1975. № 3. P. 13–25.
- 4. *Gerasimov, I. P.* Principles and methods of geosystem monitoring / I. P. Gerasimov // Izvestiya USSR Academy of Sciences. Geography series. 1982. № 2. P. 5–11.
- 5. *Israel, Yu. A.* Global observing system. Forecast and assessment of environmental changes. Monitoring basics / Yu. A. Israel // Meteorology and hydrology. 1974. № 7. P. 3–8.
- 6. *Israel, Yu. A.* About the program of complex background monitoring of the state of the environment / Yu. A. Israel, L. M. Filippova, F. Ya. Rovinsky // Meteorology and hydrology. 1978. № 9. P. 5–11.
- 7. *Emelyanov, A. G.* Comprehensive geo-ecological monitoring : studies'. benefit / A. G. Emelyanov. Tver : TGU, 1994. 88 p.
- Trofimov, V. T. Letanything content, structure, role of engineering Geology in its implementation / V. T. Trofimov, K. V. Epishin // Engineering Geology and geological environment : report of Soviet geologists at the XXVIII session of the International geological conference. – Moscow : VSEGINGEO, 1989. – P. 71–78.
- 9. Kuhn, T. Structure of scientific revolutions / T. Kuhn. Moscow : Science, 1975
- 10. *Tarko, A. M.* Stability of biosphere processes and Le Chatelier's principle / A. M. Tarko // Izvestiya USSR Academy of Sciences. 1995. Vol. 343, № 3. P. 393–395.
- Ecological indicator values and methods of analysis of ecological diversity of plants : monograph / L. A. Zhukova, Y. A. Dorogova, N. V. Turmuhametova, T. A. Polyanskaya, M. N. Gavrilova ; under editorship of L. A. Zhukova ; Mari State Univ. – Yoshkar-Ola, 2010. – 368 p.

References

- 1. Kates R. W. Gilbert F. White, 1911–2006, A Biographical Memoir. Washington, 2011, 25 p.
- Snytko V. A., Sobisevich A. V. Environmental status indication: theory, practice, education: Proceedings of the fifth international scientific and practical conference (Moscow, 30 November – 3 December 2017). Moscow, 2017.
- 3. Gerasimov I. P. Izvestiya USSR Academy of Sciences. Geography series. 1975, no. 3, pp. 13–25.
- 4. Gerasimov I. P. Izvestiya USSR Academy of Sciences. Geography series. 1982, no. 2, pp. 5–11.
- 5. Israel Yu. A. Meteorology and hydrology. 1974, no. 7, pp. 3–8.
- 6. Israel Yu. A., Filippova L. M., Rovinsky F. Ya. *Meteorology and hydrology*. 1978, no. 9, pp. 5–11.
- 7. Emelyanov A. G. Comprehensive geoecological monitoring: studies'. benefit. Tver: TGU, 1994, 88 p.
- 8. Trofimov V. T., Epishin K. V. Engineering Geology and geological environment: report of Soviet geologists at the XXVIII session of the International geological conference. Moscow: VSEGINGEO, 1989, pp. 71–78.
- 9. Kuhn T. Structure of scientific revolutions. Moscow: Science, 1975
- 10. Tarko A. M. Izvestiya USSR Academy of Sciences. 1995, vol. 343, no. 3, pp. 393-395.
- 11. Zhukova L. A., Dorogova Y. A., Turmuhametova N. V., Polyanskaya T. A., Gavrilova M. N. *Ecological indicator values and methods of analysis of ecological diversity of plants : monograph.* Yoshkar-Ola, 2010, 368 p.

Безбородова Оксана Евгеньевна

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

Бодин Олег Николаевич

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

Шерстнев Владислав Вадимович

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

Спиркин Андрей Николаевич

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

Трилисский Владислав Олегович

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

Bezborodova Oksana Evgenevna

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Sherstnev Vladislav Vadimovich

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

Spirkin Andrei Nikolaevich

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

Trilisskiy Vladislav Olegovich

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

Образец цитирования:

Принципы построения интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы комплексного мониторинга состояния территориальной техносферы / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, В. В. Шерстнев, А. Н. Спиркин, В. О. Трилисский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 23–32. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-3.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 519.2, 004.622, 004.056.53

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-4

В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Карпов, А. П. Юнин

УСЛОВИЯ КОРРЕКТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНТРОПИИ ОСМЫСЛЕННЫХ ДЛИННЫХ ПАРОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ СВЕРТОК ХЭММИНГА С ЭТАЛОННЫМИ ТЕКСТАМИ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ

V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, A. P. Karpov, A. P. Yunin

CONDITIONS FOR THE CORRECT CALCULATION OF THE ENTROPY OF MEANINGFUL LONG PASSWORDS IN THE HAMMING CONVOLUTION SPACE WITH REFERENCE TEXTS IN RUSSIAN AND ENGLISH

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является повышение корректности вычисления энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами, являющимися осмысленными легко запоминаемыми паролями на родном языке пользователя. Материалы и методы. Классические процедуры Шеннона не могут быть использованы, так как требуют использования огромного статистического материала. Для сокращения затрат вычислительных ресурсов используется отображение кодов в нормированное пространство сверток Хэмминга. Результаты. Показано, что результаты вычислений являются более корректными, если отказаться от побитного сложения по модулю 2 при вычислении сверток Хэмминга. Предложено использовать свертывание данных по модулю 8, так как кодирование паролей и эталонных текстов выполняется в 8-битной кодировке. Более того, корректное преобразование данных может быть выполнено только при использовании кода длинного пароля, свертываемого с эталонным текстом на родном языке пользователя. Выводы. В пространстве сверток Хэмминга легко вычислим прирост стойкости длинных легко запоминаемых паролей со смыслом к атакам подбора, возникающего из-за периодической смены регистра ввода длинного пароля.

A b s t r a c t. *Background*. The aim of the work is to increase the correctness of calculating the entropy of long codes with dependent bits, which are meaningful easily remembered passwords in the user's native language. *Materials and methods*. Since the classical Shannon procedures require the use of huge statistical material, they cannot be used in conditions of limited computing resources. To reduce the cost of computing resources, this paper uses code mapping in the normalized space of Hamming convolutions. *Results*. The authors show that the results of computing the entropy of codes are more correct if one refuses bitwise addition modulo two when computing Hamming convolutions. In the article, it is suggested to use the data collapsing on module 8, since the encoding of passwords and reference texts are performed in 8-bit encoding. Moreover, the correct data conversion can be performed only by using a long password code that is collapsed with the reference text in the user's native language.

© Волчихин В. И., Иванов А. И., Карпов А. П., Юнин А. П., 2019

Conclusions. In the Hamming convolution space, it is easy to calculate the increase in the persistence of long, easy-to-remember passwords with meaning to brute-force attacks that arise from the periodic change of the long-password input register.

К лючевые слова: энтропия длинных кодов с зависимыми разрядами, регуляризация вычислений, многообразие сверток Хэмминга, требования к перекодировке данных перед их свертыванием по Хэммингу.

K e y w o r d s: the Entropy of long codes with dependent digits, regularization of calculations, a variety of Hamming convolutions, requirements for transcoding data before Hamming clipping.

Проблема вычисления энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами

Если пытаться вычислять энтропию длинных кодов по Шеннону, то мы сталкиваемся с задачей экспоненциальной вычислительной сложности. Так, для кодов длинной 256 бит, полученных от программного генератора псевдослучайных чисел, возникает 2^{256} состояний. Произведение «Война и мир» в четырех томах Льва Толстого имеет 1640 страниц, 2000 знаков на странице дает 2^{22} знаков. Пользуясь как эталонным текстом русского языка произведением «Война и мир» по Шеннону, мы можем оценивать пароли длинной до 176 бит или 22 знака. Для оценки пароля длинной в 32 случайных знака потребуется 2^{130} произведений на русском языке размерами сопоставимыми с четырьмя томами «Войны и мира». Все оцифрованные русскоязычные источники не содержат такой объем информации. Даже если бы такой эталон русскоязычного текста существовал, его анализ на обычном современном компьютере может занять тысячи лет машинного времени.

Проблема состоит в том, что, руководствуясь Шенноном, приходится обрабатывать большие массивы данных и ждать появления редких событий. Положение меняется, если мы из пространства обычных кодов переходим в пространство расстояний Хэмминга [1–3]. Для кодов длиной 256 бит расстояний Хэмминга меняется в интервале $0 \le h \le 256$, итого 257 состояний:

$$h = 256 - \sum_{i=1}^{256} ("c_i") \oplus ("x_i"), \qquad (1)$$

где " c_i " – разряд кода длинного пароля; " x_i " – этот же разряд кода эталонного текста.

В работах [4–6] показано, что свертка Хэмминга может быть выполнена не только по модулю 2. Для того, чтобы обобщить результаты сверток и сделать их сопоставимыми, нормируем интервал, в котором могут меняться расстояния Хэмминга:

$$\tilde{h} = \frac{h}{\max(h)}.$$
(2)

В этом случае нормированные расстояния всех сверток Хэмминга всегда будут находиться в интервале от 0 до 1. Для примера на рис. 1 даны распределения нормированных расстояний Хэмминга для эталонных текстов на русском и английском языках.





$$-\log\left(\operatorname{pnorm}\left(\frac{1}{256}, 0.357, 0.032\right), 2\right) = 92.628 \text{ GHT}.$$

Если мы будем пытаться осуществить атаку, подбирая пароль на русском английскими фразами, то получим очень большую оценку энтропии

$$= \log\left(\operatorname{pnorm}\left(\frac{1}{256}, 0.439, 0.027\right), 2\right) = 192.661 \ 6\mathrm{HT}.$$

Смысл подобных оценок понятен, пароль на русском языке следует подбирать, пользуясь фрагментами текстов на русском языке.

Следует отметить, что приведенные выше оценки являются слишком оптимистичными. Это обусловлено тем, что при вычислениях мы не принимали в расчет 8-битную кодировку символов. Учет 8-битной структуры кодов ASCII приводит к необходимости вычислять сверт-ки Хэмминга по модулю 8

$$h_8 = 256 \cdot 32 - \sum_{i=1}^{32} ("c_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+8}") \oplus_8 ("x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+8}").$$
(3)

В итоге мы получаем более реалистичные распределения расстояний Хэмминга, приведенные на рис. 2.



Рис. 2. Распределение расстояний Хэмминга в 8-битной системе счисления со свертыванием данных по модулю 8

Оценка энтропии для осмысленного пароля на русском при его тестировании тоже на русском получается ниже:

$$-\log\left(\operatorname{pnorm}\left(\frac{1}{256\cdot 32}, 0.26, 0.045\right), 2\right) = 27.954 \quad 6_{\mathrm{HT}}.$$

Если мы такую же оценку выполняем применяя сочетания слов на английском, то получаем увеличение энтропии:

$$-\log\left(\operatorname{pnorm}\left(\frac{1}{256\cdot 32}, 0.514, 0.02\right), 2\right) = 482.228 \text{ GeV}.$$

И в том и в другом случае получаются гораздо более реалистичные оценки энтропии. И в двоичной и восьмеричной системах сверток Хэмминга мы наблюдаем дефект вычислений (неустойчивость метода), когда тестируем пароль на другом языке. В восьмеричной системе счисления этот дефект усилился.

Наличие этого дефекта связано с тем, что ASCII кодировки имеют компактное расположение кодов букв латиницы и кодов букв кириллицы. Оба этих алфавита имеют расстояние между центрами групп «латиницы» и «кириллицы» 224 – 96 = 128 (7 бит). Именно это обстоятельство и приводит к расхождению математических ожиданий расстояний Хэмминга распределений (см. рис. 1 и 2).

На величину стандартного отклонения распределения расстояний Хэмминга прежде всего влияет компактность кодировки групп символов (отсутствие разрывов между кодами). Как следствие, сделать процедуры вычисления сверток Хэмминга более устойчивыми удается перекодировками, которые ликвидируют пробелы между кодами в группах «латиница» для текстов на английском и «кириллица» для текстов на русском. Часто используемые в текстах знаки препинания должны иметь коды в группе символов в соответствии с вероятностью их появления в тексте. Группировка кодов и их упорядочивание по частоте появления символов являются мощными методами структурной регуляризации вычислений энтропии. Один из возможных примеров данных методов регуляризации вычисления энтропии является кодировка, приведенная в табл. 1.

Таблица 1

Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа
	0	Ь	18	0	36	Ъ	54
0	1	Ы	19	К	37	Р	55
e	2	Г	20	Л	38	Г	56
а	3	б	21	С	39	У	57
Н	4	Ч	22	Д	40	3	58
И	5	3	23	-	41	Φ	59
Т	6		24	И	42	Х	60
с	7	ж	25	П	43	Ш	61
л	8	й	26	Я	44	Щ	62
В	9	Ш	27	ф	45	Ж	63
р	10	Х	28	Т	46	Ц	64
К	11	Ю	29	М	47	«	65
,	12	Э	30		48	Ь	66
д	13	А	31	:	49	Ю	67
М	14	Щ	32	Ч	50	е	68
у	15	Ц	33	E	51	Й	69
П	16	В	34	Э	52	Ъ	70
Я	17	Н	35	Б	53	Ы	71

Таблица перекодировки групп символов «кириллица» для текстов на русском языке для регуляризации вычислений энтропии

На рис. 3 сопоставлены результаты вычисления распределения расстояний Хэмминга для нескольких осмысленных паролей на русском языке длиной 256 бит, в кодировке ASCII и оптимальной кодировке в соответствии с табл. 1.

Из рис. 3 видно, что вычисление распределения расстояний Хэмминга при тестировании паролей на русском языке, представленных в оптимальном коде, имеет ряд преимуществ перед вычислением расстояний Хэмминга этих же паролей, представленных в кодировке ASCII:

1. После замены кодировок исчезла мультимодальность распределения расстояний Хэмминга, что делает гипотезу нормальности данных корректной.

2. Видна методическая ошибка по вычислению математического ожидания в кодировке ASCII, которая устраняется в новой кодировке (математическое ожидание уменьшается, соответственно должна снижаться энтропия, что приближает оценки к классическим по Шеннону).

3. Примерно в 2 раза снижается стандартное отклонение, что эквивалентно значительному повышению устойчивости вычислений.


Рис. 3. Соотношение распределений расстояний Хэмминга в оптимальном коде и кодировке ASCII

Таким образом, оценку энтропии в пространстве сверток Хэмминга можно сделать еще более устойчивой, если осуществлять предварительную перекодировку символов ASCII по специальной кодировке, обеспечивающей минимизацию значения математического ожидания расстояний Хэмминга и их стандартного отклонения.

Библиографический список

- 1. *Иванов, А. И.* Оценка усиления стойкости коротких цифровых паролей (PIN кодов) при их рукописном воспроизведении / А. И. Иванов, О. В. Ефимов, В. А. Фунтиков // Защита информации. INSIDE. – 2006. – № 1. – С. 55–57.
- Малыгин, А. Ю. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
- ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.
- 4. Юнин, А. П. Оценка энтропии легко запоминаемых, длинных паролей со смыслом в ASCII кодировке для русского и английского языков / А. П. Юнин, О. В. Корнеев // Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора : тр. науч.-техн. конф. кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – Пенза, 2016. – Т. 10. – С. 40–42. – URL: http://пниэи.pф/activity/science/BIT/T10-p40.pdf
- 5. Волчихин, В. И. Многомерный портрет цифровых последовательностей идеального «белого шума» в свертках Хэмминга / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Юнин, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 4. С. 4–13.
- Иванов, А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции / А. И. Иванов. Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2016. 133 с. URL: http://пниэи.pd/activity/science/BOOK16.pdf

References

- 1. Ivanov A. I., Efimov O. V., Funtikov V. A. Zashchita informatsii. INSIDE [Information protection. INSIDE]. 2006, no. 1, pp. 55–57. [In Russian]
- Malygin A. Yu., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy testirovaniya* neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii [Fast algorithms for testing neural network mechanisms of biometric and cryptographic protection of information]. Penza: Izd-vo PGU, 2006, 161 p. [In Russian]
- GOST R 52633.3–2011. Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora [GOST R 52633.3–2011. Information protection. Information security techniques. Testing resistance means highly reliable biometric security to attacks selection]. [In Russian]

37

- 4. Yunin A. P., Korneev O. V. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora: tr. nauch.-tekhn. konf. klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy [Testing the resistance of highly reliable biometric protection to attacks of selection: tr. scientific.-tekhn. conf. cluster of Penza enterprises providing information technology security]. Penza, 2016, vol. 10, pp. 40–42. Available at: http://pniei.rf/activity/science/BIT/T10-p40.pdf [In Russian]
- Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Yunin A. P., Malygina E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. *Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 4, pp. 4–13. [In Russian]
- 6. Ivanov A. I. *Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programmnym vos-proizvedeniem effektov kvantovoy superpozitsii* [Multidimensional neural network processing of biometric data with software reproduction of quantum superposition effects]. Penza: Izd-vo AO «PNIEI», 2016, 133 p. Available at: http://pniei.pf/activity/science/BOOK16.pdf [In Russian]

Волчихин Владимир Иванович

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

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт (Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9) E-mail: pniei@penza.ru

Карпов Артем Павлович

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

Юнин Алексей Петрович

специалист, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт (Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9) E-mail: pniei@penza.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

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

Ivanov Aleksandr Ivanovich

doctor of technical sciences, professor, head of the laboratory, Penza Scientific Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Karpov Artem Pavlovich

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

Yunin Alexey Petrovich

specialist, Penza Scientific Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Условия корректного вычисления энтропии осмысленных длинных паролей в пространстве сверток Хэмминга с эталонными текстами на русском и английском языках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Карпов, А. П. Юнин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 33–38. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-4.

38

А. С. Колдов, А. В. Светлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

A. S. Koldov, A. V. Svetlov

DETERMINING OF NON-RESONANT FOUR-ELEMENT CIRCUIT PARAMETERS WITH USING OF AGGREGATE MEASUREMENTS METHOD

Аннотация. Цель работы. Разработка средств измерений параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей (ЭЦ) с минимальным числом аналоговых преобразований выходного сигнала измерительной цепи. Материалы и методы. Преобразования измерительных сигналов выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров определяются путем решения системы уравнений. Результаты. Приведены схемы измерительных цепей, рекомендации по выбору режимов измерений и расчетные соотношения для вычисления искомых параметров элементов цепей. Выводы. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность определения параметров четырехэлементных ЭЦ с использованием совокупного метода измерений.

A b s t r a c t. *Background*. Development of instruments for measuring parameters of nonresonant four-element circuit with a minimum number of analog transforms of the output signal of the measuring circuit. *Materials and methods*. Conversion of measuring signals are performed at the program level using the method of aggregate measurements, when the required parameter values are determined by solving a system of equations. *Results*. Scheme of measuring circuit, recommendations for the choice of measurement modes and calculated ratios to calculate the required parameters of the elements of the chains are given. *Conclusions*. The experimental studies results confirm the possibility of determining of non-resonant four-element circuit parameters with using of aggregate measurements method.

К лючевые слова: нерезонансная четырехэлементная электрическая цепь, совокупные измерения.

K e y w o r d s: non-resonant four-element circuit, aggregate measurements.

При описании электрических свойств полупроводниковых структур, диэлькометрических и кондуктометрических датчиков, а также многих других объектов используются многоэлементные, в частности четырехэлементные, эквивалентные электрические схемы [1–3]. Разработан ряд измерительных преобразователей [4–6] параметров многоэлементных электрических цепей (ЭЦ). К числу недостатков большинства известных измерительных преобразователей следует отнести сложность аппаратной реализации и невысокую точность из-за увеличения случайной погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований. Данная работа посвящена разработке средств измерений параметров нерезонансных четырехэлементных ЭЦ с минимальным числом аналоговых преобразований выходного сигнала измерительной цепи (ИЦ), осуществляющей преобразование сопротивления

исследуемой ЭЦ в напряжение. Выполняется единственное аналоговое преобразование: с помощью быстродействующих устройств выборки и хранения (УВХ) берутся отсчеты выходного напряжения ИЦ в характерные моменты времени переходного процесса в ИЦ после подачи импульсного тестового воздействия. После «оцифровки» с помощью АЦП выходных напряжений УВХ дальнейшие преобразования измерительных сигналов с целью получения информации о параметрах элементов ЭЦ выполняются на программном уровне с использованием метода совокупных измерений, когда искомые значения параметров элементов ЭЦ определяются путем решения системы уравнений, связывающих измеренные значения отсчетов выходного напряжения ИЦ и параметры постоянной, линейно и экспоненциально изменяющихся составляющих этого напряжения, функционально связанных с параметрами элементов ЭЦ [7].

Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть и способствовать повышению точности средств измерений.

Предложена методика совокупных измерений параметров нерезонансных четырехэлементных *RC*-, *RL*- и *RLC*-цепей (табл. 1), у которых переходный процесс в ИЦ носит апериодический характер, а выходное напряжение ИЦ не содержит гармонических колебательных составляющих.

Таблица 1



1. Выбирается место включения исследуемой ЭЦ: во входной цепи операционного усилителя (ОУ) или в цепи его отрицательной обратной связи.

2. Выбирается вид импульсного тестового сигнала (последовательности прямоугольных с амплитудой U_0 или треугольных с крутизной $\frac{U_0}{\tau_0}$ импульсов), исходя из возможности по-

лучения выходного напряжения ИЦ в виде совокупности постоянной составляющей, линейно изменяющейся составляющей и экспоненциально изменяющихся составляющих (спадающей либо возрастающей):

$$U_{\rm BLIX}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \qquad (1)$$

причем использование обобщенных *A*-параметров *A*₀, *A*₁, *A*₂, *A*₃, **τ** позволяет применять данную методику для целого ряда ЭЦ.

3. Выбирается амплитуда импульсов тестового сигнала и рассчитывается номинальное значение параметра опорного элемента. Выбираются моменты отсчетов t_1 , t_2 выходного

Measuring. Monitoring. Management. Control

2019, Nº 3 (29)

напряжения ИЦ на экспоненциальном участке переходного процесса и моменты t_{1y} и t_{2y} в установившемся режиме. Постоянная составляющая A_0 в (1) находится не путем непосредственного измерения начального значения $U(t_0)$ выходного напряжения ИЦ, а путем экстраполяции по значениям этого напряжения, измеренным в другие моменты времени t_1 и t_2 , где в меньшей степени сказывается неидеальность ОУ. Обычно $t_2 = 2 t_1$ [8].

4. На вход ИЦ подается опорное напряжение, измеряются отсчеты выходного напряжения ИЦ $U(t_1)$, $U(t_2)$, $U(t_{1y})$, $U(t_{2y})$, для которых составляется система уравнений в обобщенных A-параметрах, причем число уравнений должно быть равно числу искомых параметров ЭЦ. Устанавливаются соотношения между параметрами элементов ЭЦ и обобщенными A-параметрами. Для четырехэлементных нерезонансных ЭЦ системы могут быть составлены из уравнений одного из видов

$$U_{\rm BMX}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}); \qquad (2)$$

$$U_{\rm Bbix}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}};$$
(3)

$$U_{\rm BMX}(t) = A_{\rm I}t + A_{\rm 2}e^{-\frac{t}{\tau}} + A_{\rm 3}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$
(4)

Например, система, составленная из уравнений (2), имеет вид

$$\begin{cases} U(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_3 (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}); \\ U(t_2) = A_0 + A_1 t_2 + A_3 (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}); \\ U(t_{1y}) = A_0 + A_1 t_{1y} + A_3 (1 - e^{-\frac{t_{1y}}{\tau}}); \\ U(t_{2y}) = A_0 + A_1 t_{2y} + A_3 (1 - e^{-\frac{t_{2y}}{\tau}}). \end{cases}$$
(5)

В табл. 2 для каждой из четырехэлементных ЭЦ из табл. 1 приведены: схема ИЦ; вид тестового импульсного сигнала; характер сопротивления опорного элемента; вид выходного напряжения ИЦ в обобщенных *A*-параметрах; соотношения для вычисления искомых параметров элементов ЭЦ по найденным *A*-параметрам.

Таблица 2

Продолжение табл. 2

$\begin{bmatrix} 3 \end{bmatrix}$ $L_1 = \begin{bmatrix} L_2 \\ \hline \end{array}$	$U_{\rm blix}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$		
	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$	
$\begin{array}{c c} U_{BX} & A0 \\ \bullet \\ \bullet \\ \hline \\ \bullet \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline$	$L_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$	
	$U_{\rm BMX}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$		
$U_{\text{BX}} \xrightarrow{R1} O_{\text{OY}} O_{\text{OY}$	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$	
	$L_2 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3}$	$R_2 = \frac{U_0 R_0}{A_3}$	
$5 \qquad C_{1} \qquad R_{1} \qquad C_{1} \qquad $	$U_{\rm bbix}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}}$		
	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	
$\begin{array}{c} U_{BX} & AO \\ O \\ O \\ \hline \\ O \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ $	$L_1 = \frac{A_2 R_0 \tau}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 R_0}{U_0}$	
	$U_{\rm BMX}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$		
$U_{BX} \xrightarrow{I R1} O \xrightarrow{I} O \xrightarrow{I} I$	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$R_{1} = \frac{U_{0}\tau}{C_{0}(A_{1}\tau - A_{3})}$	
	$L_1 = \frac{U_0 \tau^2}{A_3 C_0}$	$R_2 = \frac{U_0 \tau}{A_3 C_0}$	
$\begin{bmatrix} 7 \end{bmatrix} \qquad \underbrace{L1}_{R1} \begin{bmatrix} C1 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ $	$U_{\rm bein}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$		
$ \begin{array}{c c} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & $	$L_1 = \frac{A_0 R_0 \tau_0}{U_0}$	$R_{1} = \frac{(A_{1}\tau - A_{3})R_{0}\tau_{0}}{U_{0}\tau}$	
$ \begin{array}{c} \circ \\ \circ \\ \circ \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\$	$C_{1} = \frac{U_{0}\tau^{2}}{A_{3}R_{0}\tau_{0}}$	$R_2 = \frac{A_3 R_0 \tau_0}{U_0 \tau}$	
	$U_{\rm BMX}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 e^{-\frac{t}{\tau}}$		
$\begin{array}{c c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \bullet & & \\ \bullet & & \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & & \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} U_{BX} & R1 \\ \bullet & \\ \hline \end{array} \\ \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \hline \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\$	$L_1 = \frac{U_0 R_0}{A_1}$	$R_1 = \frac{U_0 R_0}{A_0}$	
	$\overline{C_1} = \frac{A_2 \tau}{U_0 R_0}$	$\overline{R_2} = \frac{U_0 R_0}{A_2}$	

Measuring. Monitoring. Management. Control

9 $R1$ $C1$	$U_{\text{pure}}(t) = A_0 + A_1 t + A_3 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
	$R_1 = \frac{A_0 R_0}{U_0}$	$C_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 R_0 (A_2 + A_1 \tau)}$
$\begin{array}{c} U_{BX} \\ O \\ O \\ \hline \\ O \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline$	$C_{1} = \frac{U_{0}\tau}{R_{0}(A_{3} + A_{1}\tau)}$	$R_{2} = \frac{R_{0} \left(A_{3} + A_{1} \tau\right)^{2}}{A_{3} U_{0}}$
	$U_{\rm BMX}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$U_{\text{BX}} \leftarrow C1 \leftarrow C2 \leftarrow OY \leftarrow O$	$R_1 = \frac{U_0}{A_1 C_0}$ $A_2 C_0$	$C_{2} = \frac{A_{2}A_{3}C_{0}}{U_{0}(A_{3} - A_{2})}$ $U_{0}\tau(A_{2} - A_{2})$
	$C_1 = \frac{3 \cdot 0}{U_0}$	$R_2 = \frac{0}{A_3^2 C_0} \frac{2}{A_0^2 C_0}$
$11 \qquad R1 \qquad L1 \qquad P2 \qquad P$	$U_{\rm BLIX}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$U_{\text{RX}} _ R0 _ \begin{bmatrix} L2 & K2 \\ K2 & L2 & L2 \\ L2 & L2 & L2 \\ L2 & L2 & L$	$R_1 = \frac{A_1 R_0 \tau_0}{U_0}$	$L_2 = \frac{A_2 A_3 R_0 \tau_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
	$L_{1} = \frac{A_{3}R_{0}\tau_{0}}{U_{0}}$	$R_{2} = \frac{A_{3}^{2}R_{0}\tau_{0}}{U_{0}\tau(A_{3}-A_{2})}$
	$U_{\rm Bbix}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
U_{BX} L^2 Oy U	$R_{1} = \frac{U_{0}R_{0}}{A_{0}}$	$L_2 = \frac{U_0 A_3 R_0}{A_1 (A_3 + A_1 \tau)}$
	$L_1 = \frac{U_0 R_0 \tau}{A_3 + A_1 \tau}$	$R_2 = \frac{A_3 U_0 R_0}{(A_3 + A_1 \tau)^2}$
	$U_{\rm BMX}(t) = A_1 \cdot t + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$U_{\text{BX}} \xrightarrow{R0} \qquad \qquad$	$C_1 = \frac{U_0}{A_1 R_0}$	$C_2 = \frac{U_0 \tau (A_3 - A_2)}{A_3^2 R_0}$
	$R_1 = \frac{A_3 R_0}{U_0}$	$R_2 = \frac{A_2 A_3 R_0}{U_0 (A_3 - A_2)}$
	$U_{\rm BLIX}(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_3 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	
$U_{BX} \longrightarrow R1 \longrightarrow C2 \longrightarrow OY \longrightarrow O$ $U_{BIX} \longrightarrow U_{BIX} \longrightarrow U_{BIX$	$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}$	$C_{2} = \frac{\overline{C_{0} (A_{3} + A_{1}\tau)^{2}}}{A_{3} U_{0}}$
	$R_1 = \frac{U_0 \tau}{C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$	$R_2 = \frac{U_0 A_3}{A_1 C_0 (A_3 + A_1 \tau)}$

Окончание табл. 2



5. Осуществляется решение систем, составленных из уравнений (2) – (4) относительно обобщенных *A*-параметров численными методами или находится упрощенное аналитическое решение уравнений для непосредственного вычисления искомых *A*-параметров, реализуемого в виде исполняемых файлов для микроконтроллеров. Особенностью упрощенных алгоритмов является то, что к моментам получения двух последних отсчетов выходного напряжения ИЦ экспоненциальный переходный процесс в ИЦ считается полностью установившимся. Методическая погрешность определения *A*-параметров, обусловленная таким упрощением, по результатам исследований авторов может быть получена в пределах 0,5 %.

Упрощенные аналитические решения системы уравнений (5):

$$A_{0} = U(t_{2y}) - A_{1}t_{2y} - A_{3}; (6)$$

$$A_{1} = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}};$$
(7)

$$A_{3} = \frac{\left[t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_{1})) + t_{1}(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_{1}))\right]^{2}}{(t_{2y} - t_{1y})(t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_{1})) - t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_{1})) - 2t_{1}(U(t_{2y}) - U(t_{1y})))};$$
(8)

$$\tau = \frac{t_1}{\ln\left[\frac{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))}{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) + 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1))}\right]}.$$
(9)

Упрощенные аналитические решения системы, составленной из уравнений (3), имеют следующий вид:

$$A_{0} = \frac{t_{1y}U(t_{2y}) - t_{2y}U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}};$$
(10)

$$A_{1} = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}};$$
(11)

$$A_{2} = \frac{\left[t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_{1})) + t_{1}(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_{1}))\right]^{2}}{(t_{2y} - t_{1y})(t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_{1})) - t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_{1})) - 2t_{1}(U(t_{2y}) - U(t_{1y})))};$$
(12)

Measuring. Monitoring. Management. Control

$$\tau = \frac{t_1}{\ln\left[\frac{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(t_1)) + t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(t_1))}{t_{2y}(U(t_{1y}) - U(2t_1)) + 2t_1(U(t_{2y}) - U(t_{1y})) - t_{1y}(U(t_{2y}) - U(2t_1))}\right]}.$$
(13)

Упрощенные аналитические решения системы, составленной из уравнений (4), имеют следующий вид (без громоздкой подстановки):

$$A_{1} = \frac{U(t_{2y}) - U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}};$$
(14)

$$A_{2} = \frac{(A_{1}t_{1} - U(t_{1}))^{2} + A_{3}(U(2t_{1}) - 2U(t_{1}))}{A_{3} - U(2t_{1}) + 2A_{1}t_{1}};$$
(15)

$$A_{3} = \frac{t_{1y}U(t_{2y}) - t_{2y}U(t_{1y})}{t_{2y} - t_{1y}};$$
(16)

$$\tau = \frac{t_1}{\ln\left[\frac{A_3 - U(t_1) + A_1 t_1}{A_3 - U(2t_1) + 2A_1 t_1}\right]}.$$
(17)

6. По полученным значениям *А*-параметров вычисляются значения параметров элементов ЭЦ.

На рис. 1 приведена структурная схема установки для измерения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ.



Рис. 1. Структурная схема установки для измерения параметров нерезонансных многоэлементных ЭЦ

Исследуемая ЭЦ может быть включена как на входе, так и в цепи отрицательной обратной связи (ООС) ОУ. Входное воздействие (тестовый сигнал) в виде одно- или двухполярной последовательностей прямоугольных или треугольных импульсов формируется путем коммутации опорных напряжений. Стабилизация режима ОУ по постоянному току при использова-

нии однополярных тестовых сигналов осуществляется путем принудительного разряда емкостей в цепи ООС ОУ с помощью аналогового ключа, а при использовании двухполярных тестовых сигналов – с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) в цепи ООС ОУ. Измерение значений отсчетов выходного напряжения ИЦ осуществляется устройствами выборки и хранения (УВХ) и аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), число которых определяется числом элементов ЭЦ. Работой установки управляет персональный компьютер (ПК) с соответствующим программным обеспечением. Формирование команд, управляющих аппаратной частью установки, и сбор измерительной информации осуществляются с помощью контроллера последовательной передачи данных и дешифратора команд.

При макетировании данной установки авторами использовались ОУ К544УД2, коммутатор сигналов К590КН4, аналоговый ключ ADG736, УВХ 1100СК2 или AD781, АЦП MCP3424.

Заключение

Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ с использованием метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть, избавиться от увеличения случайной погрешности при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований, что способствует повышению точности измерений. Предложенная методика применяется при построении многофункциональных аппаратно-программных комплексов для измерения параметров ЭЦ [10]. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность определения параметров нерезонансных четырехэлементных ЭЦ с использованием совокупного метода измерений при относительной погрешности определения параметров элементов ЭЦ не более 1,5–2 %.

Библиографический список

- 1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. Москва : Энергия, 1973. 400 с.
- 2. *Лопатин, Б. А.* Теоретические основы электрохимических методов анализа / Б. А. Лопатин. Москва : Высш. шк., 1975. 295 с.
- 3. *Кнеллер, В. Ю.* Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
- Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
- Колдов, А. С. Синтез измерительного преобразователя для измерения проводимости кондуктометрического датчика / А. С. Колдов, В. И. Кулапин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 250–251.
- Мартяшин, А. И. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей / А. И. Мартяшин, А. В. Светлов // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симп. : в 2 т. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2003. – Т. 2. – С. 288–290.
- 7. *Светлов, А. В.* Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей / А. В. Князьков, А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3 (25). С. 69–78.
- 8. *Светлов, А. В.* Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов, Д. А. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 8. – С. 19–22.
- 9. Колдов, А. С. Оценивание случайных погрешностей измерительных преобразователей / А. С. Колдов, Н. В. Родионова, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4 (26). С. 76–84.
- Светлов, А. В. Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров электрических цепей / А. В. Светлов, И. В. Ушенина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 81–89.

References

- 1. Berliner M. A. Izmereniya vlazhnosti [Humidity measurement]. Moscow: Energiya, 1973, 400 p. [In Russian]
- 2. Lopatin B. A. *Teoreticheskie osnovy elektrokhimicheskikh metodov analiza* [Theoretical basis of electrochemical analysis methods]. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 295 p. [In Russian]

Measuring. Monitoring. Management. Control

- 3. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multi-element bipolars]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
- 4. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovani*ya parametrov elektricheskikh tsepey [Bases of invariant transformation of parameters of electric circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
- 5. Koldov A. S., Kulapin V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 250–251. [In Russian]
- Martyashin A. I., Svetlov A. V. Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubileynogo simp.: v 2 t. [Actual problems of science and education: tr. International. jubilee symp. : in 2 vols.]. Penza: Inf.izd. tsentr PenzGU, 2003, vol. 2, pp. 288–290. [In Russian]
- 7. Svetlov A. V., Knyaz'kov A. V., Koldov A. S., Rodionova N. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 69–78. [In Russian]
- 8. Svetlov A. V., Andreev A. N., Kazakov V. A., Svetlov D. A. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 1999, no. 8, pp. 19–22. [In Russian]
- 9. Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 76–84. [In Russian]
- 10. Svetlov A. V., Ushenina I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1, pp. 81–89. [In Russian]

Колдов Александр Сергеевич

инженер, кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: rtech@pnzgu.ru

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: rtech@pnzgu.ru

Koldov Alexander Sergeevich

engineer, sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Svetlov Anatoliy Vil'evich

doctor of technical sciences, professor, head of sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Колдов, А. С. Определение параметров нерезонансных четырехэлементных электрических цепей по результатам совокупных измерений / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 39–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-5.

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 004.934

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-6

А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков

СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ ЕСТЕСТВЕННО ВЫРАЖЕННЫХ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov

A METHOD FOR AUTOMATED SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS TO DETERMINE TEMPORAL PATTERNS OF NATURALLY EXPRESSED PSYCHO-EMOTIONAL STATES

Аннотация. Актуальность и цели. Оценка психоэмоционального состояния человека в отраслях профессиональной деятельности, сопряженных с повышенным риском возникновения техногенных и биогенных аварий, является важной социально значимой проблемой для государства. Целью исследования является разработка способа автоматизированной сегментации речевых сигналов для повышения эффективности определения временных паттернов речи, релевантных естественно выраженным психоэмоциональным состояниям человека. Материалы и методы. В разработке способа использовались: уникальная технология адаптивной декомпозиции нестационарных сигналов – улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом, а также правило разграничения на основе физиологического аспекта формирования речи. Программная реализация способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). Результаты. Разработан способ автоматизированной сегментации речевых сигналов на вокализованные, невокализованные участки и участки пауз для определения временных паттернов речи, отражающих естественно выраженные психоэмоциональные состояния человека. Проведено исследование способа с использованием базы речевых сигналов, зарегистрированных с группы людей, переживаемых естественные положительные и отрицательные эмоции. Выводы. Результаты исследования выявили, что в условиях нестабильности моторики речевого аппарата разработанный способ сегментации позволяет точнее определять границы вокализованных, невокализованных участков и участков пауз, тем самым повышая эффективность вычисления временных паттернов речи и определения психоэмоциональных состояний человека.

A b s t r a c t. *Background*. An assessment of human psycho-emotional state in the fields of professional activity associated with an increased risk of man-made and biogenic accidents is an important socially significant problem for the state. The aim of the study is to develop a meth-

[©] Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., 2019

od for automated segmentation of speech signals to improve the efficiency of determining temporal patterns of speech relevant to naturally expressed psycho-emotional states of a person. *Materials and methods*. To develop the method, a unique technology for adaptive decomposition of non-stationary signals, namely, the improved ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, as well as the rule of differentiation based on the physiological aspect of speech formation, have been used. Software implementation of the method was performed in ©Matlab (MathWorks) mathematical modeling environment. *Results*. A method for automated segmentation of speech signals into voiced, unvoiced, and pause sections to determine temporal patterns of speech reflecting naturally expressed human psycho-emotional states, has been developed. A study was conducted using a base of speech signals recorded from a group of subjects experiencing natural positive and negative emotions. *Conclusions*. The results of the study have revealed that in conditions of instability of the speech apparatus motility, the developed method for segmentation makes it possible to more accurately determine the boundaries of voiced, unvoiced, and pause sections, thereby increasing the efficiency of calculating temporal patterns of speech, and determining psycho-emotional states of a person.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, автоматизация процесса обработки, сегментация, адаптивная декомпозиция, временные паттерны речи, естественно выраженные психоэмоциональные состояния.

K e y w o r d s: speech signal processing, automation of processing, segmentation, adaptive decomposition, temporal speech patterns, naturally expressed psycho-emotional states.

Введение

Воспроизведение речи является одним из самых сложных приобретаемых навыков человека в течение жизни. Речевой аппарат чрезвычайно чувствителен к нарушениям работы нервной системы [1]. На протяжении долгих лет оценка нестабильности моторики речевого аппарата при естественно выраженных психоэмоциональных состояниях ограничивалась лабораторными анализами и тестами непосредственного психического восприятия. На сегодняшний день эта задача успешно решается методами на основе анализа речевых сигналов [2].

Психоэмоциональное состояние человека шифруется в определенные паттерны речи, отражающие вид и степень выраженности состояния. Основные понятия, которые характеризуют паттерны речи, связанные с формой, размерами, динамикой изменения речевого аппарата и описывающие психоэмоциональное состояния человека, можно разделить на три группы объективных признаков: спектрально-временные, кепстральные и амплитудно-частотные [3].

Спектрально-временные паттерны характеризуют речевой сигнал в его физикоматематической сущности исходя из наличия компонентов трех видов: вокализованных и невокализованных участков и участков пауз. Спектрально-временные паттерны достаточно хорошо отображают особенности формы временного ряда и спектра голосовых импульсов, а также уникальность фильтрующих функций речевого аппарата при психоэмоциональном возбуждении человека.

Временные паттерны характеризуют особенности потока речи, связанные с динамикой перестройки артикуляционных органов говорящего и являются интегральными характеристиками, отражающими взаимосвязь движения артикуляционных органов говорящего [4]. В настоящее время известно большое количество разнообразных методик определения временных паттернов речи [5–7]. Каждая из методик имеет ряд преимуществ и недостатков. Точность определения временных паттернов в представленных подходах зависит от эффективности сегментации речи на информативные участки, характеризующиеся определенной длительностью.

В данной работе представлен способ автоматизированной сегментации речи на вокализованные, невокализованные участки и участки пауз для определения временных паттернов при естественно выраженных психоэмоциональных состояниях. Суть способа заключается в применении автоматизированной адаптивной декомпозиции для сегментации речевых сигналов.

Статья является продолжением опубликованных трудов авторов [8, 9] и построена следующим образом. В первом разделе статьи кратко представлена информация об адаптивной декомпозиции и о временных паттернах речи. Во втором и третьем разделах кратко описывается и исследуется разработанный способ. В четвертом разделе представлены результаты исследований и сделаны выводы. Авторский коллектив благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку проекта № 18-37-00256 мол_а «Исследование информативных параметров речевых сигналов и разработка алгоритмов обнаружения скрытых признаков психоэмоционального состояния операторов критичных по безопасности систем управления».

Материалы и методы

Адаптивная декомпозиция

Важным условием автоматизированной адаптивной декомпозиции является формирование базисной функции разложения, функционально зависимой от внутренней структуры исходного речевого сигнала. Данное условие может выполняться при использовании декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ). Классический метод ДЭМ был разработан Norden Huang в 1998 г. [10] и предназначался для разложения нестационарных сигналов, возникающих в нелинейных системах. ДЭМ обеспечивает разложение нестационарного сигнала на высокочастотные и низкочастотные составляющие, назваемые эмпирическими модами (ЭМ).

При разложении модель сигнала не задается заранее, ЭМ вычисляются в ходе процедуры отсеивания с учетом локальных особенностей (таких как экстремумы и нули сигнала) и внутренней структуры каждого конкретного сигнала. Таким образом, ЭМ не имеют строгого аналитического описания, но должны удовлетворять двум условиям, гарантирующим автоматизацию процесса, а также определенную симметричность и узкополосность базисных функций:

 общее количество экстремумов функции сигнала должно быть равным количеству нулей функции с точностью до единицы;

 среднее значение верхней и нижней огибающих, интерполирующих локальные максимумы и минимумы функции сигнала, должно стремиться к нулю.

Аналитически ДЭМ представляет собой следующее выражение:

$$x(n) = \sum_{i=1}^{l} IMF_i(n) + r_l(n),$$

где x(n) – исходный сигнал; $IMF_i(n)$ – ЭМ; $r_i(n)$ – конечный остаток; i = 1, 2, ..., I – номер ЭМ; n – дискретный отсчет времени.

Кроме адаптивности, технология ДЭМ обладает и другими важными свойствами:

– локальностью – возможностью учета локальных особенностей сигнала;

 ортогональностью – обеспечением восстановления сигнала с определенной точностью;

 – полнотой – гарантией конечного числа базисных функций при конечной длительности сигнала.

Уникальность декомпозиции заключается в том, что функции базиса разложения извлекаются непосредственно из внутренней структуры исходного сигнала. Это позволяет учитывать такие особенности исходного сигнала, как частотную и амплитудную модуляции, концентрацию энрегии в определенном диапазоне частот и др.

С момента появления классической ДЭМ разработано большое количество разновидностей декомпозиций. Наиболее адаптивной к нестационарным речевым сигналам сложной формы является улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом (ПМДЭМАШ). Появление улучшенной ПМДЭМАШ позволило решить ряд проблем, присущих другим видам декомпозции [11]:

– смешивание ЭМ вследствие перекрытия масштабно-энергетических пространств мод;

зашумление ЭМ;

– наличие паразитных ЭМ, возникающих на ранних этапах декомпозиции.

Отличительной особенностью улучшенной ПМДЭМАШ является добавление к исходному сигналу контролируемого адаптивного шума для создания новых локальных экстремумов [11]:

$$x_i(n) = x(n) + w(n),$$

где $x_j(n)$ – шумовые копии речевого сигнала; $w_j(n)$ – реализации белого шума,

$$x_{j}(n) = \sum_{i=1}^{I} IMF_{ji}(n) + r_{jI}(n),$$

$$IMF_{i}(n) = \sum_{j=1}^{J} \frac{IMF_{ji}(n)}{J},$$

$$r_{I}(n) = \sum_{i=1}^{J} \frac{r_{jI}(n)}{J},$$

где j = 1, 2, ..., J – количество реализаций белого шума.

На рис. 1 представлен пример разложения фрагментов вокализованной и невокализованной речи длительностью 100 мс. Вокализованный и невокализованный фрагменты были разложены на восемь ЭМ. Первые ЭМ для обоих видов фрагментов являются высокочастотными, а последующие моды – низкочастотными (по убыванию). Для вокализованного фрагмента первые пять ЭМ являются информативными (концентрирующие основную энергию сигнала), последние четыре моды – компенсирующими и трендовыми [12]. Для невокализованного фрагмента однозначно определить информативные, компенсирующие и трендовые моды невозможно. Это связано с тем, что невокализованный речевой сигнал по характеристикам подобен шуму.

Подробно особенности видов декомпозиции, их преимущества и недостатки при обработке речи описаны в работах [13–15].

Временные паттерны

Обзор информативных параметров речевых сигналов [1, 3, 16] выявил следующие временные паттерны релевантные к естественно выраженным психоэмоциональным состояниям:

– скорость распределения временных интервалов вокализованных, невокализованных участков и участков пауз (Rate of Speech Timing, RST);

– ускорение распределения временных интервалов вокализованных, невокализованных участков и участков пауз (Acceleration of Speech Timing, AST);

– энтропия распределения временных интервалов вокализованных, невокализованных участков и участков пауз (Entropy of Speech Timing, EST);

– продолжительность интервалов пауз (Duration of Pause Intervals, DPI).

Описание способа

На рис. 2 структурно представлена блок-схема способа автоматизированного сегментирования речи для определения временных паттернов при естественно выраженных психоэмоциональных состояниях. Способ включает в себя два этапа обработки. Первый этап (блоки 1–4) заключается в автоматизированной сегментации речи на информативные участки с помощью адаптивной декомпозиции и энергетического анализа ЭМ. Второй этап (блок 5) заключается в определении временных паттернов вокализованных, невокализованных участков и участков пауз, отражающих нарушения моторики речевого аппарата, вызванных психоэмоциональными расстройствами. Блоки 6 и 7 не относятся к разработанному способу и используются на этапе исследования. Рассмотрим некоторые этапы способа подробнее.



Рис. 1. Результат разложения фрагментов вокализованного (левый столбец) и невокализованного (правый столбец) фрагментов речи методом улучшенной ПМДЭМАШ

Measuring. Monitoring. Management. Control

52

2019, Nº 3 (29)



Рис. 2. Упрощенная блок-схема способа автоматизированного сегментирования речи для определения временных паттернов

Речь представляет собой процесс, спектр которого остается относительно неизменным в течение короткого интервала времени. Это позволяет разделить речевой сигнал на равные кратковременные фрагменты по 10 мс, в пределах которых можно считать сигнал условно стационарным. После сегментации сигнал представляет собой набор фрагментов, а дальнейшая работа способа осуществляется с каждым фрагментом в отдельности.

Декомпозиция сигнала осуществляется методом улучшенной ПМДЭМАШ. Параметры декомпозиции задавались в соответствии с автоматизированной методикой определения оптимальных значений настройки [12].

Изменение уровня речевого сигнала во времени характеризуется важным информативным параметром – амплитудным распределением. Распределение амплитуды сигнала во времени достаточно полно описывается с помощью кратковременной энергии. В соответствии с функционалом слухового аппарата человек воспринимает речь нелинейно, определяя разницу между энергиями различных информативных участков речи.

В разработанном способе сегментация осуществляется на основе энергетического анализа ЭМ фрагментов речевого сигнала в скользящем окне длительностью 10 мс. На рис. 3 представлен пример разложения кратковременных фрагментов вокализованной, невокализованной речи и паузы на ЭМ, полученных методом улучшенной ПМДЭМАШ. Особенностью способа является то, что соотнесение анализируемого фрагмента сигнала к вокализованной, невокализованной речи или к паузе осуществляется, исследуя энергетические свойства каждой ЭМ фрагмента в отдельности. Учитывая, что каждая ЭМ обладает определенными параметрами, сравнительный энергетический анализ мод по отдельности значительно повышает эффективность определения границ вокализованных, невокализованных участков и участков пауз при нестабильной моторике речевого аппарата.

К исследуемым энергетическим параметрам ЭМ фрагментов речевого сигнала относятся:

- логарифм энергии:

$$LE_{s,i} = \log_2\left(\sum_{n=1}^N \left(IMF_{s,i}(n)\right)^2\right),$$

где *LE*_{*s,i*} – логарифм энергии ЭМ фрагмента речевого сигнала; *s* – номер фрагмента;

– отношение кратковременной энергии ЭМ к скорости пересечения сигнала ЭМ через нулевое значение (СПСН):

$$Z_{s,i} = \frac{\sum_{n=1}^{N} (IMF_{s,i}(n))^{2}}{ZCR_{s,i}},$$
$$ZCR_{s,i} = 0.5 \sum_{n=1}^{N-1} \left| \text{sgn} (IMF_{s,i}((n-1)N+n+1)) - \text{sgn} (IMF_{s,i}((n-1)N+n)) \right|,$$

где $ZCR_{s,i}$ – скорость пересечения сигнала ЭМ через нулевое значение; sgn – знаковая функция (sgn(x) = 1, если $x \ge 0$ и –1 при x < 0).

Определение информативных участков заключается в обнаружении точных границ вокализованных, невокализованных участков и участков пауз. Сегментация всех участков одновременно неэффективна. Для повышения точности сегментации необходимо последовательное разделение речевого сигнала на паузы, затем на вокализованные и невокализованные участки.



Рис. 3. Разложение кратковременных фрагментов вокализованной, невокализованной речи и паузы на ЭМ

В соответствии с физиологическим аспектом формирования речи человек перед произношением делает начальную кратковременную паузу, не содержащую речь и соответствующую тишине. Обычно длительность начальной паузы состовляет 200–500 мс. Применяя усреднные значения параметров *LE* и Z ЭМ для фрагментов начальной паузы, можно определить пороговые значения *LE*_{tresh}. и Z_{tresh}. На рис. 4,*a* представлена графическая интерпретация

Measuring. Monitoring. Management. Control

формирования пороговых значений по шести первым модам анализируемых фрагментов. Пунктирными линиями красного цвета отмечены значения энергетических параметров ЭМ фрагментов начальной паузы, утолщенной сплошной линией красного цвета отмечены усредненные пороговые значения.

На рис. 4,6 представлена графическая интерпретация пороговой обработки. Утолщенной сплошной линией зеленого цвета отмечены значения энергетических параметров ЭМ вокализованного фрагмента речи. Утолщенной линией синего цвета – для невокализованного фрагмента.

На рис. 5 представлена интерпретация процесса автоматизированной сегментации на информативные участки в разработанном способе.

Определение временных паттернов речевых сигналов заключается в вычислении значений RST, AST, DPI и EST.

RST обеспечивает более точную оценку ухудшения скорости речи, чем простое измерение длительности пауз, поскольку данный паттерн учитывает не только паузы, но и вокализованные, невокализованные участки. Вокализованные участки предоставляют дополнительную информацию об ухудшении фонации, тогда как невокализованные участки предоставляют информацию о нечеткой артикуляции органов говорящего. Значение *RST* в комплексе приблизительно равно скорости речи, поскольку ухудшение скорости речи связано с недостатками во всех элементах речевых сигналов. Каждый вокализованный, невокализованный участок и участки пауз описываются временем возникновения, определяемым как среднее значение времени между началом участка и его окончанием.



Рис. 4. Анализ энергетических параметров ЭМ фрагментов речевого сигнала: *а* – формирование пороговых значений; *б* – пороговая обработка

AST определяет степень ускорения времени. Каждый анализируемый фрагмент речевого сигнала делится на две части с перекрытием 25 %, что обеспечивает плавный переход между частями. Значение AST рассчитывается как разница между значениями RST обеих частей, разделенное на общую продолжительность фрагмента речевого сигнала.

EST описывает упорядоченность (предсказуемость) речевых сигналов, в том числе вокализованные, невокализованные участки и участки пауз. Соответственно, уменьшение энтропии равнозначно нарушению моторики речи. Для определения *EST* рассчитывается количество всех интервалов вокализованных и невокализованных участков, участков паузы и общее количество участков. Значение EST определяется следующим образом:

$$EST = -\frac{kv}{kt}\log_2\left(\frac{kv}{kt}\right) - \frac{ku}{kt}\log_2\left(\frac{ku}{kt}\right) - \frac{kp}{kt}\log_2\left(\frac{kp}{kt}\right),$$

kv – вокализованные фрагменты; ku – невокализованные фрагменты; kp – фрагменты пауз; kt – общее количество фрагментов.

DPI определяет способность говорящего начать воспроизведение речи. Нестабильность моторики речевого аппарата при естественно выраженных психоэмоциональных состояниях

может вызвать трудности при воспроизведении, которые порождают увеличение длительности пауз. Значение *DPI* вычисляется как средняя длительность всех участков пауз.

Исследование способа

Для тестирования разработанного способа автоматизированного сегментирования речи сформирована группа испытуемых и зарегистрирована база речевых сигналов, состоящая из 1000 записей.



Рис. 5. Процесс автоматизированной сегментации речи на информативные участки

Формирование группы испытуемых осуществлялось при поддержке областной психиатрической больницы им. К. Р. Евграфова (г. Пенза) и Медицинского института Пензенского государственного университета. В группу испытуемых было отобрано 100 человек в возрасте от 18 до 79 лет мужского и женского пола, переживающих естественные положительные и отрицательные эмоции. Эффективность сегментации оценивалась в сравнении с популярными на практике способами сегментации с последующим измерением временных паттернов:

Measuring. Monitoring. Management. Control

56

– основанные на анализе кратковременной энергии (Short-time Energy, STE) и скорости пересечения сигнала через нулевое значение *ZCR* [17, 18];

 основанные на использовании статистических свойств фонового шума и одномерного расстояния Махаланобиса [19].

Для определения эффективности обнаружения психоэмоциональных положительных и отрицательных состояний использовался параметр – ошибки первого и второго рода [8]. Ошибкой первого рода является ложное присваивание статуса «норма» речевому сигналу, произнесенному человеком с психоэмоциональным расстройством, а ошибкой второго рода – ложное присваивание статуса «патология» речевому сигналу, произнесенному здоровым человеком. Программная реализация способа выполнена в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений © Matlab (MathWorks).

В табл. 1 представлены результаты определения психоэмоциональных положительных и отрицательных состояний.

Таблица 1

	Результат опр	езультат определения, чел.		0/		
прогнозируемый результат	Патология	Норма	Ошиока, %			
Способ на основе STE и ZCR						
Положительное психоэмоциональное состояние						
Патология	63	37	1-го	37		
Норма	12	88	2-го	12		
Отрицательное психоэмоциональное состояние						
Патология	81	19	1-го	19		
Норма	7	93	2-го	7		
Способ на основе одномерного расстояния Махаланобиса						
Положительное психоэмоциональное состояние						
Патология	71	29	1-го	29		
Норма	8	92	2-го	8		
Отрицательное психоэмоциональное состояние						
Патология	84	16	1-го	16		
Норма	6	94	2-го	6		
Разработанный способ						
Положительное психоэмоциональное состояние						
Патология	88	12	1-го	12		
Норма	5	95	2-го	5		
Отрицательное психоэмоциональное состояние						
Патология	89	11	1-го	11		
Норма	4	96	2-го	4		

Результаты определения психоэмоциональных состояний

Результаты и выводы

Из таблицы видно, что процент ложных присваиваний статуса «норма» речевым сигналам, произнесенным пациентами, находящимися в состоянии психоэмоционального возбуждения, у способов, основанных на *STE*, *ZCR*, и одномерного расстояния Махаланобиса больше, чем у разработанного способа: на 25 и 17 % для отрицательного психоэмоционального состояния, 7 и 4 % для положительного психоэмоционального состояния соответственно. То же самое можно сказать о ложных присваиваниях статуса «патология» речевым сигналам, произнесенным пациентами в нейтральном состоянии: на 7 и 3 %, 3 и 2 % соответственно. Наименьшие значения ошибок 1-го и 2-го родов были достигнуты разработанным способом: всего лишь 12 и 5 % для положительных эмоций, 11 и 4 % для отрицательных эмоций.

Таким образом, можно сделать вывод, что в условиях нестабильности моторики речевого аппарата разработанный способ сегментации позволяет точнее определять границы вокализованных, невокализованных участков и участков пауз, тем самым повышая эффективность вычисления временных паттернов речи и определения психоэмоциональных состояний человека. Данные результаты достигаются исключительно за счет преимуществ энергетического анализа параметров ЭМ, полученных методом улучшенной ПМДЭМАШ для каждого анализируемого фрагмента.

Библиографический список

- 1. *Schuller, B. W.* Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing / B. W. Schuller, A. M. Batliner. New York : Wiley, 2013. 344 p.
- Trigeorgis, G. Adieu features? End-to-end speech emotion recognition using a deep convolutional recurrent network / G. Trigeorgis, F. Ringeval, R. Brueckner, E. Marchi, M.A. Nicolaou, B. Schuller, S. Zafeiriou // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (Shanghai, China, 20–25 March 2016). Shanghai, China : IEEE, 2016. P. 5200–5204.
- 3. *Huang, X.* Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Developmen / X. Huang, A. Acero, H.-W. Hon // Prentice Hall. New Jersey, 2001. 980 p.
- 4. *Фант, Г. К.* Акустическая теория речеобразования / Г. К. Фант ; пер. с англ. Л. А. Варшавского и В. И. Медведева ; науч. ред. В. С. Григорьева. Москва : Наука, 1964. 284 с.
- 5. Whitehead, R. L. Temporal characteristics of speech produced by inexperienced signers during simultaneous communication / R. L.Whitehead, N. Schiavetti, D. E. Metz, T. Farrell // Journal of Communication Disorders. – 1999. – Vol. 32, № 2. – P. 79–95.
- 6. *Bóna, J.* Temporal characteristics of speech: The effect of age and speech style / J. Bóna // The Journal of the Acoustical Society of America. 2014. Vol. 136, № 2. P. 116–121.
- 7. *Bakaev, A. V.* Spectral and temporal characteristics of vocal speech in the emotional aspec / A. V. Bakaev // Almanac of Modern Science and Education. 2014. Vol. 4, № 83. P. 28–32.
- 8. *Алимурадов, А. К.* Способ сегментации речевого сигнала для систем оценки психогенных состояний / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, С. И. Торгашин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 3 (47). С. 81–93.
- Алимурадов, А. К. Повышение точности измерения частоты основного тона на основе оптимизации процесса декомпозиции речевых сигналов на эмпирические моды / А. К. Алимурадов, Ю. С. Квитка, П. П. Чураков, А. Ю. Тычков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 53–65.
- 10. *Huang, N. E.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis / N. E. Huang, Sh. Zheng, R. L. Steven // Proceedings of the Royal Society of London. – 1998. – Vol. A454. – P. 903–995.
- Colominasa, M. A. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedicalsignal processing / M. A. Colominasa, G. Schlotthauera, M. E. Torres // Biomedical Signal Processing and Control. – 2014. – Vol. 14. – P. 19–29.
- 12. *Zhaohua, Wu*. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method / Wu Zhaohua, N. E. Huang // Advances in Adaptive Data Analysis. 2009. Vol. 1, № 1. P. 1–41.
- Yeh, J.-R. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method / J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, N. E. Huang // Advances in Adaptive Data Analysis. 2010. Vol. 2, N
 № 2. P. 135–156.
- Torres, M. E. A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise / M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (Prague, Czech Republic, 22–27 May 2011). – Prague, Czech Republic : IEEE, 2011. – P. 4144–4147.
- Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder / J. Hlavnička, R. Čmejla, T. Tykalová, K. Šonka, E. Růžička, J. Rusz // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, № 12. – 13 p.
- Alimuradov, A. K. Automation of empirical mode decomposition to increase efficiency of speech signal processing / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, Yu. S. Kvitka // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 Sept. 2018). – Sochi, Russia : IEEE, 2018. – 6 p.
- Bachu, R. G. Separation of Voiced and Unvoiced Using Zero Crossing Rate and Energy of the Speech Signal / R. G. Bachu, S. Kopparthi, B. Adapa, B. D. Barkana // American Society for Engineering Education (ASEE) Zone Conference Proceedings (Pittsburgh, USA, 22–25 June 2008). – Pittsburgh, USA, 2008. – P. 1–7.
- Moattar, M. H. A simple but efficient real-time voice activity detection algorithm / M. H. Moattar, M. M. Homayounpour // 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009) (Glasgow, Scotland, August 24–28 2009). – Glasgow, Scotland : Eusipco, 2009. – P. 2549–2553.
- 19. Saha, G. A New Silence Removal and Endpoint Detection Algorithm for Speech and Speaker Recognition Applications / G. Saha, Ch. Sandipan, S. Suman // The National Conference on Communications (28–30 January 2005). New Delhi : Allied Publishers, 2005. 5 p.

References

- 1. Schuller B. W., Batliner A. M. Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing. New York: Wiley, 2013, 344 p.
- Trigeorgis G., Ringeval F., Brueckner R., Marchi E., Nicolaou M. A., Schuller B., Zafeiriou S. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (Shanghai, China, 20–25 March 2016).* Shanghai, China: IEEE, 2016, pp. 5200–5204.

- 3. Huang X., Acero A., Hon H.-W. Prentice Hall. New Jersey, 2001, 980 p.
- 4. Fant G. K. *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya* [Acoustic theory of speech formation]. Transl. from Engl. by L. A. Varshavskiy and V. I. Medvedev. Moscow: Nauka, 1964, 284 p. [In Russian]
- 5. Whitehead R. L., Schiavetti N., Metz D. E., Farrell T. Journal of Communication Disorders. 1999, vol. 32, no. 2, pp. 79–95.
- 6. Bóna J. The Journal of the Acoustical Society of America. 2014, vol. 136, no. 2, pp. 116–121.
- 7. Bakaev A. V. Almanac of Modern Science and Education. 2014, vol. 4, no. 83, pp. 28–32.
- Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Torgashin S. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 3 (47), pp. 81–93. [In Russian]
- 9. Alimuradov A. K., Kvitka Yu. S., Churakov P. P., Tychkov A. Yu. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 53–65. [In Russian]
- 10. Huang N. E., Zheng Sh., Steven R. L. Proceedings of the Royal Society of London. 1998, vol. A454, pp. 903–995.
- 11. Colominasa M. A., Schlotthauera G., Torres M. E. *Biomedical Signal Processing and Control.* 2014, vol. 14, pp. 19–29.
- 12. Zhaohua Wu., Huang N. E. Advances in Adaptive Data Analysis. 2009, vol. 1, no. 1, pp. 1–41.
- 13. Yeh J.-R., Shieh J.-S., Huang N. E. Advances in Adaptive Data Analysis. 2010, vol. 2, no. 2, pp. 135–156.
- Torres M. E., Colominas M. A., Schlotthauer G., Flandrin P. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (Prague, Czech Republic, 22–27 May 2011). Prague, Czech Republic: IEEE, 2011, pp. 4144–4147.
- 15. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T., Šonka K., Růžička E., Rusz J. Scientific Reports. 2017, vol. 7, no. 12, 13 p.
- 16. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Kvitka Yu. S. International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 Sept. 2018). Sochi, Russia: IEEE, 2018, 6 p.
- 17. Bachu R. G., Kopparthi S., Adapa B., Barkana B. D. American Society for Engineering Educa-tion (ASEE) Zone Conference Proceedings (Pittsburgh, USA, 22–25 June 2008). Pittsburgh, USA, 2008, pp. 1–7.
- 18. Moattar M. H., Homayounpour M. M. 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009) (Glasgow, Scot-land, August 24–28 2009). Glasgow, Scotland: Eusipco, 2009, pp. 2549–2553.
- 19. Saha G., Sandipan Ch., Suman S. *The National Conference on Communications (28–30 January 2005)*. New Delhi: Allied Publishers, 2005, 5 p.

Алимурадов Алан Казанферович

кандидат технических наук,

директор студенческого научно-производственного бизнес-инкубатора, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: alansapfir@yandex.ru

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: tychkov-a@mail.ru

Чураков Петр Павлович

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

Alimuradov Alan Kazanferovich

candidate of technical sciences, director of student research and production business incubator, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tychkov Aleksandr Yur'evich

candidate of technical sciences, deputy director at the Research Institute for Basic and Applied Studies, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Churakov Petr Pavlovich

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

Образец цитирования:

Алимурадов, А. К. Способ автоматизированной сегментации речевых сигналов для определения временных паттернов естественно выраженных психоэмоциональных состояний / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 48–60. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-6.

УДК 615.47:616-072.7

М. Н. Крамм

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТОРСА И КВАЗИЭПИКАРДА

M. N. Kramm

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CHOICE OF THE NUMBER OF ELECTRODES ON THE ELECTRIC POTENTIAL DISTRIBUTION MAPS ON THE TORSO SURFACES AND QUASI-EPICARDIUM

Аннотация. Актуальность и цели. Рассматривается вопрос повышения пространственного разрешения при анализе карт распределения электрического потенциала, обусловленного электрической активностью сердца. Проводится сравнение пространственного разрешения на карте потенциала на поверхности торса и карте потенциала на квазиэпикарде, окружающем сердце. Анализируется влияние количества и размещения электродов на возможность регистрации верхних пространственных частот. Исследование актуально в задачах повышения информативности электрокардиографических обследований путем реконструкции параметров эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). Материалы и методы. В рамках модели электрической активности сердца с мелкомасштабными неоднородностями анализируются двумерные пространственные спектры распределения электрического потенциала. Результаты. Проведено сравнение карт потенциала на поверхности торса (КППТ) и на поверхности квазиэпикарда (КППКЭ), окружающей сердце. Предложена методика оценки возможности регистрации верхних пространственных частот на КППГ и КППКЭ при различных количествах и способах размещения электродов на поверхности торса. Выводы. Карты потенциала на квазиэпикарде являются более информативными, чем карты потенциала на торсе и отображают более высокие пространственные частоты, а значит, более мелкие неоднородности. Предложенный подход с использованием пространственных спектров для карт потенциала на поверхности квазиэпикарда позволяет оценивать влияние количества и способа расположения электродов в многоэлектродной системе на поверхности торса на пространственное разрешение в карте потенциала.

A b s t r a c t. *Background*. The issue of increasing spatial resolution in the analysis of maps of the distribution of electric potential due to the electrical activity of the heart is considered. The spatial resolution is compared on the potential map on the torso surface and on the potential map on the quasi-epicardium surrounding the heart. The influence of the number and placement of electrodes on the possibility of recording the upper spatial frequencies is analyzed. The study is relevant in the tasks of increasing the information content of electrocardiographic examinations by reconstructing the parameters of an equivalent electric heart generator (EEGS). *Materials and methods*. In the framework of the model of electrical activity of the heart with small-scale inhomogeneities, two-dimensional spatial spectra of the distribution of electric potential are analyzed. *Results*. Comparison of potential maps on the surface of the torso (KPPT) and on the surface of the quasi-epicardium (KPPE) surrounding the heart. A tech-

nique is proposed for assessing the possibility of registering upper spatial frequencies at KPPT and KPPPE with various amounts and methods of placing electrodes on the surface of the torso. *Findings*. Potential maps on a quasi-epicardium are more informative than potential maps on a torso and display higher spatial frequencies, which means smaller inhomogeneities. The proposed approach using spatial spectra for potential maps on the surface of a quasi-epicardium allows one to evaluate the influence of the number and arrangement of electrodes in a multi-electrode system on the surface of a torso on the spatial resolution in the potential map.

Кл ю ч е в ы е с л о в а: карта распределения электрического потенциала, электроды, торс, квазиэпикард, пространственный спектр, пространственные частоты.

K e y w o r d s: electric potential distribution map, electrodes, torso, quasi-epicardium, spatial spectrum, spatial frequencies.

Введение

Одной из важных задач электрокардиологии является повышение информативности электрокардиографических (ЭКГ) обследований с помощью многоэлектродных отведений. Электрический потенциал, регистрируемый с некоторого электрода, является интегральной характеристикой электрических источников в сердце, и потому лишь качественно, оценочно связан с активностью ближайшего к электроду участка миокарда. Использование многоэлектродных отведений позволяет на количественном уровне ставить обратную задачу электро-кардиологии – задачу пространственно-временной реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС) [1, 2].

В основе подхода лежит использование электрокардиосигналов (ЭКС), которые регистрируются с помощью системы электродов, располагаемых на поверхности торса с помощью надеваемого на торс «многоэлектродного жилета» (см., например, [3, 4]). Вариант размещения электродов показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример размещения электродов на поверхности торса многоэлектродных отведений

Эквивалентный электрический генератор сердца (ЭЭГС) поверхностного типа характеризуется распределениями электрического потенциала ϕ_h и нормальной производной электрического потенциала (далее – потенциала) на поверхности эпикарда $\partial \phi_h / \partial n$ [5, 6]. Связь

Measuring. Monitoring. Management. Control

между этими распределениями и регистрируемым распределением потенциала ϕ_b на поверхности торса имеет интегральный характер и вытекает из уравнения Лапласа для области между поверхностями эпикарда и торса [7].

Актуальность задачи реконструкции ЭЭГС поверхностного типа связана с возможностью наблюдения более детальных карт распределения ϕ_h потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ) [6] по сравнению с картами распределения регистрируемого потенциала ϕ_b на поверхности торса (КППТ). Такая возможность иллюстрируется рис. 2 и 3, на которых для случая модельной задачи (комбинация двух дипольных источников) представлен пример двумерной развертки КППТ (рис. 1) и карты распределения потенциала ϕ_{qe} на поверхности квазиэпикарда (КППКЭ), окружающей область сердца (см. рис. 2).



Рис. 2. КППТ, координата *L* изменяется по периметру торса, центр (*L* = 0,55 м) соответствует левой боковой вертикальной линии



Рис. 3. КППКЭ, координата *L* изменяется по периметру цилиндрической модели квазиэпикарда (эллиптический цилиндр), центр (*L* = 0,225 м) соответствует левой боковой вертикальной линии

В соответствии с рис. 2. и 3 неоднородность размеров порядка 2–3 см может быть заметна на квазиэпикарде и не наблюдаться на торсе. Таким образом, в целях повышения эффективности кардиодиагностики представляет интерес анализ повышения степени детализации на КППЭ, т.е. повышения разрешающей способности при использовании КППКЭ.

Анализ влияния выбора числа электродов и числа точек интерполяции

При реконструкции ЭЭГС поверхностного типа на основе поверхностных интегралов в (1) используются разностные вычислительные схемы, основанные на дискретизации поверхностей торса S_b и эпикарда S_h . В ходе построения разностной схемы используются координаты точек размещения электродов и потенциалы, зарегистрированные в этих точках. Распределение потенциала на той или иной поверхности можно рассматривать как двумерный пространственный сигнал. При этом погрешность дискретизации такого сигнала в соответствии с теоремой В. А. Котельникова [8] определяется интервалом между точками дискретизации, в нашем случае – пространственным интервалом между электродами на поверхности торса. Интервал дискретизации должен выбираться в соответствии с частотным пространственным спектром распределения потенциала на поверхности наблюдения.

Рассмотрим дискретизацию распределения потенциала на поверхности торса и поверхности квазиэпикарда, представляемых моделями соосных эллиптических цилиндров. В соответствии с [9] в случае вещественного распределения ширина спектрального окна по вертикальной координате K_z и по периметру цилиндрической поверхности K_l определяется формулами

$$K_{z} = \frac{1}{2\Delta z} = \frac{N_{z}}{2B}; \quad K_{l} = \frac{1}{2\Delta l} = \frac{N_{L}}{2L},$$
 (1)

где N_z и N_l – количества точек дискретизации поверхности эллиптического цилиндра по вертикальной координате *z* и по длине дуги периметра *l*; *B* и *L* – высота и периметр цилиндрической поверхности распределения потенциала.

Проанализируем влияние выбора количества электродов на примере одиночной неоднородности в распределении потенциала, порождаемой дипольным источником, расположенным в объеме сердца около его поверхности (рис. 4).



Рис. 4. КППКЭ для малой неоднородности

Рассмотрим случай, когда интервалы Δz и Δl представляют собой интервалы между соседними электродами, а количество электродов $N_{_9} = (N_{_2} + 1)N_L$ с учетом цикличности распределения потенциала по периметру. Для получения сглаженных спектральных оценок пространственные распределения потенциала взвешивались двумерным окном Хэмминга [9]. При этом поскольку частотный дискрет (шаг частотной сетки) по вертикальному и горизонтальному направлениям определяется формулами

$$\Delta k_l = \frac{1}{\Delta l \cdot N_l}; \quad \Delta k_z = \frac{1}{\Delta z \cdot N_z}, \tag{2}$$

то для уменьшения частотного дискрета при вычислении спектра путем двумерного дискретного преобразования Фурье распределения потенциала дополнялись нулевыми отсчетами.

Центральные сечения пространственных спектров потенциала на поверхности торса и квазиэпикарда для рассматриваемого случая представлены на рис. 5, причем по горизонтальной оси откладываются пространственные частоты k_i , соответствующие интервалам длин дуг периметра. Параметрами кривых на рис. 5 являются количества рядов электродов по периметру (первый параметр) и по высоте (второй параметр). Из рис. 5 следует, что выбор числа точек дискретизации равным числу электродов по соответствующему направлению ограничивает обзор частотного спектра карты потенциалов и не позволяет регистрировать достаточно высокие пространственные частоты, т.е. достаточно мелкие неоднородности в распределении потенциала.



Рис. 5. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на квазиэпикарде без интерполяции

Таким образом, для приемлемой регистрации достаточно высоких пространственных частот (более 20 м⁻¹) необходимо увеличивать ширину спектрального окна путем уменьшения пространственных дискретов по вертикальной координате Δz и по длине периметра Δl :

$$\Delta l = \frac{L}{N_{el} n_{int}}; \ \Delta z = \frac{B}{N_{ez} n_{int}}, \ K_l = K_{l0} n_{int}; \ K_z = K_{z0} n_{int},$$
(3)

где N_{el} , N_{ez} – количества рядов электродов по периметру и по высоте соответственно; n_{int} – коэффициент интерполяции, показывающий, во сколько раз увеличивается количество интервалов дискретизации по каждому направлению; K_{l0} , K_{z0} – размеры спектрального окна при отсутствии интерполяции, когда $N_l = N_{el}$; $N_z = N_{ez}$ в формуле (2).

На рис. 6 приведено центральное сечение двумерного спектра потенциала на квазиэпикарде с учетом интерполяции ($n_{int} = 8$) для неоднородности, показанной на рис. 4. Параметры кривых аналогичны рис. 5: N_{el} и N_{ez} соответственно. Как следует из рис. 6, проведение интерполяции позволяет расширить частотный диапазон при анализе карт потенциала на квазиэпикарде. Так, при комбинации электродов 16 × 7 (16 рядов по периметру, 7 рядов по высоте) регистрируются пространственные частоты до 40–45 м⁻¹.



Рис. 6. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на квазиэпикарде с интерполяцией

Для сравнения на рис. 7 представлено центральное сечение двумерного спектра потенциала на торсе, полученное при тех же условиях, как для рис. 6. Характерно, что пространственное разрешение на торсе получается существенно хуже: пространственные частоты в спектре на порядок меньше, чем для распределения потенциала на квазиэпикарде. Это объясняется эффектом ослабления пространственных гармоник потенциала, удовлетворяющего уравнению Пуассона и создаваемого источниками поля в эпикарде [Гранада]. В соответствии с рис. 7 для описания карты потенциалов на торсе не требуется большое количество электродов: спектр при $N_{el} = 8$, $N_{ez} = 5$ практически не отличаются от спектра при $N_{el} = 32$, $N_{ez} = 32$.



Рис. 7. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на торсе с интерполяцией

Measuring. Monitoring. Management. Control

Таким образом, карты потенциала на квазиэпикарде являются более информативными и отображают более высокие пространственные частоты, а значит, более мелкие неоднородности. Предложенный подход с использованием пространственных спектров для карт потенциала на поверхности квазиэпикарда позволяет оценивать влияние количества и способа расположения электродов в многоэлектродной системе на поверхности торса на пространственное разрешение в карте потенциала.

Библиографический список

- 1. *Титомир, Л. И.* Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003.
- Comprehensive Electrocardiology / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm. – 2nd edn. – London : Springer, 2011. – Chapter 9. – P. 2291.
- 3. URL: https://www.medtronic.com/us-en/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/cardiac-mapping
- Пат. 2651068 Российская Федерация. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палютина Ю. А., Стрелков Н. И., Черников А. И. – заявл. 05.07.2017; опубл. 18.04.2018.
- Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface / G. V. Zhikhareva, M. N. Kramm, O. N. Bodin, R. Seepold, A. I. Chernikov, Y. A. Kupriyanova, N. A. Zhuravleva // Proceedings of 6th International Work-Conference (IWBBIO 2018). – Granada, Spain, 2018. – Part I.
- 6. Бодин, О. Н. Обработка электрокардиосигналов для реконструкции электрической активности сердца на квазиэпикарде / О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, А. И. Черников, Ю. А. Палютина // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 161–164.
- 7. *Zhikhareva, G.* Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem / G. Zhikhareva, M. Kramm. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
- 8. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. Москва : Высш. шк, 2016. 528 с.
- 9. Марпл.-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.-мл. Москва : Мир, 1990. 584 с.

References

- 1. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003. [In Russian]
- Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. Comprehensive Electrocardiology. 2nd edn. London: Springer, 2011, chapter 9, p. 2291.
- Available at: https://www.medtronic.com/us-en/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/cardiacmapping
- Pat. 2651068 Russian Federation. Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa [Pat. 2651068 Russian Federation. Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart]. Bodin O. N., Bodin A. Yu., Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Palyutina Yu. A., Strelkov N. I., Chernikov A. I. – zayavl. 05.07.2017; opubl. 18.04.2018. [In Russian]
- Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. Proceedings of 6th International Work-Conference (IWBBIO 2018). Granada, Spain, April 25– 27, 2018, part I.
- Bodin O. N., Kramm M. N., Chernikov A. I., Palyutina Yu. A. Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2018» [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measurement information: materials of the Intern. scientific.-tekhn. conf. "Selenginskii read – 2018".]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 161– 164. [In Russian]
- 7. Zhikhareva G., Kramm M. Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
- 8. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Electronic circuits and signals]. Moscow: Vyssh. shk, 2016, 528 p. [In Russian]
- 9. Marpl.-ml., S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir, 1990, 584 p. [In Russian]

Крамм Михаил Николаевич

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

Kramm Mikhail Nikolaevich

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

Образец цитирования:

Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 61–68. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-7.

А.В.Кузьмин

РАСЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕРДЦА

A. V. Kuzmin

ESTIMATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS MODIFICATION FOR MODELING OF ELECTRICAL ACTIVITY OF HEART

Аннотация. Цель исследования. 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 электрофиозиологических характеристик сердца. В работе используются трехмерные модели на основе опорных точек, схематично представляющие сердце и расположение диполей, при этом используются методы геометрического моделирования. Результаты работы. В данной работе описан способ динамического изменения геометрических параметров модели сердца на основе электрокардиографических данных. Представлен процесс расчета модификации геометрических параметров модели электрической активности сердца. Определены значения потенциала на поверхности модели сердца. На основе упрощенной электромеханической модели миокарда рассчитаны значения смещения точек пространственного расположения диполей. Выполнен численный эксперимент с использованием электрокардиографических данных и схематичной трехмерной модели пространственного расположения диполей. Приведенные результаты вычислительного эксперимента показали возможность решения поставленной задачи. Выводы. В статье рассмотрены этапы расчета геометрических параметров расположения диполей и изменения параметров геометрической модели, раскрыт этап получения значения трансмембранного потенциала действия на основе данных дипольных моментов, проведен 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.

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. *Results of the work.* In the current work the method of dynamic modification of geometrical parameters of model of heart on the base of electrocardiographic data is described. The process of estimating the dynamic modification of geometric parameters of model of electrical activity of the heart. The author determined the values of electric potential on the surface of the model of the heart. The values of modification of points of spatial location of dipoles are determined on the base of simplified electromechanical model. Computational experiment with electrocardiographic data and schematic 3D model of dipole spatial location is fulfilled. The results of the computational experiment showed the possibility of solving the task. *Conclusions.* In the paper the steps of estimation of parameters dipoles location and modification of parameters of geometric model are considered, the step of estimation of values of action transmembrane potential on the base 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.

Каючевые слова: электрическая активность сердца, дипольные моменты, многодипольная модель, трехмерная модель сердца, геометрические параметры.

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

Введение

Одним из актуальных и перспективных подходов к диагностике состояния сердца является моделирование его электрической активности с использованием электрических параметров, неинвазивно зарегистрированных на поверхности тела человека [1].

Решение задачи моделирования электрической активности сердца (ЭАС) является важным не только для диагностики, но и для симуляционого обучения. Примерами этого могут служить система топической диагностики «Дэкарто» [2] и программная система моделирования и визуализации ЭАС ECGSim [3].

При моделировании ЭАС важную роль играют геометрические параметры модели сердца, активность сердца напрямую связана с изменением его геометрических параметров [4]. В существующих системах геометрическая трехмерная модель сердца принимается статичной. Таким образом, задача динамической модификации геометрических параметров трехмерной модели сердца является актуальной [5].

Описание модели ЭАС с динамической составляющей

В данном исследовании используется многодипольная модель эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), разработанная Л. И. Титомиром [6]. Она связывает электрический потенциал, зарегистрированный на поверхности тела, с электрическими параметрами ЭЭГС, представленного набором диполей, расположенных на поверхности сердца. Важной особенностью данной модели является явное использование геометрических параметров взаимного пространственного расположения поверхностей сердца и торса [7]: α_{ji} – углы между векторами дипольных моментов D_i (i = 1...I) и прямыми, соединяющими j точку отведения с i диполем сердца; r_{ji} – расстояния от i диполя до j точки отведения. Они зависят от момента времени t в случае динамического изменения геометрической модели. С учетом этого общий алгоритм моделирования ЭАС сердца содержит следующие этапы [7]:

 – регистрация ЭКС в 12 стандартных отведениях с использованием цифрового электрокардиографа (возможно использование альтернативных систем отведений);

- сегментация ЭКС с выявлением основных элементов ЭКГ на оси времени t;

– получение геометрических параметров моделей сердца и торса, соответствующих индивидуальным особенностям;

– синтез поверхностных моделей сердца и торса пациента;

– расчет геометрических параметров $\alpha(t)$ и r(t);

- определение дипольных моментов $D_i(t)$;
 - Measuring. Monitoring. Management. Control

 – определение потенциалов участков поверхности сердца на основе значения дипольных моментов;

- расчет параметров модификации геометрической модели сердца;

- модификация геометрических параметров трехмерной модели сердца.

При этом расчет параметров проводится для каждого временного отсчета ЭКС t (0..T). Исследуемый кардиоцикл разбивается на 100 отсчетов.

В исследовании [7] подробно рассмотрен этап получения дипольных моментов с использованием тестовых моделей, имеющих 12 вершин и трехуровневую структуру (по оси *y*), по четыре вершины на каждом уровне. В вершинах расположены диполи D_1-D_{12} , векторы дипольных моментов соответствуют нормалям к рассматриваемым вершинам. В соответствии с условиями исследования электрическая активность предсердий определяется диполями D_9-D_{12} , электрическую активность желудочков отражают диполи D_1-D_8 .

Определение потенциалов участков поверхности

Для определения потенциалов участков поверхности дипольных нужно воспользоваться соотношением, связывающим значения дипольного момента и потенциал участка поверхности сердца [8]:

$$\phi_i = \frac{\Omega_i}{4\pi} \cdot \frac{D_i}{\Delta S_i \sigma},\tag{1}$$

где φ_i [B] – потенциал *i* участка поверхности модели; Ω_i – телесный угол, образуемый *i* участком поверхности модели; D_i [A·м] – дипольный момент *i* диполя модели (*i* = 1...*I*); ΔS_i [м²] – площадь *i* участка поверхности модели; σ [См/м] – средняя удельная проводимость тела; *I* – количество диполей модели сердца, соответствующее количеству участков поверхности модели.

Следует сразу оговориться, что в соответствии с многодипольной моделью ЭАС геометрическое место диполя определяется точкой пространства, в данном исследовании учитывается, что диполь отражает электрическую активность некоторого участка поверхности модели сердца, т.е. точки и ее окрестности. Таким образом, чем больше используется диполей, тем более детальная модель может быть построена.

Используемые тестовые модели включают 12 вершин, в которых расположены диполи, следовательно, имеется 12 участков поверхности модели, потенциалы которых требуется определить. Схема расположения диполей и участков поверхности на примере модели сферы приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчета телесных углов

Из рис. 1 видно, что условная сфера своим центром совмещена с центром тестовой модели O, а ее радиус R выбран так, чтобы вершины 1–4 и 9–12 принадлежали поверхности сферы. Для удобства расчета телесных углов сфера разделена по высоте на три равные высотой hчасти, соответствующие трем уровням тестовой модели. Чтобы каждой вершине тестовой модели соответствовал участок поверхности сферы, каждая из трех частей разделяется на четыре равных участка плоскостями *хоу* и *zoy*, а также двумя плоскостями параллельными *хоz* (см. рис. 1).

Площадь сферического сегмента определяется по формуле [9]

$$\Delta S = 2\pi Rh,\tag{2}$$

где *R* [м] – радиус сферы; *h* [м] – высота сферического сегмента.

В случае высоты *h* равной одной трети диаметра сферы $(1/3 \cdot 2R)$ площадь верхнего и нижнего сегментов равна $4/3 \cdot \pi \cdot R^2$ (это одна треть от полной площади сферы $4 \cdot \pi \cdot R^2$). Если вычесть площади верхнего и нижнего сегментов сферы из общей площади, то площадь среднего пояса сферы также будет равна $4/3 \cdot \pi \cdot R^2$. Как было сказано выше, каждая из трех частей разделена координатными плоскостями на четыре равных участка, таким образом, получено 12 участков с равной площадью $4/12 \cdot \pi \cdot R^2$.

Телесный угол, образованный сферическим сегментом, определяется по формуле [9], подставив в которую полученное выше значение площади, получим решение

$$\Omega_i = \frac{\Delta S_i}{R^2} = \frac{4\pi}{12}.$$
(3)

После подстановки реальных значений в уравнение (2) радиуса сферы R = 0,1031 м получено значение $\Delta S_i = 0,0028$ м². При использовании полигональной модели поверхности сердца, полученной методом триангуляции (см. рис. 2), площадь участка определяется площадями треугольников, образующих рассматриваемый участок, телесный угол определяется с учетом квадрата расстояния от центра геометрической модели (начало координат на рис. 2) до соответствующего участка поверхности.

После подстановки в уравнение (1) значений в общем виде и упрощения получено следующее выражение для расчета φ_i :

$$\phi_i = \frac{D_i}{4\pi R_i^2 \sigma}.\tag{4}$$

Значение средней удельной проводимости $\sigma = 0,216$ см/м для расчетов получено как обратная величина к среднему удельному сопротивлению $\rho = 4,63$ Ом·м [10].



Рис. 2. Схема расчета телесных углов в полигональной модели сердца

.....

Measuring. Monitoring. Management. Control
Результат расчета по формуле (4) необходимо проинтегрировать для получения значений трансмембранного потенциала действия (ТМПД) [8]. Предлагается использовать кусочное интегрирование методом трапеций по времени *t* в цикле для каждого участка кривой φ_i . При интегрировании параметр *t*, который в цифровом представлении сигнала играет роль безразмерного номера отсчета (в рассматриваемом случае t = 1...100), заменяется на реальный временной параметр, измеряемый в секундах (в рассматриваемом случае $\Delta t = 0,0082$ с, определяется как 1/100 длительности кардиоцикла в секундах).

Кроме того, целесообразно нормировать полученную величину ТМПД путем отображения в диапазон [0..1], как сделано в работе [11]. Это обусловлено тем, что многие разработанные биофизические модели [12, 13] описывают электрические, химические и механические процессы на уровне клеток миокарда, а в данном случае рассматривается участок поверхности сердца, интегрально отражающий электрическую активность большого количества клеток миокарда. Такое приведение позволит согласовать значение потенциала участка поверхности сердца со значениями, принятыми для моделей электрической активности на клеточном уровне.

Результаты исследований электрической активности клетки миокарда [14, 15] позволяют определить взаимосвязь параметров ТМПД, величины сокращения мышечных волокон и развиваемого усилия. Данные графики, совмещенные с полученными нормализованными значениями потенциала участка поверхности сердца, относящимися к диполю D_{10} и рассчитанными на основе формулы (3) для интервала времени, соответствующего зубцу P (t = 0 в момент начала зубца P), приведены на рис. 3.



Рис. 3. Временные диаграммы: *а* – нормализованный рассчитанный потенциал участка поверхности сердца *D*₁₀; *б* – ТМПД миокарда; *в* – изменение длины волокна миокарда

Для расчета смещений может использоваться упрощенная электромеханическая модель миокарда, предложенная в работе [15], включающая активный элемент изменяемой длины, который управляется нормализованным значением ТМПД (см. рис. 3,*a*), и вязкоупругий элемент. Применяя подобную модель к исследуемой модели пространственного расположения диполей (см. рис 1) с учетом полученных нормализованных значений потенциала на участке поверхности миокарда (см. рис. 3,*a*) в интервал времени, соответствующий пику *P* на ЭКГ, получено значение модуля смещения рассматриваемых точек расположения диполей (в данном случае D_9-D_{12}). В качестве направлений смещения точек расположения диполей в работе [16] предлагается использовать нормали к этим точкам. Полученный результат приведен на рис. 4.



Рис. 4. Трехмерная модель пространственного расположения диполей с модифицированными координатами *D*₉–*D*₁₂

После изменения точек пространственного расположения диполей перед переходом к следующему t + 1 отсчету ЭКС производится перерасчет геометрических параметров $\alpha(t)$ и r(t) трехмерной модели сердца и визуализация результата средствами компьютерной графики [17].

Заключение

Предложен алгоритм моделирования ЭАС с модификацией геометрических параметров модели. Рассмотрен этап расчета модификации геометрических параметров модели. Показано вычисление ТМПД на основе имеющихся значений дипольных моментов. На основе нормализованных значений ТМПД с использованием упрощенной электромеханической модели получены значения смещения точек пространственного расположения диполей. Результаты вычислительного эксперимента показывают возможность решения поставленной задачи.

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).

Библиографический список

 Понизовкина, Е. Для диагностики будущего / Е. Понизовкина // Наука Урала. – 2004. – № 25. – С. 4. – URL: http://www3.uran.ru/gazetanu/2004/10/nu25/nu_252004.pdf (дата обращения: 15.01.2019).
 Официальный сайт проекта ECGSim. – URL: http://www.ecgsim.org (дата обращения: 15.01.2018).

Measuring. Monitoring. Management. Control

- 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 // Biomediziniche 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.
- Титомир, Л. И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука ; Физматлит, 1999. – 447 с.
- Кузьмин, А. В. Определение дипольных моментов при моделировании электрической активности сердца с модификацией геометрических параметров / А. В. Кузьмин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 1. – С. 87–94.
- Полосин, В. Г. Система стохастического мониторинга состояния электрофизиологических характеристик сердца на основе энтропийно-параметрического анализа : дис. ... д-ра техн. наук / Полосин В. Г. – Пенза, 2017. – 368 с.
- 9. Выгодский, М. Я. Справочник по элементарной математике / М. Я. Выгодский. 7-е изд. Москва : Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1954. 412 с.
- 10. *Rush, S.* Resistivity of body tissues at low frequencies / S. Rush, J. A. Abildskov, R. McFree // Circulation Res. 1963. № 12. C. 40–50.
- Inter-model consistency and complementarity: Learning from ex-vivo imaging and electrophysiological data towards an integrated understanding of cardiac physiology / O. Camara, M. Sermesant, P. Lamata, L. Wang, M. Pop, J. Relan, M. De Craene, H. Delingette, H. Liu, S. Niederer, A. Pashaei, G. Plank, D. Romero, R. Sebastian, K. C. L. Wong, H. Zhang, N. Ayache, A. F. Frangi, P. Shi, N. P. Smith, G. A. Wright // Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2011. № 107. C. 122–133.
- 12. Дещеревский, В. И. Математические модели мышечного сокращения / В. И. Дещеревский ; под ред. акад. Г. М. Франка. Москва : Наука, 1977. 160 с.
- 13. *Типанс, И. О.* Математическое моделирование процессов возбуждения и сокращения в клетках сердца : дис. ... канд. физ-мат.. наук / Типанс И. О. Рига, 1984. 169 с.
- 14. Brutsaert, D. L. Load clamp analysis of maximal force potential of mammalian cardiac muscle / D. L. Brutsaert, P. R. Housmans // The Journal of Physiology. 1977. Вып. 271, № 3. С. 587–603.
- Sermesant, M. An Electromechanical Model of the Heart for Image Analysis and Simulation / M. Sermesant, H. Delingette, N. Ayache // IEEE transactions on medical imaging. – 2006. – Вып. 25, № 5. – С. 612–625.
- Кузьмин, А. В. Моделирование и визуализация работы сердца в компьютерных приложениях / А. В. Кузьмин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2 (5). – С. 1031–1035.
- Kosnikov, Yu. N. Morphing of spatial objects in real time with interpolation by functions of radial and orthogonal basis / Yu. N. Kosnikov, A. V. Kuzmin, Hoang Thai Ho // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Вып. 1015. – С. 032066.

References

- 1. Ponizovkina E. *Nauka Urala* [Science Of The Urals]. 2004, no. 25, p. 4. Available at: http://www3.uran.ru/gazetanu/2004/10/nu25/nu_252004.pdf (accessed Jan. 15, 2019). [In Russian]
- Ofitsial'nyy sayt proekta ECGSim [Official site of ECGSim project]. Available at: http://www.ecgsim.org (accessed Jan. 15, 2018).
- 3. Mateasik A., Bacharova L., Kniz J., Titomir L. I. *Biomediziniche Technik* [Biomedical engineering]. 2001, iss. 46, no. 2, pp. 79–81.
- 4. Titomir L. I. *Elektricheskiy generator serdtsa* [Electric generator heart]. Moscow: Nauka, 1980, 371 p. [In Russian]
- 5. Kuz'min A. V. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University]. 2018, no. 1 (63), pp. 95–102. [In Russian]
- 6. Titomir L. I., Kneppo P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* [Mathematical modeling of bioelectric generator hearts]. Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1999, 447 p. [In Russian]
- Kuz'min A. V. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 1, pp. 87–94. [In Russian]
- 8. Polosin V. G. Sistema stokhasticheskogo monitoringa sostoyaniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa na osnove entropiyno-parametricheskogo analiza: dis. d-ra tekhn. nauk [System of stochastic monitoring of the state of electrophysiological characteristics of the heart on the basis of entropy-parametric analysis: dis. ... dr. techn. sciences]. Penza, 2017, 368 p. [In Russian]

76

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

- 9. Vygodskiy M. Ya. *Spravochnik po elementarnoy matematike* [Handbook of elementary mathematics]. 7th ed. Moscow: Gos. izd-vo tekhn.-teor. lit., 1954, 412 p. [In Russian]
- 10. Rush S., Abildskov J. A., McFree R. Circulation Res. 1963, no. 12, pp. 40-50.
- Camara O., Sermesant M., Lamata P., Wang L., Pop M., Relan J., De Craene M., Delingette H., Liu H., Niederer S., Pashaei A., Plank G., Romero D., Sebastian R., Wong K. C. L., Zhang H., Ayache N., Frangi A. F., Shi P., Smith N. P., Wright G. A. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2011, no. 107, pp. 122–133.
- 12. Deshcherevskiy V. I. *Matematicheskie modeli myshechnogo sokrashcheniya* [Mathematical models of muscle contraction]. Moscow: Nauka, 1977, 160 p. [In Russian]
- 13. Tipans I. O. Matematicheskoe modelirovanie protsessov vozbuzhdeniya i sokrashcheniya v kletkakh serdtsa: dis. kand. fiz-mat. nauk [Mathematical modeling of excitation and contraction processes in heart cells: dis. ... cand. phys. sciences]. Riga, 1984, 169 p. [In Russian]
- 14. Brutsaert D. L., Housmans P. R. The Journal of Physiology. 1977, iss. 271, no. 3, pp. 587-603.
- 15. Sermesant M., Delingette H., Ayache N. *IEEE transactions on medical imaging*. 2006, iss. 25, no. 5, pp. 612–625.
- Kuz'min A. V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2015, vol. 17, no. 2 (5), pp. 1031–1035. [In Russian]
- Kosnikov Yu. N., Kuzmin A. V., Hoang Thai Ho Journal of Physics: Conference Series. 2018, iss. 1015, p. 032066.

Кузьмин Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент, кафедра информационно-вычислительных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40), E-mail: flickerlight@inbox.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. Расчет модификации геометрических параметров при моделировании электрической активности сердца / А. В. Кузьмин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 69–76. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-8.

УДК 004.7; 004.9; 612.172.4

А. Г. Убиенных, Г. Ф. Убиенных, О. Н. Бодин, А. В. Кузьмин, А. Ю. Тычков, О. А. Тимохина

ПРИМЕНЕНИЕ КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ СБОРА И ОБРАБОТКИ КАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

A. G. Ubiennykh, G. F. Ubiennykh, O. N. Bodin, A. V. Kuzmin, A. Y. Tychkov, O. A. Timokhina

APPLICATION OF CHANNEL CODING IN THE DISTRIBUTED SYSTEM FOR COLLECTION AND PROCESSING OF CARDIOGRAPHIC INFORMATION

Аннотация. Актуальность и цели. Заболевания сердечно-сосудистой системы являются важной медицинской и социальной проблемой. Использование распределенной системы сбора и обработки кардиографической информации – один из возможных методов снижения последствий заболеваний сердца, позволяющий производить анализ электрокардиосигнала на протяжении продолжительного времени в условиях повседневной жизни. Использование канального кодирования является одним из необходимых элементов систем, использующих локальную вычислительную сеть (LAN). Объект исследования – распределенная система мониторинга электрокардиосигналов с использованием LAN. Предмет исследования – технические средства канального кодирования / декодирования. Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием теории обработки сигналов, системного анализа, теории помехоустойчивого кодирования. Результаты. Разработана и проанализирована архитектура распределенной системы мобильного мониторинга электрокардиосигналов с использованием LAN. Предложены схемы кодера / декодера канального кода. Проведено моделирование работы системы, которое подтвердило повышение достоверности передачи данных на основе использования канальных кодов. Выводы. Предложенные технические средства для распределенной системы мобильного мониторинга электрокардиосигналов учитывают специфику построения системы с использованием как беспроводных, так и проводных сетей передачи информации. Применение предложенных средств канального кодирования / декодирования позволяет повысить достоверность передачи информации в распределенной системе мониторинга состояния сердечной деятельности пациентов.

A b s t r a c t. *Background*. Cardiovascular diseases are an important medical and social problem. One of the possible methods for reducing the impact of heart diseases is the use of a distributed system for collecting and processing of cardiographic information. It allows the continuous electrocardiosignal analysis in everyday life conditions. Channel coding is one of the necessary elements of the systems with local area network (LAN). The object of the study is a distributed system with LAN for electrocardiosignal monitoring. The subject of the study is the technical means of channel coding / decoding. *Materials and methods*. The study is conducted using such theories as signal analysis theory, information analysis and processing theo-

© Убиенных А. Г., Убиенных Г. Ф., Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Тычков А. Ю., Тимохина О. А., 2019

ry, systematic analysis theory, interference-resistant coding theory. **Results**. The architecture of the distributed system with LAN for electrocardiosignal monitoring was developed and analysed. The schemes of coder / decoder for channel coding are proposed. The modelling was conducted to increase the reliability of data transmission. **Summary**. Proposed technical means of the distributed system for electrocardiosignal monitoring take into account the specificities of building a system using wireless and wired network of information transmission. The use of proposed means of channel coding / decoding will allow the development of the distributed system for collection and processing of data for heart activity monitoring.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, мониторинг, распределенный сбор информации, локальная вычислительная сеть, канальный код, кодер / декодер.

K e y w o r d s: electrocardiosignal, monitoring, distributed collection of information, local area network, channel code, coder / decoder.

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы, характеризующиеся скоротечностью и приводящие к потере трудоспособности или смерти больных, являются важной медицинской и социальной проблемой [1]. Современные технические средства, применяемые в области медицины, позволяют собирать и накапливать большие объемы диагностических данных, которые могут использоваться для оценки состояния и прогнозирования течения заболевания с использованием методов обработки сигналов, распознавания образов и анализа информации [2–4]. Одним из возможных средств снижения последствий заболеваний сердца является использование распределенной системы сбора и обработки кардиографической информации, позволяющей производить анализ электрокардиосигнала (ЭКС) на протяжении продолжительного времени и заблаговременно обнаруживать признаки опасных состояний сердца.

Распределенный сбор кардиографической информации

Распределенный сбор кардиографической информации осуществляется системой сбора кардиографической информации. Структура системы сбора кардиографической информации приведена на рис. 1.





Measuring. Monitoring. Management. Control

Система сбора кардиографической информации реализует следующие функции: сбор кардиографической информации; передачу кардиографической информации; накопление и хранение кардиографической информации; анализ кардиографической информации; отображение результатов анализа. Сбор и передача кардиографической информации реализуются подсистемой сбора и передачи данных. Функции накопления и хранения кардиографической информации, анализа кардиографической информации и отображения результатов анализа реализуются на сервере медицинского учреждения.

Функция сбора кардиографической информации с портативных устройств регистрации параметров, установленных на пациентах, реализуется устройством сбора данных через беспроводной канал связи. Аппаратная реализация данного компонента системы осуществляется с помощью портативного устройства регистрации ЭКГ и вычислительного устройства (например, смартфона) [5]. Часто при мониторинге пациентов медицинский работник сохраняет накопленные данные на ПК, являющийся рабочим местом кардиолога. Затем эта информация должна быть передана на сервер медицинского учреждения для хранения и обеспечения доступа другим медицинским работникам.

Функция передачи кардиографической информации от подсистемы сбора и передачи данных на сервер медицинского учреждения реализуется прикладным ПО и сетевым интерфейсом по проводному каналу связи (*LAN*). Обмен между подсистемами осуществляется канальными кодерами / декодерами, обеспечивающими помехоустойчивое кодирование информации [6, 7].

Функция накопления и хранения кардиографической информации реализуется базой данных (БД). БД управляется системой управления базами данных (СУБД). Личные данные каждого регистрируемого перед началом выполнения задания должны быть занесены в БД на основе предварительных исследований. Прежде всего, это минимальное, среднее, максимальное значения, а также допустимое отклонение от нормы. Эти параметры являются индивидуальными и впоследствии играют ключевую роль при мониторинге кардиографической информации.

Анализ кардиографической информации реализуется с помощью специализированного прикладного ПО, которое может запускаться как на локальном ПК, так и на сервере. Для автоматизированного анализа ЭКС разработано значительное число алгоритмов, имеющих свою специализацию и ориентированных на различные типы заболеваний [3]. Одним из перспективных методов обработки ЭКС является разложение сигнала на эмпирические моды [4], применение вейвлет-преобразования [8] для обнаружения аритмий, а также амплитудновременные методы анализа, как, например, определение точки *J* при анализе электрической активности сердца [5]. Поскольку реализация многих алгоритмов является ресурсоемкой, перспективным подходом представляется возможность их запуска на сервере с возможностью доступа с мобильных устройств, т.е. облачный сервис [9].

Функция отображения результатов анализа реализуется на мобильном устройстве [5], на локальном ПК и на сервере. Функция включает отображение динамики изменения ЧСС зарегистрированного ЭКС в одном из стандартных отведений по выбору пользователя или по всем сразу.

Одним из элементов архитектуры распределенной системы сбора данных является локальная вычислительная сеть, связывающая локальные рабочие места с сервером медицинского учреждения. Передача данных по такому каналу связи требует кодирования/декодирования информации с использованием канального кода. Важными характеристиками при этом являются уровень достоверности передачи информации и ее устойчивость к помехам.

Система передачи данных на основе канального кода

В локальных вычислительных сетях нашел широкое применение канальный код типа NEW [10, 11–13].

Схема кодера кода *NEW* представлена на рис. 2.

Схема кодера кодом *NEW* может быть выполнена на трех сумматорах по модулю два, двух логических схемах, двух элементах задержки на инверторах, триггерах *D* и *T*.

Разработанная схема декодера кода NEW [14] приведена на рис. 3.

В данном декодере внутреннего кода одновременно решаются вопросы синхронизации и преобразования канальных сигналов в двоичные.



Рис. 2. Кодер кода NEW



Рис. 3. Декодер кода NEW

Моделирование системы кодирования и декодирования

Модель кодера канального кода NEW представлена на рис. 4. Временные диаграммы работы кодера представлены на рис. 5.



Рис. 4. Модель кодера канального кода NEW

Measuring. Monitoring. Management. Control



Рис. 5. Временные диаграмы работы кодера канального кода NEW

Биполярный сигнал на выходе кодера формируется с помощью схемы, состоящей из типовых блоков пакета Simulink [15]: *Gain* – блок усиления на константу 2, *Constant* – блок входной константы (–1) и *Add* – сумматор на 2 входа.

Модель декодера канального кода *NEW* также реализована на основе типовых блоков пакета *Simulink* и показана на рис. 6. Временные диаграммы работы декодера приведены на рис. 7.



Рис. 6. Модель декодера канального кода NEW



Рис. 7. Временные диаграммы работы декодера канального кода NEW

Функции регистрации и синхронизации сигналов кода *NEW* выполняются с помощью двух счетчиков (*Counter*) и двух дешифраторов (*Deshifrator*), которые обеспечивают стробирование положительных и отрицательных импульсов кода *NEW*. Основные результаты процессов декодирования показаны на временных диаграммах рис. 7. На нижней диаграмме получен двоичный код: 10010100001100010010001.

Модель системы передачи данных на основе канального кода

Модель системы передачи на основе канального кода и разработанных моделей кодера и декодера в программной среде *Simulink* приведена на рис. 8.



Рис. 8. Модель системы передачи данных канальным кодом для статистических испытаний

Модель содержит следующие основные блоки:

- Discrete Impulse 1 генератор случайной двоичной последовательности импульсов;
- Gaussian Noise Generator источник дискретного гауссова белого шума;
- Coder кодер канального кода;
- Decoder, Decoder 1 декодеры канального кода.
- Остальные блоки являются стандартными из пакета Simulink.

Дискретная двоичная последовательность вырабатывается блоком *Discrete Impulse* 1 и подается на кодирование канальным кодом, например *NEW*. Затем закодированная последовательность поступает на декодер канального кода *Decoder*. С помощью блоков *Logical Operator* 1 и *Logical Operator* 2 на сигналы канального кода накладывается дискретный белый гауссов шум определенного уровня, и эта смесь сигнал-плюс-шум подается на второй декодер *Decoder* 1.

Декодированные последовательности выдаются на сравнение в блок *Subtract*. Несовпадающие двоичные биты подсчитываются счетчиком *Display* 1. Полученные данные позволяют определить вероятность ошибочного приема на бит канальным кодом.

При добавлении в рассмотренную модель (см. рис. 8) блока анализа структуры канального кода можно определить ошибкообнаруживающие способности канального кода.

Статистические испытания системы передачи данных на основе канального кода

Код *NEW* и другие канальные коды обладают способностью к обнаружению ошибок. Поскольку регистрация на приеме осуществляется у каждого полубита (биимпульса), то можно обнаружить искажение некоторых биимпульсов.

При приеме разнополярных сигналов с амплитудами $\sqrt{E_b}$ вероятность ошибки на бит равна [16–18]

$$p = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right),\tag{1}$$

причем

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du , \qquad (2)$$

где E_b – мощность полезного сигнала на бит; $N_0/2 = \sigma_0^2$ – дисперсия шума на выходе приемного фильтра (аддитивный белый гауссовский шум АБГШ).

График зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум E_b/N_0 , рассчитанный по формулам (1) и (2), приведен на рис. 9.



Рис. 9. Зависимость вероятности ошибки на бит от соотношения мощности сигнала и помехи

Вероятность ошибки кода NEW [16]

$$P_{\rm out}(n) = \sum_{i=1}^{n} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = \sum_{i=1}^{2k} C_{2k}^i \cdot p^i (1-p)^{2k-1}.$$
 (3)

Вероятность необнаружения ошибок этим кодом

$$P_{\rm HO}(n) = \frac{1}{2^k} \sum_{j=1}^{2^k} W_j p^j (1-p)^{2^{k-j}}, \qquad (4)$$

где *W_i* – число вариантов *j*-кратной необнаруживаемой канальными кодами ошибки.

Разработанные модели кодера и декодера для канального кода типа *NEW* протестированы и могут быть использованы для исследования характеристик канальных кодов, в частности, их способности к обнаружению ошибок в каскадных системах кодирования.

Заключение

Разработана и проанализирована архитектура распределенной системы мобильного мониторинга электрокардиосигналов с использованием *LAN*. Данная система может использоваться для сбора первичных данных пациентов для диагностики как состояния сердечнососудистой системы, так и психоэмоционального состояния. Проанализированы системы передачи информации на основе канального кода типа *NEW* с помощью программного пакета Simulink. Разработаны программы моделирования системы кодирования и декодирования на основе программных пакетов Matlab и Simulink. Проведено моделирование системы передачи информации на основе канального кода и разработанных моделей кодера и декодера в программной среде Simulink, которое доказало повышение достоверности передачи данных при использовании канального кода NEW.

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).

Библиографический список

- 1. *Albert, C.* Triggering of Sudden Death from Cardiac Causes by Vigorous Exertion / C. Albert, M. Mittleman, C. Chae // New England Journal of Medicine. – 2000. – № 343. – P. 1355–1361.
- Borodin, A. Architectural Approach to the Multisource Health Monitoring Application Design / A. Borodin, Y. Zavyalova, A. Zaharov, I. Yamushev // 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT. – Helsinki, Finland : FRUCT Oy, 2015. – P. 16–21.
- Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis / G. Clifford, F. Azuaje, P. McSharry (eds.). Norwood, MA : Artech House, 2006 – 270 c.
- 4. *Тычков, А. Ю*. Применение теории Гильберта-Хуанга в задачах обработки кардиографической информации : монография / А. Ю. Тычков, А. В. Кузьмин, П. П. Чураков ; под общ. ред. П. П. Чуракова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 150 с.
- Kuzmin, A. Mobile Heart Monitoring System Prototype Based on the Texas Instruments Hardware: Energy Efficiency and J-point Detection / A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin, M. Petrovsky, A. Sergeenkov // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems. – 2016. – Vol. 7, № 7. – P. 64–84.
- 6. *Форни, Ф.* Каскадные коды / Ф. Форни. Москва : Связь, 1974. 207 с.
- Chung, S. On the Design of Low Density Parity Check Codes within 0.0045 db of the Shannon Limit / S. Chung, D. Forney, T. Richardson, R. Urbanke // IEEE Comm. Letters. – 2001. – Vol. 5, № 2. – P. 58–60.
- Kuzmin, A. Mobile ECG Monitoring System Prorotype and Wavelet-Based Arrhythmia Detection Proceedings of the / A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin, S. Prokhorov, A. Stolbova // 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT. – Helsinki, Finland : FRUCT Oy, 2017. – P. 210–216.
- Особенности обработки электрокардиосигналов в системах мобильного мониторинга / В. И. Волчихин, М. А. Митрохин, А. В. Кузьмин, М. А. Сафронов, О. Н. Бодин, Н. Ю. Митрохина, А. Ю. Тычков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 1 (45). С. 54–63.
- 10. Tood, K. M. Error Correction Coding / K. M. Tood. Wiley, 2005. P. 804.
- 11. *Кларк, Дж.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи : пер. с англ. / Дж. Кларк, Дж. Кейн. Москва : Радио и связь, 1987. 214 с.
- 12. *Порохов, О. Н.* Сигналы и коды цифровых систем передачи / О. Н. Порохов // Электросвязь. 1980. № 1. С. 33–37.
- 13. Столингс, В. Передача данных / В. Столингс. 4-е изд. Санкт-Петербург : Питер, 2004. 750 с.
- 14. А.с. 1.591.189 СССР, H03M 5/12, 13/00. Устройство для декодирования сигналов / Савельев Б. А. 1990. Бюл. № 33.
- 15. *Черных, И. В.* SIMULINK Среда создания инженерных приложений / И. В. Черных. Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. 496 с.
- 16. Corazza, G. Digital Satellite Communications / G. Corazza. Italy, University of Bologna, 2007. P. 578.
- 17. *Скляр, Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. Москва : Вильямс, 2003. 1104 с.
- Савельев, Б. А. Оценка корректирующих свойств каскадных кодов на основе канальных кодов типа (n,k) / Б. А. Савельев, Г. В. Бобрышева, А. Г. Убиенных // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: ЭВТ. – 2003. – Вып. 1. – С. 17–24.

References

- 1. Albert C., Mittleman M., Chae C. New England Journal of Medicine. 2000, no. 343, p. 1355–1361.
- Borodin A., Zavyalova Y., Zaharov A., Yamushev I. 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Helsinki, Finland: FRUCT Oy, 2015, pp. 16–21.

Measuring. Monitoring. Management. Control

- 3. Clifford G., Azuaje F., McSharry P. (eds.) *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. Norwood, MA: Artech House, 2006, 270 p.
- 4. Tychkov A. Yu., Kuz'min A. V., Churakov P. P. *Primenenie teorii Gil'berta-Khuanga v zadachakh obrabotki kardiograficheskoy informatsii: monografiya* [Application of Hilbert-Huang theory in problems of cardiographic information processing: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2015, 150 p. [In Russian]
- 5. Kuzmin A., Safronov M., Bodin O., Petrovsky M., Sergeenkov A. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*. 2016, vol. 7, no. 7, pp. 64–84.
- 6. Forni F. Kaskadnye kody [Concatenated code]. Moscow: Svyaz', 1974, 207 p. [In Russian]
- 7. Chung S., Forney D., Richardson T., Urbanke R. IEEE Comm. Letters. 2001, vol. 5, no. 2, pp. 58-60.
- 8. Kuzmin A., Safronov M., Bodin O., Prokhorov S., Stolbova A. 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT. Helsinki, Finland: FRUCT Oy, 2017, pp. 210–216.
- Volchikhin V. I., Mitrokhin M. A., Kuz'min A. V., Safronov M. A., Bodin O. N., Mitrokhina N. Yu., Tychkov A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 1 (45), pp. 54–63. [In Russian]
- 10. Tood K. M. Error Correction Coding. Wiley, 2005, p. 804.
- 11. Klark Dzh., Keyn Dzh. *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi: per. s angl.* [Encoding with error correction in digital communication systems : transl. from English]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 214 p. [In Russian]
- 12. Porokhov O. N. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 1980, no. 1, pp. 33-37.
- 13. Stolings V. Peredacha dannykh [Data transmission]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2004, 750 p. [In Russian]
- 14. A.s. 1.591.189 SSSR, H03M 5/12, 13/00. *Ustroystvo dlya dekodirovaniya signalov* [A. S. 1.591.189 of the USSR, H03M 5/12, 13/00. Signal decoding device]. Savel'ev B. A. 1990, bull. no. 33. [In Russian]
- 15. Chernykh I. V. *SIMULINK Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK authoring Environment engineering applications]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2004, 496 p. [In Russian]
- 16. Corazza G. Digital Satellite Communications. Italy, University of Bologna, 2007, p. 578.
- 17. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical basis and practical application]. Moscow: Vil'yams, 2003, 1104 p. [In Russian]
- Savel'ev B. A., Bobrysheva G. V., Ubiennykh A. G. Voprosy radioelektroniki. Ser.: EVT [Questions of electronics. Ser.: EVT]. 2003, iss. 1, pp. 17–24. [In Russian]

Убиенных Анатолий Геннадьевич

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

Убиенных Геннадий Федорович

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

Бодин Олег Николаевич

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

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

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

Ubiennykh Gennadiy Fedorovich

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Кузьмин Андрей Викторович

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

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: tychkov-a@mail.ru

Тимохина Ольга Алексеевна

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: timokhina.olga.14.12@mail.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)

Tychkov Aleksandr Yur'evich

candidate of technical sciences, deputy director at the Research Institute for Basic and Applied Studies, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Timokhina Olga Alekseevna

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

Образец цитирования:

Применение канального кодирования в распределенной системе сбора и обработки кардиографической информации / А. Г. Убиенных, Г. Ф. Убиенных, О. Н. Бодин, А. В. Кузьмин, А. Ю. Тычков, О. А. Тимохина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 77–86. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-9.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.3.032, 666.638

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-10

С. А. Москалев, И. Н. Чебурахин, В. С. Волков, В. В. Кикот, Г. А. Кошкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

S. A. Moskalev, I. N. Cheburakhin, V. S. Volkov, V. V. Kikot, G. A. Koshkin

THE TEMPORAL STABILITY OF THE PIEZOCERAMIC SENSITIVE ELEMENTS CHARACTERISTICS FOR THE SENSORS OF MECHANICAL VALUES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является определение коэффициента старения характеристик чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков давления, изготовленных из материала – аналога ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ». Материалы и методы. Изготовлены пьезоэлементы, характеристики которых (емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) измерялись при хранении в течение 79 дней. Выявлена зависимость характеристик от времени и определены коэффициенты старения. Результаты. Снижение емкости пьезоэлементов хорошо описывается логарифмической зависимостью (коэффициент корреляции равен 0,993). Снижение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов описывается логарифмической зависимостью хуже (коэффициент корреляции равен 0,311). Поскольку диэлектрические потери пьезоматериала зависят от множества параметров внешней среды: температуры, влажности и т.д., то наиболее вероятная причина сильного разброса значений тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов во времени связана с отсутствием специальных условий хранения. Выводы. Из приведенных расчетов видно, что наиболее простой способ повышения временной стабильности параметров пьезоэлементов – предварительная выдержка в нормальных климатических условиях в течение не менее двух декад, т.е. 100 дней. При этом значение коэффициента старения характеристик пьезоэлемента уменьшается не менее, чем вдвое.

A b s t r a c t. *Background*. The object of the research is to determine the aging coefficient of the piezoelectric sensitive elements characteristics for pressure sensors made from a material – an analogue of PZT-83G. *Materials and methods*. The piezoelectric elements were made and their characteristics (capacitance and tangent of dielectric loss angle) were measured during 79 days storage. The dependence of characteristics on time is built and aging factors are determined. *Results*. The decrease in the capacitance of the piezoelectric elements is well described by the logarithmic dependence (the correlation coefficient is 0.993). Reducing the dielectric loss tangent of piezoelectric elements is described worse by the logarithmic dependence (the

© Москалев С. А., Чебурахин И. Н., Волков В. С., Кикот В. В., Кошкин Г. А., 2019

correlation coefficient is 0.311). Since the dielectric losses of a piezoceramic material depend on a variety of environmental parameters: temperature, humidity, etc., the most likely reason for the strong variation of the tangent of the dielectric loss angle of piezoelectric elements over time is the lack of special storage conditions. *Conclusions*. From the above calculations it can be seen that the simplest way to increase the temporal stability of the parameters of piezoelements is preliminary exposure at a normal climatically conditions for at least two decades, ie, 100 days. Exposure At the same time, the value of the aging coefficient of the characteristics of the piezoelectric element is no less than twice reduced.

К лючевые слова: пьезоэлектрический датчик, чувствительный элемент, пьезокерамика ЦТС-83Г, емкость, тангенс угла диэлектрических потерь.

K e y w o r d s: piezoelectric sensor, sensitive element, piezo-ceramic PZT-83G, capacitance, tangent of dielectric loss angle.

Введение

В настоящее время для создания датчиков механических величин (ускорений, акустических давлений, быстропеременных давлений) широко применяется пьезоэлектрический принцип преобразования, а в качестве материала для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) используется пьезокерамика, отличающаяся высокой пьезочувствительностью.

Погрешности ЧЭ оказывают значительное влияние на метрологические характеристики датчика в целом и поэтому их снижению уделяется большое внимание при разработке и изготовлении современной датчиковой аппаратуры. Практически все виды погрешностей, характерных для ЧЭ датчиков механических величин, можно учесть и скомпенсировать последующей обработкой измерительного сигнала во вторичной измерительной аппаратуре. Исключением являются погрешности от нестабильности электрофизических параметров, вызванные деградационными процессами в материале ЧЭ [1–4]. В частности, пьезокерамические элементы сразу после изготовления подвержены снижению ряда основных параметров – емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, пьезочувствительности, что необходимо учитывать при проектировании пьезоэлектрических датчиков [5].

Известно, что пьезокерамические материалы приобретают пьезоэлектрические свойства в макроскопическом масштабе только после приложения внешнего электрического поля – поляризации. Происходит упорядочение ориентации доменов спонтанной поляризации вдоль направления внешнего поля, сопровождающееся деформацией кристаллитов и их переходом в нестабильное состояние. Под действием этих факторов доменные границы смещаются – структура керамики разупорядочивается, переходя в более стабильное состояние [5–7].

Макроскопически старение сопровождается снижением пьезомодулей, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, ростом частот резонанса и механической добротности. Известно [5], что изменение электрофизических характеристик в первом приближении происходит по логарифмическому закону

$$X = X_0 + K \lg \tau \,, \tag{1}$$

где X₀ и X – начальное и текущее значение параметра; K – коэффициент старения за декаду; т, произв. ед. – время.

Длительные исследования показывают, что коэффициент старения не является постоянной величиной и уменьшается со временем также по логарифмическому закону. Поэтому полученное на первых декадах старения значение коэффициента старения является рамочным ограничением, задающим максимально возможную скорость старения.

Таким образом, знание коэффициента старения позволяет прогнозировать временное изменение параметров пьезокерамики и, следовательно, метрологических характеристик датчиков и преобразователей с ЧЭ на основе пьезокерамики. Логарифмический характер временной зависимости свойств пьезокерамики позволяет также использовать наиболее простой метод повышения временной стабильности – предварительное состаривание в течение нескольких декад. В настоящей работе рассмотрено старение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пьезокерамического материала ЦТС-83Г (НКТБ «Пьезоприбор») и его аналога производства АО «НИИФИ».

Экспериментальная процедура. Измерение параметров проводили в нормальных климатических условиях (НКУ) через 1, 2, 9, 31, 45, 72 и 79 дней после изготовления. Полученные результаты позволяют оценить характер изменения и значения коэффициентов старения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для рассмотренных материалов.

Результаты и обсуждение

Полученные данные приведены на графиках (рис. 1, 2) и в табл. 1.



Рис. 1. Нормированное значение емкости пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ»



Количество дней

Рис. 2. Нормированное значение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ»

Таблица 1

из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ» и НКТБ «Пьезоприбор»								
Время, дн.	Аналог ЦТС-83Г (АО «НИИФИ»)			ЦТС-83Г (НКТБ «Пьезоприбор»)				
	С, пФ	С отн.	tgδ	tgð, отн.	С, пФ	С отн.	tgδ	tgð, отн.
1	1680,0	1,0000	0,0200	1,0309	1681,0	1,0000	0,0220	1,0000
2	1665,0	0,9911	0,0191	0,9845	1668,0	0,9923	0,0211	0,9591
9	1619,0	0,9637	0,0171	0,8814	1648,0	0,9804	0,0210	0,9545
31	1630,0	0,9702	0,0189	0,9742	1642,0	0,9768	0,0210	0,9545
45	1602,0	0,9536	0,0187	0,9639	1644,0	0,9780	0,0207	0,9409
72	1584,0	0,9429	0,0174	0,8969	1624,0	0,9661	0,0197	0,8955
79	1565.0	0.9315	0.0197	1.0155	1579.0	0 9393	0.0210	0 9545

Экспериментальные данные по измеренным значениям емкости *С* и тангенса угла диэлектрических потерь tgб пьезоэлементов из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ» и НКТБ «Пьезоприбор»

Аппроксимация данных рис. 1 логарифмической зависимостью в соответствие с (1) дает следующее выражение:

$$C = 0,999 - 0,029 \cdot \lg(n), \tag{2}$$

где *С* – емкость; *n* – количество дней после температурного воздействия. Коэффициент корреляции аналитической зависимости (2) и экспериментально полученных значений равен 0,993, что свидетельствует о достоверности предположения о логарифмическом законе изменения параметра пьезокерамического материала.

Аппроксимация экспериментальных данных рис. 2 логарифмической зависимостью (1) дает коэффициент корреляции 0,311, что говорит от недостаточной точности аппроксимации.

Для сравнения на рис. 3 и 4 приведены аналогичные зависимости для материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор» [8]. Коэффициент корреляции для зависимости емкости от времени равен 0,828, для зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от времени – 0,735.



Количество дней

Рис. 3. Нормированное значение емкости пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор»



Количество дней

Рис. 4. Нормированное значение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор»

Аппроксимация данных рис. 3 логарифмической зависимостью в соответствии с (1) дает следующее выражение:

$$C = 1,001 - 0,02 \lg(n), \tag{3}$$

а аппроксимация данных рис. 4 логарифмической зависимостью в соответствии с (1) дает следующее выражение:

$$tg\delta = 0,985 - 0,028 \lg(n).$$
(4)

Из графиков на рис. 1–4 видно, что изменения соответствующих параметров у рассматриваемых материалов происходили синхронно, из чего следует вывод о единстве механизма структурной перестройки в процессе старения.

Снижение емкости пьезоэлементов из обоих пьезоматериалов хорошо описывается логарифмической зависимостью (1) (коэффициенты корреляции 0,993 и 0,828 для материалов НИИФИ и НКТБ «Пьезоприбор» соответственно), что свидетельствует о достоверности полученных для материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ» экспериментальных данных. Зависимость значения тангенса угла диэлектрических потерь от времени для материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор» также аппроксимируется логарифмической зависимостью (1) с коэффициентом корреляции 0,735, при этом соответствующая зависимость для материала производства АО «НИИФИ» хотя и не имеет ярко выраженной логарифмической зависимости от времени, но в целом демонстрирует со временем снижение значения тангенса. По-видимому, худшая аппроксимация данной зависимости может быть объяснена тем, что диэлектрические потери пьезоматериала зависят от множества параметров внешней среды: температуры, влажности и т.д. Поэтому наиболее вероятная причина сильного разброса значений тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов АО «НИИФИ» во времени связана с отсутствием специальных условий хранения.

Рассчитанные значения коэффициентов старения и прогнозируемое изменение параметров пьезоэлементов через 10 лет хранения в НКУ сведены в табл. 2. В соответствии с работой [8] коэффициенты старения представляют собой множители перед логарифмом в выражениях (2)–(4). Как видно из табл. 2, коэффициенты старения электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь на превышают 3 % за декаду.

Как показывает расчет, предварительная выдержка пьезоэлементов в НКУ в течение первых двух декад старения позволит снизить прогнозируемое изменения параметров при хранении в НКУ в течение 10 лет до двух раз.

Таблица 2

Матариал	Поромотр	Коэффициент	Прогнозируемое изменение параметров через 10 лет хранения в НКУ, %		
материал	Параметр	за декаду, %	После поляризации	После двух декад старения	
Аналог ЦТС-83Г	Электрическая	2,9	10,3	4,8	
(АО «НИИФИ»)	емкость				
ЦТС-83Г (НКТБ	Электрическая	2,0	7,1	3,3	
«Пьезоприбор»)	емкость				
	Тангенс угла	2,8	10,0	4,7	
	диэлектрических				
	потерь				

Прогнозируемые значения изменения параметров пьезоэлементов

Полученные значения коэффициента старения диэлектрической проницаемости как величины, пропорционально связанной с электрической емкостью, и тангенса угла диэлектрических потерь, полученные для материала ЦТС-83Г и его аналога производства АО «НИИФИ», позволяют спрогнозировать изменение параметров пьезоэлементов при длительном хранении. Согласно [1] реальная скорость падения характеристик должна быть ниже из-за того, что сам коэффициент старения также уменьшается со временем по логарифмическому закону, из чего следует, что полученное приближение характеризует максимальное отклонение параметров при хранении.

Заключение

Из приведенных расчетов видно, что наиболее простой способ повышения временной стабильности параметров пьезоэлементов – предварительная выдержка в НКУ в течение не менее чем двух декад, т.е. 100 дней. Выдержка пьезоэлементов перед поставкой возможна только при плановом цикле производства, из-за чего требуется разработка методов ускоренного старения, основанных на количественной теории старения поляризованных сегнетоэлектриков, учитывающей структурные факторы и механизмы старения.

Библиографический список

- 1. *Мельников, А. А.* Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 29–34
- 2. *Баринов, И. Н.* Повышение долговременной стабильности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давлений / И. Н. Баринов, В.С. Волков // Приборы. 2010. № 3. С. 9–16.
- 3. *Баринов, И. Н.* Датчики давления на основе резонансного преобразователя с повышенной временной стабильностью метрологических и эксплуатационных характеристик / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Н. И. Баринов // Датчики и системы. 2012. № 10. С. 6–9.
- 4. Баринов, И. Н. Использование высокоомных кремниевых тензорезисторов для повышения временной стабильности датчиков давления в системах управления и контроля / И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов, Д. А. Кудрявцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 65–74.
- 5. Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У.Р. Кук, Г. Яффе. Москва : Мир, 1974. 290 с.
- 6. *Раппопорт, С. Л.* Исследование процессов старения титаната бария / С. Л. Раппопорт, Л. И. Донцова // Кристаллография. 1970. Т. 15, № 2. С. 384–386.
- 7. *Смажевская, Е. Г.* Пьезоэлектрическая керамика / Е. Г. Смажевская, Н. Б. Фельдман. Москва : Советское радио, 1971. 218 с.
- 8. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богуш. – Москва : Техносфера, 2014. – 312 с.

References

1. Mel'nikov A. A., Tsypin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34. [In Russian]

- 2. Barinov I. N., Volkov V. S. Pribory [Instrumentation]. 2010, no. 3, pp. 9-16. [In Russian]
- Barinov I. N., Volkov V. S., Barinov N. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 10, pp. 6–9. [In Russian]
- 4. Barinov I. N., Volkov V. S., Evdokimov S. P., Kudryavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 1 (7), pp. 65–74. [In Russian]
- Yaffe B., Kuk U. R., Yaffe G. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Mir, 1974, 290 p. [In Russian]
- Rappoport S. L., Dontsova L. I. *Kristallografiya* [Crystallography]. 1970, vol. 15, no. 2, pp. 384–386. [In Russian]
- 7. Smazhevskaya E. G., Fel'dman N. B. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 218 p. [In Russian]
- 8. Bogush M. V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrotermouprugikh modeley* [Design of piezoelectric transducers based on the spatial Electrotechnology models]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p. [In Russian]

Москалев Сергей Александрович

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по качеству, развитию и технологиям, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail: distorsion@rambler.ru

Чебурахин Игорь Николаевич

главный технолог, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail: distorsion@rambler.ru

Волков Вадим Сергеевич

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

Кикот Виктор Викторович

кандидат технических наук, начальник центра пьезопроизводства, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail: distorsion@rambler.ru

Кошкин Глеб Александрович

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

Moskalev Sergey Aleksandrovich

candidate of technical sciences, deputy general director for quality, development and technologies, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Cheburachin Igor Nikolaevich

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

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor, senior scientist, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Kikot Viktor Viktorovich

candidate of technical sciences, head of piezo production center, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Koshkin Gleb Aleksandrovich

processing engineer, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Исследование временной стабильности характеристик пьезокерамических чувствительных элементов датчиков механических величин / С. А. Москалев, И. Н. Чебурахин, В. С. Волков, В. В. Кикот, Г. А. Кошкин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 87–94. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-10.

С. Р. Таишев

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

S. R. Taishev

PIEZOELECTRIC ELEMENTS METALLIZATION RESEARCHES TO IMPROVE THE PARAMETERS STABILITY

Аннотации пьезоэлементов с целью повышения стабильности их параметров. *Материалы и методы*. Показано, что наиболее технологически отработанными методами для формирования электродов пьезоэлементов являются вжигание серебра и химическое осаждение никеля. *Результаты*. Были проанализированы основные теоретические и практические аспекты указанных методов. Предложены практические рекомендации для проведения процесса металлизации. *Выводы*. Данные процессы металлизации всецело удовлетворяют требованиям, предъявляемым к пьезоэлементам с точки зрения создания прочного токопроводящего слоя на поверхности элемента.

A b s t r a c t. *Background*. The article studies the metallization process of piezoelements in order to increase the stability of their parameters. *Materials and methods*. It is shown that the most technologically proven methods for the formation of electrodes of piezoelectric elements are silver firing and chemical precipitation of nickel. *Results*. The main theoretical and practical aspects of these methods were analyzed. Practical recommendations for the metallization process are proposed. *Conclusions*. These processes metallization fully meet the requirements for piezoelements from the point of view of creating a durable conductive layer on the surface of the element.

Ключевые слова: металлизация пьезоэлементов, вжигание серебра, осаждение никеля, стабильность параметров пьезоэлементов.

K e y w o r d s: piezoelectric elements metallization, silver burning, nickel deposition, piezoelectric elements parameters stability.

Уникальные свойства пьезоэлементов (ПЭ) обусловливают их широкое применение в различных областях промышленности. Многие научно-исследовательские и производственные предприятия, производящие пьезокерамику, ПЭ, проводят научные и технологические работы с целью улучшения параметров и характеристик ПЭ [1–8]. Одним из ключевых направлений развития в данной области является совершенствование технологий и свойств пьезоматериалов и ПЭ с целью обеспечения стабильности параметров устройств на их основе [2–4].

Одними из ключевых элементов, влияющих на стабильность ПЭ, являются металлизированные поверхности ПЭ (электроды), сформированные из материалов, принципиально отличающихся по своим конструктивно-технологическим и физико-химическим свойствам от материала подложки (пьезокерамики) и, как следствие, оказывающих наибольшее влияние на временную корреляцию параметров ПЭ и устройств на их основе. В связи с этим актуальными становятся как теоретические, так и экспериментальные исследования процесса металлизации,

направленные на его оптимизацию и использование различных внешних факторов на рабочие характеристики ПЭ.

В общем случае металлизацией принято называть процесс формирования металлического покрытия на поверхности ПЭ [2].

Металлизация производится с целью:

 создания электропроводящего слоя на поверхности (части поверхности) ПЭ, которая служит электродом и к которому впоследствии припаивают вывод для коммутации с электрической цепью;

 создания прочного, а зачастую вакуумно-плотного соединения между деталями из металла и пьезокерамики путем их пайки, когда происходит образование металлокерамического узла или конструкции;

 – формирования металлических компонентов электронной схемы на пьезокерамические основания, подложки и другие изделия.

Соответственно, к электродам предъявляются следующие требования:

не ухудшать параметры ПЭ;

- иметь достаточную прочность сцепления с поверхностью ПЭ;

– быть долговечными, полностью и с одинаковой толщиной покрывать поверхность ПЭ и т.д.

Качество электродов зависит как от их материала и способа нанесения, так и от предварительной обработки покрываемых поверхностей (механическая обработка, очистка, активация поверхности и т.д.).

Тип металла и технология нанесения электродов обусловливаются назначением металлизированной поверхности, ее форм-фактором, а также условиями эксплуатации. В настоящее время широкое применение находят такие металлы, как Ag, Au, Pt и другие, а для создания металлокерамических конструкций применяются Mo, W, Mn, Ni [2].

Толщина электродов может составлять значение от долей микрона до 30–50 мкм и зависит в первую очередь от их назначения и, как следствие, технологии нанесения. В настоящее время наиболее часто используемыми материалами для формирования электродов являются серебро и никель [2].

Серебро обладает рядом свойств, обусловливающих его широкое применение: высокая электропроводность, относительно низкая скорость окисления, высокая смачиваемость при наличии флюсов с образованием прочного сцепления с пьезокерамикой, а также относительно низкая стоимость. Широко используемые типы пьезокерамики образуют надежное сцепление с электродами из серебра, прочность которого на разрыв составляет от 10 до 30 МПа.

Технология металлизации с использованием серебра в основном осуществляется методом вжигания серебра в пьезокерамику. Удовлетворяющее большинству требований покрытие формируется методом двух- и трехкратного серебрения с последующим вжиганием. Значительно реже используются методы вакуумной металлизации и нанесения на ПЭ дисперсного серебра с использованием проводящего клея.

Широко используется метод серебрения и вжигания, при котором специальная паста, состоящая из углекислого серебра Ag_2CO_3 от 35 до 40 % и связки (раствор канифоли ($C_{19}H_{29}COOH$) в скипидаре от 65 до 60 %), наносится на поверхность ПЭ и вжигается, при этом происходит восстановление углекислого серебра до металлического. С целью увеличения длительности процесса высыхания пасты, исключающего ее чрезмерное загустевание во время нанесения, в раствор добавляется 5-процентное растительное масло. С целью необходимости получения рельефного рисунка вводят 5 % пластификатора – дибутилфталата, что придает пасте необходимую пластичность. А для повышения смачиваемости поверхности и растекания пасты путем снижения ее поверхностного натяжения в связку добавляют 2 % ацетона. Приготовленная таким образом связка входит в состав пасты в достаточном количестве для получения консистенции масляной краски. Это значение обычно составляет 1/3 от массы составляющих пасты в сухом остатке. Соответственно, перед введением связки сухие компоненты должны быть тщательно перемешаны [3, 4].

Для улучшения сцепления серебра с поверхностью ПЭ в пасту вводятся небольшие добавки оксида висмута Bi_2O_3 и бората свинца $Pb_2B_4O_7$. Одновременно с серебром происходит восстановление оксида висмута до металлического висмута и бората свинца до металлического свинца с образованием оксида бора. Так как температура плавления металлического свинца составляет значение 327,4 °C, а оксида бора – 577 °C, то в процессе вжигания происходит образование некоторого количества жидкой фазы, способствующей лучшему смачиванию всего микрорельефа поверхности ПЭ.

Кроме углекислого серебра, в качестве серебросодержащего компонента могут быть использованы металлическое коллоидное серебро и оксид серебра.

Паста наносится вручную кистью на поверхность ПЭ, предварительно очищенную, обезжиренную и активированную, а при использовании массового производства – полуавтоматическим принтером трафаретной печати. Для очистки поверхности ПЭ широкое применение получил ультразвук, а активация поверхности происходит с использованием генераторов холодной плазмы. Значение толщины серебра после вжигания составляет до 5 мкм в случае однослойного нанесения пасты, до 10 мкм в случае двухслойного и до 40 мкм в случае многослойного.

На рис. 1 представлен график температурного режима вжигания серебра в свинцовосодержащую и безсвинцовую пьезокерамику [2].



Рис. 1. График температурного режима вжигания серебра в свинцовосодержащую и безсвинцовую пьезокерамику [2]: 1 – зона удаления жидких составляющих пасты (20–140 °C); 2 – зона разложения и удаления канифоли (200–320 °C); 3 – зона пиролиза соединений серебра (320–410 °C);
4 – интервал вжигания (600–850 °C); 5 – нижняя граница вжигания в безсвинцовую пьезокерамику;
6 – график вжигания серебра в безсвинцовую пьезокерамику; 7 – график вжигания серебра в свинцовосодержащую пьезокерамику; 8 – температура плавления серебра (961 °C)

Важно помнить, что при температуре процесса более 850°С за счет сил поверхностного натяжения серебро начинает стягиваться в капли и слой металлизации разрушается.

При пайке выводов к электродам из серебра используют паяльник либо применяют метод печатного монтажа с мягкими припоями при температуре от 200 до 300 °C. Необходимо учитывать, что время контактирования с расплавленным припоем должно быть минимальным из-за того, что покрытие из серебра может растворяться в большинстве используемых припоев на основе свинца и олова. В некоторых случаях используется метод пайки ультразвуком, когда контакт с поверхностью ПЭ обусловливается явлением кавитации, разрушающим поверхностную пленку с помощью УЗ-колебаний в жидкой среде и вызывающим проникновение припоя в объем пьезокерамики через поры.

Со временем вследствие фотохимического процесса может наблюдаться явление потускнения серебряных электродов. Такое серебро тем не менее по-прежнему проявляет хорошие проводящие свойства. При этом при необходимости потускнение может быть исключено путем химико-механического воздействия непосредственно перед пайкой.

Толщина серебряных электродов обусловлена в основном необходимостью обеспечения прочности сцепления серебра с пьезокерамикой. Несмотря на то, что слой серебра минималь-

ной толщины не обеспечивает максимальной прочности сцепления электродов с ПЭ, их масса оказывает влияние на антирезонансную частоту, имеющую гиперболический характер в зависимости от толщины ПЭ (50–400 мкм). Масса электрода изменяет такие электрические эквивалентные параметры ПЭ, как индуктивность L и емкость C. Следует учесть, что индуктивность в зависимости от массы электрода изменяется более интенсивно, чем емкость. Данное явление вызывает практический интерес, если необходимо произвести подстройку ПЭ на заданную частоту посредством изменения толщины электродов.

Никелирование по сравнению с серебрением имеет ряд технологических преимуществ, таких как:

процесс металлизации протекает относительно быстро (скорость покрытия от 10 до 12 мкм/ч при температуре от 75 до 78 °C), причем покрытие можно наносить на изделия любой формы, получая при этом равномерный слой никеля;

 использование никеля в качестве электродов положительно сказывается на стабильности и долговечности ПЭ и компонентов на их основе, что обусловлено более низкой подвижностью никеля в пьезокерамических подложках по сравнению с серебром;

– никель в основном наносится методом химического осаждения, протекающим при температурах не выше 100 °C, что является определяющим фактором при изготовлении ПЭ с так называемой поперечной поляризацией, когда направление электрического поля не совпадает с расположением электродов. В этом случае технологически бывает невозможно изготовить ПЭ с заданными параметрами методом высокотемпературного (выше точки Кюри) вжигания, характерного для серебра.

Относительным ограничением химического никелирования является практическая невозможность его использования для ПЭ малой толщины (до 0,2 мм), так как при помещении в кипящие растворы тонких пьезокерамических изделий может произойти их деформация и разрушение.

Кроме того, прочность сцепления электродов с поверхностью ПЭ в случае никелирования зачастую является неудовлетворительной из-за того, что в значительной степени зависит от качества обработки поверхности ПЭ и общего соблюдения технологии, по сравнению с методом вжигания серебра, когда высокая температура процесса частично может компенсировать возможные нарушения технологической дисциплины.

Во время процесса никелирования происходит восстановление никелевых солей на поверхности ПЭ с помощью гипофосфата натрия или калия. Данный процесс происходит значительно быстрее на поверхности ПЭ на основе свинцовосодержащей керамики, если предварительно наносится подслой меди. Для активизации процесса применяется хлорид палладия, который наносится до и после меднения. Температура процесса (меднения и химического никелирования) – от 90 до 95 °C. Толщина слоя никеля при никелировании в течение 40 мин достигает значения порядка 10 мкм. Положительной особенностью химических покрытий из никеля является их высокая равномерность осаждения по всей поверхности ПЭ. Благодаря отсутствию большого количества пор данные покрытия обладают высокой защитной способностью, что имеет особое значение при их эксплуатации с точки зрения повышения стабильности параметров ПЭ. В настоящее время на практике применяют следующие способы химического осаждения никеля из растворов: метод химического восстановления, контактный, контактно-химический.

Но наибольшее применение находит метод химического восстановления, в основе которого лежит реакция взаимодействия ионов металла с растворенным восстановителем. При этом скорость протекания реакций окисления восстановителя и восстановление ионов металла имеют максимальные значения исключительно на металлах, проявляющих свойства автокаталитической реакции. Это означает, что образовавшийся в результате химического восстановления из раствора металл в дальнейшем катализирует реакцию окисления восстановителя. Никель в наибольшей степени обладает вышеуказанным свойством (наряду с кобальтом, железом, медью, серебром, золотом, палладием, родием, рутением, платиной, оловом, свинцом, индием). Если же осаждаемый металл не проявляет свойств автокаталитической реакции, то наблюдается образование металлического порошка из-за восстановления ионов металла, протекающего во всем объеме раствора. Для химического осаждения никеля используют различные восстановители: гипофосфит, гидразин, формальдегид, борогидрид, боразины, гидразинборан, а также ионы металлов в низшей степени окисления (Fe²⁺, Sn²⁺, Ti³⁺, Cr²⁺, Co²⁺). Выбор восстановителя обусловливается в основном физико-химическими свойствами осаждаемого металла. Например, для получения никелевых и кобальтовых покрытий используется восстановитель гипосфит, так как именно эти металлы в достаточной степени обладают свойствами автокаталитической реакции [3].

В настоящее время практическое применение нашли методы формирования покрытий с помощью химического восстановления для более чем 20 различных металлов, а также двойных и тройных сплавов: Ni-P, Ni-B, Ni-Co-P, Ni-Mo-B, Ni-Cr-P, Ni -Sn-P, Ni-Cu-B и др. [2].

Как уже было сказано, химическое восстановление металлов является автокаталитической реакцией, т.е. пленка металла, которая образуется в начальный период, катализирует дальнейшую реакцию восстановления этого же металла. Но для начальной стадии восстановления металла необходимо, чтобы покрываемая поверхность проявляла каталитические свойства по отношению к этой реакции. Такими свойствами обладают главным образом металлы d-элементов VIII группы и некоторые другие металлы. Сu, W, Ti не являются катализаторами реакции окисления восстановителя. Следовательно, для придания поверхности свойств каталитической реакции ее подвергают специальной обработке – активации. Существуют различные методы активации, заключающиеся в нанесении металла-катализатора на поверхность. Наиболее распространенный на практике способ активации состоит из двух последовательных операций – «сенсибилизирование» и «активирование». Сенсибилизирование (повышение чувствительности) заключается в обработке поверхности раствором солей Sn²⁺, Fe²⁺, Ti³⁺, Ge2+. Самым эффективным способом сенсибилизирования является обработка поверхности в растворе SnCl₂ в соляной кислоте в течение 20–30 с с дальнейшей промывкой в дистиллированной воде. Активирование поверхности проводят в растворе, содержащем 0,5–1,0 г/л хлорида палладия, подкисленном соляной кислотой (pH 2-3), в течение 10-20 с. В итоге в растворе хлорида олова на поверхности диэлектрика образуется слой с повышенной концентрацией данной соли. Во время промывки образца в воде соль олова подвергается гидролизу в соответствии со следующими уравнениями:

$$SnCl_{2} + H_{2}O \rightarrow Sn(OH)Cl + HCl$$

$$4SnCl_{2} + 6H_{2}O \rightarrow SnCl_{2} \cdot 3Sn(OH)_{2} \cdot 6HCl \qquad (1)$$

$$SnCl_{2} + 2H_{2}O \rightarrow Sn(OH)_{2} + 2HCl$$

На поверхности протекает главным образом реакция в соответствии с уравнением (1), приводящая к образованию основного хлорида олова состава $Sn(OH)_{1,5}Cl_{0,5}$. Соединения Sn^{2+} восстанавливают соединения Pd^{2+} до металла на стадии активирования поверхности.

Хлорид палладия в солянокислых растворах находится в виде соединения H₂PdCl₄, и, следовательно, реакции, протекающие на поверхности при ее активировании, могут быть представлены уравнениями

$$\begin{aligned} &Sn(OH)Cl + H_2PdCl_4 + HCl \rightarrow Pd + H_2SnCl_6 + H_2O \\ &SnCl_2 \cdot 3Sn(OH)_2 + 4H_2PdCl_4 + 6HCl \rightarrow 4Pd + 4H_2SnCl_6 + 6H_2O \\ &Sn(OH)_2 + H_2PdCl_4 + 2HCl \rightarrow Pd + H_2SnCl_6 + 2H_2O \end{aligned}$$

Для активирования поверхности также находят применение совмещенные растворы, которые одновременно содержат $PdCl_2$ и $SnCl_2$. В результате процесса активации металлический палладий равномерно распределяется по всей поверхности тонким слоем, и в дальнейшем на этот слой уже можно наносить химическое покрытие.

Простейшие растворы для получения химических покрытий состоят из соли металла и восстановителя и являются относительно неустойчивыми; ионы металла восстанавливаются с образованием металлического осадка во всем объеме раствора. В начальный момент времени реакция взаимодействия ионов металла с восстановителем является некаталитической, но по мере образования частиц металла реакция принимает характер каталитической реакции, и скорость ее возрастает с увеличением поверхности осадка.

Окончательная стабилизация раствора достигается введением комплексообразующих веществ (лигандов), которые обеспечивают образование прочных комплексов с ионами метал-

ла, а также веществ, создающих определенное значение pH (щелочи, кислоты, буферирующие добавки), и стабилизаторов – специальных составов, которые в малых концентрациях (1–100 мг/л) значительно повышают стабильность раствора.

Для примера приведем составы растворов химического никелирования, которые можно использовать для металлизации ПЭ:

– раствор 1. NiSO₄·7H₂O = 20 г/л, CH₃COONa·3H₂O = 10 г/л, NaH₂PO₂·H₂O = 10-25 г/л, CH₃COOH (98 %) = 6,2–6,5 мл/л, тиомочевина NH₂CSNH₂ = 0,002-0,003 г/л, температура 92°С;
– раствор 2. NiCl₂·6H₂O = 45 г/л, NiSO₄·7H₂O = 45 г/л, NH₄CI = 50 г/л, цитрат натрия Na₃C₆H₅O₇·5H₂O = 45 г/л, Na₂HPO₂·H₂O = 20 г/л, NH₄OH (25 %) до pH 8–9, температура 75–92 °С.

Растворы готовятся следующим образом. В дистиллированной воде, подогретой до 50–60 °С, растворяется соль никеля и вводится соль ацетата натрия (в первый раствор) и цитрат натрия с хлоридом аммония (во второй раствор). Затем в первый раствор добавляется уксусная кислота, а во второй раствор – аммиак до устойчивой синей окраски раствора (благодаря реакции комплексообразования ионов Ni^{2 +} с аммиаком), что соответствует рН 8–9. Гипофосфит натрия вводится в раствор непосредственно перед никелированием так же, как и стабилизирующая добавка (тиомочевина).

Качество получаемых электродов оценивается следующим образом.

Определяется плотность электродов на ПЭ. Установление плотности (денсиметрия) имеет весьма высокую точность, значение которой может быть оценено в ±0,3 %.

Плотность электродов *р*_э выражается формулой

$$\rho_{\mathfrak{s}} = \frac{h_n}{h - h_n} \left(\rho \frac{h}{h_n} - \rho_n \right),$$

где ρ_n – плотность соответственно образца с нанесенным электродом и подложки; h, h_n – толщина соответственно образца с нанесенным электродом и подложки.

Пористость электродного слоя определяют по формуле

$$Q = \frac{\rho_{M} - \rho_{y}}{\rho_{M}},$$

где $\rho_{\rm M}$ – плотность материала электрода.

Для измерения толщины электродов ПЭ используют прибор типа БТП-3. Он предназначен для выборочного контроля толщины металлопокрытия на диэлектрике. В приборе применен радиоактивный источник Sr^{90} активностью 0,5 милликюри. Измерение толщины электродов основано на определении интенсивности рассеянных β-лучей, отраженных от контролируемой поверхности. Интенсивность отраженного потока β-излучения зависит от толщины электродов и разницы атомных номеров материала основания и электродов. Толщину также можно определить количественным химическим анализом содержания металла в растворе, полученном после растворения покрытия азотной кислотой.

Прочность сцепления электродов с ПЭ определяют подпайкой к электроду вывода заданного сечения и испытанием на отрыв на устройстве динамометрического типа [4].

Прочность сцепления электродов с поверхностью ПЭ определяется по формуле

$$\sigma = \frac{P}{S} ,$$

где σ – временное сопротивление разрыву, Па; P – разрывное усилие, Н; S – площадь поперечного сечения в месте отрыва, м².

При высоком качестве покрытия происходит разрыв вывода, прочность которого подбирается с учетом требующейся прочности сцепления электродов с ПЭ.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно утверждать, что наиболее технологически отработанными методами для формирования электродов ПЭ являются вжигание серебра и химическое осаждение никеля. Были проанализированы основные теоретические и практические аспекты указанных методов. Данные процессы всецело удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ПЭ с точки зрения создания прочного токопроводящего слоя на поверхности элемента.

Библиографический список

- 1. *Богуш, М. В.* Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации / М. В. Богуш // Пьезоэлектрическое приборостроение. Ростов на Дону : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. Т. 3. 346 с.
- 2. Пьезокерамическое материаловедение : учеб. пособие / под ред. С. Н. Свирской. Ростов-на-Дону, 2009. 82 с.
- 3. Ланин, В. А. Старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ланин В. А. Томск, 2006.
- Быстров, С. В. Нестабильность параметров пьезокерамики и ее влияние на характеристики пьезодвигателей / С. В. Быстров, В. В. Григорьев, О. А. Малофеева // Евразийский союз ученых. – 2016. – № 2-4 (23). – С. 31–34.
- 5. *Баринов, И. Н.* Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
- 6. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 11. С. 50–60.
- 7. *Кикот, В. В.* К вопросу о тенденциях развития пьезодатчиков акустического давления и способах уменьшения их температурной погрешности / В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2. С. 58–63.
- 8. Бастрыгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Бастрыгин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 1. С. 76–81.

References

- 1. Bogush M. V. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric instrumentation]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
- P'ezokeramicheskoe materialovedenie: ucheb. posobie [Piezoceramic materials science: studies. benefit]. Ed. by S. N. Svirskaya. Rostov-on-Don, 2009, 82 p. [In Russian]
- 3. Lanin V. A. Starenie p'ezokeramiki sistemy TsTS pod deystviem elektricheskikh i mekhanicheskikh napryazheniy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Aging of piezoelectric ceramics of the PZT system under the action of electric and mechanical stress : abstract. dis. ... cand. tech. sciences]. Tomsk, 2006. [In Russian]
- Bystrov S. V., Grigor'ev V. V., Malofeeva O. A. *Evraziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of scientists]. 2016, no. 2-4 (23), pp. 31–34. [In Russian]
- 5. Barinov I. N., Volkov V. S. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2011, no. 8, pp. 51–55. [In Russian]
- 6. Barinov I. N., Tsypin B. V. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2010, no. 11, pp. 50–60. [In Russian]
- 7. Kikot V. V. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 2, pp. 58–63. [In Russian]
- 8. Bastrygin K. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 1, pp. 76–81. [In Russian]

Таишев Султан Равилевич

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sultan.taishev@yandex.ru

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

Образец цитирования:

Таишев, С. Р. Исследования процессов металлизации пьезоэлементов для повышения стабильности параметров / С. Р. Таишев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 95–101. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-11.

УДК 537.331.33

102

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-12

П. Г. Михайлов, Т. А. Глебова, А. В. Соколов, А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

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

MANAGEMENT OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE POLYSILICON SENSORY STRUCTURES OF MICROELECTRONIC SENSORS

Аннотация. Актуальность и цели. Исследованы технологические и конструктивные методы управления электрофизическими характеристиками (ЭФХ) структур датчиков, сформированных из поликристаллических кремниевых пленок (ПКП). Материалы и методы. Выполнено математическое моделирование ПКП и чувствительного элемента (ЧЭ) и на их основе предложены методы модификации ПКП, основанные на ионном легировании. Результаты. Приведены расчетные соотношения для определения электрического сопротивления ПКП. Получены величины критических значений доз примеси бора, внедренной ионным легированием. Рассчитаны и проанализированы тепловые и деформационные характеристики ПКП и приведены количественные значения температурных коэффициентов сопротивления и значений тензочувствительности кристаллитов и барьерных слоев ПКП. Применительно для формирования сенсорных элементов проанализированы и выбраны технологические способы модификации структуры ПКП с целью повышения тензочувствительности и уменьшения температурного коэффициента сопротивления (ТКС) (для тензорезисторов) и уменьшения тензочувствительности и повышения ТКС (для терморезисторов). Такие методы позволяют сформировать на одном ЧЭ тензо- и термочувствительные элементы. Изготовлены и испытаны экспериментальные макеты датчиков давлений с ПКП тензорезисторами. Выводы. Применение предложенных технологических и конструктивных методов управления ЭФХ сенсорных элементов и структур датчиков позволило за счет выбора режимов ионного легирования (ИЛ) повысить стабильность технических характеристик и дать возможность формировать на одном ЧЭ тензочувствительные и термочувствительные элементы.

A b s t r a c t. *Background*. Researched technology and construction management methods of electrophysical characteristics (EPC) sensory structures of the sensors are formed of polysilicon films (PSF). *Materials and methods*. Mathematical modeling of PSF and the sensing element (SE) on its basis, the methods of modification of PSF based on ion doping are Proposed. *Results*. The calculated relations for determining the electrical resistance of PSF are given. The obtained values of the critical values of the doses of the impurities of boron ion doping is implemented. The thermal and deformation characteristics of PSF are calculated and analyzed, and the quantitative values of the temperature resistance coefficients and the values of the strain sensitivity of crystallites and barrier layers of PSF are given. With regard to the develop-

[©] Михайлов П. Г., Глебова Т. А., Соколов А. В., Аналнева А. У., Михайлов А. П., Фадеев Е. Д., 2019

ment of sensor elements analyzed and selected technologies of modification of the structure of PSF with the purpose of increase of strain and decrease of TKS (for strain gages), and reduce the strain and increase TKS (for RTD). Such methods allow to generate one SE tenzo – and heat-sensitive elements. Experimental models of pressure sensors with PC strain gauges were manufactured and tested. *Conclusions*. Application of the offered technological and constructive methods of control of EPC of sensor elements and structures of sensors allowed to increase stability of technical characteristics and to give the chance to form on one CE tenzo-and thermoelements due to the choice of modes *IL*.

Каючевые сао ва: датчик, поликристаллический кремний, пленка, характеристики, сенсор, тензорезистор, термоэлемент.

K e y w o r d s: sensor, polycrystalline silicon, film, characteristics, sensor, strain gauge, thermoelement.

В настоящее время основными типами датчиков физических величин (ДФВ) становятся микроэлектронные датчики (МЭД), которые превосходят традиционные датчики, основанные на объемных чувствительных элементах (ЧЭ) и конструкциях по таким техническим и экономическим характеристиках, как точность, надежность, массогабаритным и проч. [1]. Кроме того, они базируются на ручных операциях сборки и настройки, что увеличивает их трудоемкость и снижает их конкурентоспособность. Как показали исследования, большинство присутствующих на рынке коммерческих МЭД изготавливают на основе монокристаллического кремния (МК), что лимитирует их температурный диапазон на уровне 85–900 °C.

Следует отметить, что технические возможности ДФВ в части рабочих температур в наибольшей степени определяются свойствами функциональных материалов, на поверхности или в объеме которых формируются сенсорные элементы и структуры [2]. К таким функциональным материалам относится, в первую очередь, кремний и его политипы (поликремний, аморфный кремний), широкозонные полупроводники (алмаз) и полупроводниковые соединения (карбид кремния, нитрид алюминия), полупроводниковые структуры (кремний на сапфире, кремний на кремнии). Из всех указанных функциональных материалов наиболее приемлемым с точки зрения доступности, технологичности и себестоимости является поликремний [3, 4]. В микроэлектронике ПКП чаще всего используется в виде пленок, формируемых на поверхности диэлектриков и полупроводников газофазным или термическим методами. В исходном состоянии ПКП имеет поликристаллическую структуру и имеет очень высокое электрическое сопротивление и может использоваться только в качестве изолятора. Для использования ПКП в качестве тензочувствительных или термочувствительных структур МЭД пленки подвергаются модификации. Процедура модификации осуществляется путем управляемого воздействия на ПКП тепловых полей или ионных пучков, которые изменяют структуру пленки, преобразуя ее в рекристаллизованную монокристаллическую, легированную определенной примесью, чаще всего бором (акцепторная примесь) или фосфором (донорная примесь) пленку [5]. При этом рекристаллизованная пленка отделена от подложки изолирующей пленкой двуокиси кремния. Для описания свойств модифицированного ПКП, используемого в сенсорных структурах, рассмотрим их электрофизические модели [6].

Модели управления поликремниевыми сенсорными структурами

Сопротивление ПКП (*R*) можно представить как схему замещения в виде последовательно соединенных резисторов:

$$R = R_{\kappa} + R_{\delta},\tag{1}$$

где R_{κ} и R_6 – суммарные сопротивления соответственно кристаллов и областей обеднения (барьеров).

По мере роста уровня легирования пленок сопротивление кристаллитов уменьшается, при этом сопротивление областей обеднения уменьшается еще больше. При концентрации легирующей примеси (бора) больше 5·10¹⁹[1/см³] удельное сопротивление ПКП приближается к сопротивлению МК, оставаясь, однако, всегда больше.

Распределение по ПКП легирующей примеси зависит от ее вида. Такая примесь, как бор, равномерно распределяется по объему кристаллитов и межкристаллическому пространству. Для фосфора наблюдается эффект сегрегации: фосфор имеет тенденцию накапливаться в межкристаллическом пространстве. Сегодня для изготовления сенсоров используются только поликристаллические пленки, легированные бором, причем с высокой степенью легирования (около 4·10¹⁹[1/см³] и более).

Температурная зависимость сопротивления ПКП (1) имеет две составляющие: одна определяется температурной зависимостью сопротивления объема кристаллита, а другая – температурной зависимостью сопротивления запорного слоя (барьера), образующегося на границах кристаллитов. Продифференцировав составляющие формулы (1), получим температурный коэффициент сопротивления (ТКС) а ПКП:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} \left(\frac{1}{R_{\kappa}} \frac{dR_{\kappa}}{dT} \right) + \frac{R_{\delta}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} \left(\frac{1}{R_{\delta}} \frac{dR_{\delta}}{dT} \right)$$
(2)

или

$$\alpha = \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} \alpha_{\kappa} + \frac{R_{\delta}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} \alpha_{\delta}, \qquad (3)$$

где $\alpha_{\kappa} = \frac{1}{R_{\kappa}} \frac{dR_{\kappa}}{dT}$ – ТКС кристаллита; $\alpha_{6} = \frac{1}{R_{6}} \frac{dR_{6}}{dT}$ – ТКС области обеднения (барьера), $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ – ТКС ПКП.

Следует отметить, что α_{κ} определяется рассеянием носителей тока на колебаниях кристаллической решетки и имеет положительный знак ТКС барьера α_6 . В области межзеренных границ (барьера) происходит туннелирование носителей заряда, при этом увеличение температуры приводит к повышению тока, т.е. ТКС барьерного слоя имеет отрицательный знак [3].

Меняя степень легирования пленки, можно изменить соотношение между сопротивлением кристаллитов R_{κ} и барьеров R_6 и управлять таким образом величиной ТКС. Можно получить пленки с ТКС любого знака, в том числе и с $\alpha = 0$, что очень важно в практическом отношении. Такого разнообразия в поведении ТКС в рассматриваемом диапазоне концентраций примеси у МК нет.

Деформация ПКП приводит к изменению сопротивления как кристаллитов, так и областей обеднения вблизи границ кристаллитов. Поэтому суммарная тензочувствительность может быть представлена

$$S = \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} S_{\kappa} + \frac{R_{\delta}}{R_{\kappa} + R_{\delta}} S_{\delta} , \qquad (4)$$

где $S_{\kappa} = \frac{1}{R_{\kappa}} \frac{dR_{\kappa}}{d\varepsilon}$, $S_{\delta} = \frac{1}{R_{\delta}} \frac{dR_{\delta}}{d\varepsilon}$, $S = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\varepsilon}$ – тензочувствительности соответственно кристалли-

та, барьера и ПКП в целом.

Физические причины изменения сопротивления кристаллита под действием деформации такие же, что и в МК. Важной особенностью ПКП является различная кристаллографическая ориентация кристаллов [7], что приводит к усреднению тензочувствительности ПКП.

Следует отметить характерное свойство ПКП, заключающееся в том, что по мере повышения уровня легирования R_5 уменьшается, причем при значениях концентрации примеси $N > 5 \cdot 10^{19} [1/cm^3]$ высота потенциального барьера снижается до нуля и резко снижается R_6 . В этом случае вся тензочувствительность обусловлена только кристаллитами:

$$S = S_{\kappa} \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa} + R_{6}} \,. \tag{5}$$

Влияние границ зерен учитывается вторым сомножителем.

Measuring. Monitoring. Management. Control

В табл. 1 приведены результаты исследований ПКП – тензорезисторов *p*-типа проводимости, легированных бором до концентраций $N \approx 4 \cdot 10^{19} [1/cm^3]$ [8].

Таблица 1

	Тензочувствите	$TVC(\alpha) 1/^{\circ}C$		
элемент структуры	продольная	поперечная	1 KC (u) 1/ C	
Кристаллит	51,5	-12,5	$15 \cdot 10^{-4}$	
Барьер	24,3	-2,3	$-5,37 \cdot 10^{-4}$	

Тензочувствительность кристаллов и барьеров ПКП

Технологические методы модификации ПКП

Для изменения концентрации в ПКП существует два метода: 1 – термодиффузия; 2 – ИЛ, из которых наиболее перспективен второй метод. Кратко поясним применительно к ПКП сущность ионного легирования.

Суть процесса ИЛ заключается в формировании пучков ионов бора или фосфора с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой заданной энергией, и внедрении их в подложку или мишень в определенном количестве, называемом дозой, т.е. основными характеристиками процесса ИЛ являются энергия (E_0) и доза (D_0) пучка ионов [9]:

$$E_0 = neU, (6)$$

где U – приложенная разность потенциалов, n – кратность ионизации, n = 1,2,3 (одно, двух или трехзарядный ион, например B⁺²), e – заряд электрона:

$$D_0 = \frac{Q}{ne} = \frac{j}{tne} \, [\text{uoh/cm}^2], \tag{7}$$

где D_0 – доза легирования; Q – заряд; j – плотность тока пучка; t – время легирования.

Для перевода зарядной дозы в ионную используют соотношение: 1 мкКл/см² для n = 1 соответствует примерно 6,25·10¹² ион/см².

Отметим основные преимущества ИЛ перед диффузионным [4, 8]:

– точное задание и простое регулирование количества внедренной примеси, определяемое током ионного пучка;

- повышенная воспроизводимость и однородность распределения примеси;

- возможность использования в качестве маски при легировании пленок SiO₂ и Si₃N₄;

 возможность регулируемого внедрения примеси через тонкие слои диэлектриков и резистивных материалов;

– пониженная по сравнению с диффузией температура.

Вместе с тем процесс ИЛ сопровождается нарушением кристаллической структуры ПКП и появлением в ней аморфизированных областей. Дефекты, вносимые ИП, способствуют ухудшению ЭФХ сенсорных структур (увеличиваются токи утечки, снижаются пробивные напряжения и проч.) Уменьшение дефектов и активация внедренной примеси обеспечивается высокотемпературной обработкой легированных структур.

При термообработке основными параметрами является температура и длительность, например, при температуре 1000 °C для полной активации примеси необходимо время не менее 30 мин [9].

Эксперименты проводились при ионном легировании пластин из монокристаллического и поликристаллического кремния со сформированной топологией ЧЭ МЭД давления и пластин – свидетелей. Формирование ПКП толщиной 0,6 мкм на предварительно окисленной МК подложке осуществлялось в диффузионной печи СДО 125/3-15 (оснащенной реактором пониженного давления).

Легирование осуществлялось на установке ионного легирования типа «Везувий – 5» однозарядными ионами бора (В⁺) с контролем тока ионного пучка, напряжения 100 КэВ и набираемой дозы. После набора необходимых доз пластины со структурами отжигались при тем-

пературе (900...950) °С в течение 30–40 мин для активации внедренной примеси. После отжига определялись основные ЭФХ структур по методике, изложенной в работе [10].

По полученным экспериментальным результатам были построены графические модели зависимостей:

1) поверхностного сопротивления ПКП от дозы легирования ρ_s [Ом/ \Box] = $f_1(D [ион/см²])$ (рис. 1);

2) температурного коэффициента сопротивления ПКП от дозы легирования α [%/K] = $= f_2(D[\text{ион/cm}^2])$ и для монокристаллического кремния (рис. 2).



Рис. 1. Поверхностное сопротивление ПКП как функция дозы имплантации ионами бора (В⁺)





Measuring. Monitoring. Management. Control

Из анализа графиков (рис. 1 и 2) можно сделать следующие выводы:

– поверхностное сопротивление ПКП зависит от дозы облучения, при этом зависимость имеет существенную нелинейность;

– ТКС ПКП в отличие от ТКС МК имеет отрицательный знак и может регулироваться дозой, внедренной при ИЛ.

Изготовление и испытания экспериментальных ПК ЧЭ

В процессе проведения НИР исследовалась возможность управления техническими характеристиками ПКП, входящими в состав ЧЭ МЭД давлений. Были изготовлены два варианта ЧЭ с разной топологией тензорезистивной схемы (рис. 3). По первому варианту топологии все тензорезисторы (ТР) располагались по периферии ЧЭ, а их продольная ориентация совпадала с кристаллографическим направлением [110] монокристаллической кремниевой подложки. По второму варианту два центральных ТР располагались в центре, а два других – по периферии ЧЭ.



Рис. 3. Варианты топологии поликремниевого ЧЭ микроэлектронного высокотемпературного датчика давления: *a* – 1-й вариант; *б* – 2-й вариант

В качестве упругого элемента (УЭ) был использован МК, который легко профилируется с использованием щелочных травителей – водном 33 % растворе КОН [11].

Проводились исследования технических характеристик (TX) датчиков с двумя вариантами расположения ПК тензорезисторов на УЭ (мембране), приведенные на рис. 3.

В ЧЭ ТР соединены по схеме полного моста теоретическая чувствительность тензопре-

образователя с точечными ТР в варианте 1 (см. рис. 3): $S_1 = 0.93 \pi_{11} \left(\frac{a}{h}\right)^2$, а в варианте 2:

 $S_2 = 0.78\pi_{11} \left(\frac{a}{h}\right)^2$. При учете фактических размеров ТР (длина 200 мкм, ширина 20 мкм) чув-

ствительности ТР снизятся до значений [12, 13]:

$$S_1 = 0,706\pi_{11} \left(\frac{a}{h}\right)^2, \ S_2 = 0,536\pi_{11} \left(\frac{a}{h}\right)^2,$$
 (8)

где *а* – размер ЧЭ (см. рис. 3); *h* – толщина ЧЭ; π11 – главный пьезорезистивный коэффициент.

Чувствительность варианта 1 несколько больше, но вариант 2 обладает лучшей воспроизводимостью технических характеристик.

Изготовленные датчики исследовались в интервале температур от +20 до +300 °C, температура поддерживалась термостатом ТК-500 с точностью ± 1 °C, давление измерялось манометром МПА-15 класса 0,02. Температурные зависимости выходного сигнала при номинальных давлениях ($P_{\text{ном1}} = 1500$ мм рт.ст. и $P_{\text{ном2}} = 1000$ мм рт.ст.) в режиме питания от генератора тока представлены на рис. 4.



Рис. 4. Температурные зависимости выходных сигналов

Сравнительные характеристики датчиков давления приведены в таблице.

Расчетно-экспериментальные данные, полученные для двух конструкций ЧЭ, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований ПЧЭ на основе ПКП

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Толщина мембраны, мкм	30±2	20±2
Сопротивление резистора, кОм.	0,6±0,025	0.6±0,25
Номинальное давление, мм рт.ст.	1500	1000
Номинальный выходной сигнал, мВ	40,4	37,3
Температурный коэффициент выходного сигнала, %/°С	0,02	0,05
Начальный выходной сигнал, мВ	5	10
Температурный коэффициент начального выходного сигнала, %/°С	0,01	0,02
Чувствительность к измеряемому давлению (при $T = 20^{\circ}$ C), [1/Па] ($U_{\text{пит}} = 5$ B)	$4,1.10^{-8}$	$5,7.10^{-8}$

Температурные характеристики датчика в варианте 1 также предпочтительнее, поэтому предлагаемый вариант можно считать более приемлемым при проектировании МЭД на основе ПКП.

Заключение

В результате проведенных исследований предложены и апробированы технологические методы модификации ПКП МЭД, обеспечивающие эффективное управление ЭФХ сенсорных структур:

1) использованием ионного легирования для внедрения примеси «p» (В⁺) или «n» (Р⁻) типов проводимости;

2) локальной перекристаллизации поликремниевых тензорезисторов с лазерным лучем.

Разработаны и проанализированы модели ПКП, на основе которых определены критические дозы легирования и температурные коэффициенты поликремниевых тензо- и терморезисторов.

Библиографический список

- 1. *Джексон, Р. Г.* Новейшие датчики : справочник : пер. с англ. / Р. Г. Джексон. Москва : Техносфера, 2007. 380 с.
- Mikhaylov, P. G. Microelectronic Sensors for the Aircraft and Space-Rated Equipment / P. G. Mikhaylov, A. O. Kassimov, M. A. Khizirova // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P 152–157. – URL: http://www.bipublication.com
- Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения : пер. с англ. / под ред. Г. Харбеке. – Москва : Мир, 1989. – 344 с.
- Баясилова, З. А. Модификации поликремниевых пленок и повышение чувствительности тензорезистивных структур высокотемпературных датчиков давления / З. А. Баясилова, П. Г. Михайлов, М. К. Бактыбаев // Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей. – 2016. – № 4 (76). – С. 7–11.
- 5. *Чистяков, Ю. Д.* Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 392 с.
- 6. *Михайлов, П. Г.* Моделирование поликремневых пленочных структур высокотемпературных датчиков физических величин / П. Г. Михайлов, А. В. Соколов // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2011. – Вып. 14. – С. 209–214.
- 7. *Най, Дж.* Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц : пер. с англ. / Дж. Най. Москва : Мир, 1967. 386 с.
- 8. *Михайлов, П. Г.* Модификация материалов микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003 № 5. С. 43–46.
- 9. *Кузнецова, М. А.* Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий нано- и микросистемной техники / М. А. Кузнецова, В. В. Лучинин, А. Ю. Савенко // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 24–32.
- Ozhikenov, K. A. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov, R. S. Ismagulova // 13th Internati onal Scientific-Technical Conference onActual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE). – 2016. – Vol. 1. – P. 84–90.
- Gosalvez, M. A. Simulating anisotropic etching of silicon in any etchant: evolutionary algorithm for the calibration of the continuous cellular automaton / M. A. Gosalvez, N. Ferrando, Y. Xing // J. Micromech. Microeng. 2011. № 6. P. 72–84.
- Глушко, А. А. Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии / А. А. Глушко, В. А. Шахнов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 67–75.
- Влияние конструкции мембраны на параметры выходной характеристики кремниевого тензопреобразователя давления / Е. В. Игнатьева, В. В. Панков, Ю. А. Михайлов // Датчики и системы. – 2009. – № 6. – С. 51–54.

References

- 1. Dzhekson R. G. *Noveyshie datchiki: spravochnik: per. s angl.* [The latest sensors : reference book : transl. from English.]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 380 p. [In Russian]
- Mikhaylov P. G., Kassimov A. O., Khizirova M. A. International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). 2017, vol. 8, iss. 4, pp 152–157. Available at: http://www.bipublication.com
- 3. *Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svoystva i primeneniya: per. s angl.* [Polycrystalline semiconductors. Physical properties and applications : trans. from English.]. Ed. by G. Kharbeke. Moscow: Mir, 1989, 344 p. [In Russian]
- Bayasilova Z. A., Mikhaylov P. G., Baktybaev M. K. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima goroda Semey [Bulletin of Shakarim state University Semey]. 2016, no. 4 (76), pp. 7–11. [In Russian]
- Chistyakov Yu. D., Raynova Yu. P. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii mikroelektroniki [Physicochemical basis of microelectronics technology]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010, 392 p. [In Russian]
- Mikhaylov P. G., Sokolov A. V. Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Modern information technologies: tr. international. scientific.-tekhn. conf.]. 2011, iss. 14, pp. 209– 214. [In Russian]
- 7. Nay Dzh. *Fizicheskie svoystva kristallov i ikh opisanie pri pomoshchi tenzorov i matrits: per. s angl.* [Physical properties of crystals and their description by means of tensors and matrices: trans. from english]. Moscow: Mir, 1967, 386 p. [In Russian]
- 8. Mikhaylov P. G. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2003, no. 5, pp. 43–46. [In Russian]
- 9. Kuznetsova M. A., Luchinin V. V., Savenko A. Yu. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology]. 2009, no. 8, pp. 24–32. [In Russian]
- 10. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S. 13th Internati onal Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engi-neering (A PEIE). 2016, vol. 1, pp. 84–90.
- 11. Gosalvez M. A., Ferrando N., Xing Y. J. Micromech. Microeng. 2011, no. 6, pp. 72-84.
- 12. Glushko A. A., Shakhnov V. A. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Ser.: Priborostroenie [Bulletin of the Moscow state technical University. N. E. Bauman. Ser.: Instrument making]. 2011, no. 1, pp. 67–75. [In Russian]
- Ignat'eva E. V., Pankov V. V., Mikhaylov Yu. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2009, no. 6, pp. 51–54. [In Russian]

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

Глебова Татьяна Александровна

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

Соколов Александр Владимирович

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

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

Михайлов Алексей Петрович

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

Фадеев Евгений Дмитриевич

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

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)

Glebova Tatyana Aleksandrovna

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

Sokolov Aleksandr Vladimirovich

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

Analieva Azhar Urazbaevna

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

Mikhaylov Aleksey Petrovich

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

Fadeev Evgeniy Dmitrievich

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

Образец цитирования:

Управление электрофизическими характеристиками поликремниевых структур микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов, Т. А. Глебова, А. В. Соколов, А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 102–110. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-12.

С. А. Гурин, Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. В. Фимин, К. О. Николаев

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО И СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

S. A. Gurin, E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, A. V. Fimin, K. O. Nikolaev

STRUCTURES AND TECHNOLOGICAL REGIMES OF FORMING SENSITIVE ELEMENTS OF MICROELECTRONIC SENSORS OF FAST ALTERNATING AND STATIC PRESSURE

Аннотация. Актуальность и цели. Прогресс в областях микроэлектроники и МЭМС-технологий, обширное применение контрольно-измерительной аппаратуры обеспечили разработку и изготовление датчиков и систем различного целевого назначения, уровня сложности, принципов работы, преобразования энергии и сигнала. МЭМС сегодня – это сложнейшие физические устройства, представляющие совокупность взаимодействующих элементов, интегрированных в единую систему. Использование датчиковой аппаратуры с применением пьезоэлектрических тензорезистивных модулей позволяет регистрировать быстропеременное и статическое давление. Целью работы является разработка конструкций, подбор материалов и описание технологических процессов изготовления чувствительных элементов датчиков давления. Материалы и методы. Один из предложенных вариантов чувствительного элемента датчика динамического давления содержит пленки на основе полярных диэлектриков AlN и ZnO, которые в нормальных условиях кристаллизуются в гексагональную решетку типа вюрцит или цирконата титаната свинца с пьезоэлектрическими свойствами, обладающего структурой типа перовскит. Другой чувствительный элемент датчика и быстропеременного и статического давления содержит кремниевую подложку со сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами. Результаты. Предложены два варианта конструкций чувствительного элемента датчика быстропеременного и статического давления: а) структура на базе кремниевой подложки с сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами; б) структура на основе крестообразной балки, которая расположена по периметру опорного кольца со сформированной мостовой схемой из металлопленочных тензорезисторов и пьезоэлектрических емкостных структур на основе ЦТС. Выводы. Обоснован выбор материалов и описаны технологические режимы формирования гетерогенных конструкций чувствительных элементов датчиков быстропеременного и статического давления. Представленные структуры позволяют регистрировать широкий диапазон как статических, так и динамически изменяющихся значений давлений с малыми отклонениями от действительных величин. Результаты моделирования подтверждают возможность изготовления опытных образцов чувствительных элементов.

A b s t r a c t. *Background*. Progress in the fields of microelectronics and MEMS technologies, the extensive use of instrumentation, ensured the development and manufacture of sen-

sors and systems for various purposes, level of complexity, principles of operation, and energy and signal conversion. MEMS today is the most complex physical devices, representing a set of interacting elements integrated into a single system. The use of sensor equipment with the use of piezoelectric strain-resistant modules allows you to register fast-variable and static pressure. The aim of the work is the development of structures, selection of materials and description of technological processes for the manufacture of sensitive elements of pressure sensors. Materials and methods. One of the proposed options for the dynamic pressure sensor element contains films based on polar dielectrics AlN and ZnO, which under normal conditions crystallize into a hexagonal lattice of the wurtzite type, or lead titanate zirconate with piezoelectric properties, which has a perovskite structure. Another sensitive element of the sensor and the rapidly varying and static pressure contains a silicon state with formed platinum tracks, integrated piezoelectric capacitive structures with semiconductor strain gages. *Results*. Two versions of the sensitive element of the quick-variable and static pressure sensor are proposed: a) a siliconbased structure with formed platinum tracks integrated with piezoelectric capacitive structures with semiconductor strain gauges; b) a cruciform beam-based structure, which is located along the perimeter of the support ring with a formed bridge circuit of metal-film strain gauges and piezoelectric capacitive structures based on PZT. Conclusions. The choice of materials is substantiated and the technological regimes of the formation of heterogeneous structures of sensitive elements of sensors of quick-variable and static pressure are described. The presented structures allow to register a wide range of both static and dynamically changing pressure values with small deviations from the actual values. The simulation results confirm the possibility of making prototypes of sensitive elements.

Ключевые слова: чувствительный элемент, давление, пьезоэлектрические тонкие пленки, тензорезистор.

K e y w o r d s: sensitive element, pressure, thin piezoelectric films, strain gauge.

Введение

Усиление требований, предъявляемых к техническим устройствам и системам, обусловливает рост объемов измерений и количества разнородных исследуемых параметров, преобразуемых с помощью первичных датчиков [1–4]. При этом датчиковые устройства должны обладать не только расширенными функциональными возможностями, но и оптимизированными, не загроможденными конструкциями. В таких условиях многофункциональные чувствительные элементы с интегрированными тонкими тензорезистивными и пьезоэлектрическими пленками способны выполнять поставленные задачи, связанные с регистрацией максимального диапазона определяемых давлений. Подобные сборки обладают малой геометрической конструкцией, теоретическую модель которой возможно изготовить промышленным путем. Создание таких конструкций стало возможным благодаря технологическому прорыву в области синтеза тонких сегнетоэлектрических пленок ЦТС, а также полярных диэлектриков ZnO и AlN [5–16].

Применяемые материалы

Выращивание высоко текстурированных пьезоэлектрических тонких пленок ZnO и AlN с четко определенными толщинами по всей подложке в настоящее время реализуется на промышленном уровне [17].

Для определения динамического давления используются пленки на основе полярных диэлектриков AlN и ZnO, которые в нормальных условиях кристаллизуются в гексагональную решетку типа вюрцит (B4) или цирконата титаната свинца (ЦТС) с пьезоэлектрическими свойствами, обладающего структурой типа перовскит. В табл. 1 представлены эффективные параметры тонких пьезоэлектрических пленок.

Таблица 1

Параметр	Нитрид алюминия AlN	Оксид цинка ZnO	Цирконат титаната свинца ЦТС
$\epsilon_{33,f}$	8-12	10,4	900–1300
<i>d</i> _{33,<i>f</i>} , рКл/Н	10-12	3,4–3,9	90–110
$k_{p,f}^2$	0,06–0,085	0,065-0,11	0,1–0,20
Плотность, г/см ³	5,68	3,26	7,5–7,6
Модуль Юнга, ГПа	110-150	260-380	60-80

Параметры пьезоэлектрических пленок

Тонкие пленки ЦТС с пьезоэлектрическими свойствами обладают структурой типа перовскит. Спонтанный электрический дипольный момент ЦТС пленок может быть переориентирован между определенными кристаллографически стабильными состояниями с помощью соответствующих уровней электрического поля, не приводящими к диэлектрическому пробою. В перовскит структуре ABO3, где А – двухвалентный ион, В – четырехвалентный ион, кубическая решетка может подвергаться искажениям при температурах ниже температуры Кюри. Эти искажения приводят к сдвигу октагедрально ориентированных катионов от центра структуры. Соответственно, создается дипольный момент между центром негативного заряда, созданного кислородным октаэдром и центом положительного заряда, созданного катионной субрешеткой. Сдвиги позиции А-ионов Pb + 2 так же, как и В-ионов Zr + 4 иTi + 4, определяют свойства диполей ЦТС Pb(ZrxTi1-x)O₃ [2].

Значения пьезоэлектрических параметров тонких перовскитовых пленок ЦТС превосходят аналогичные параметры AlN и ZnO. Однако стабильность характеристик пьезоэлектрических параметров полярных диэлектриков значительно выше и их получение освоено гораздо шире, что в свою очередь накладывает ограничения на применение пленок ЦТС. Для промышленного получения тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС требуется решить ряд фундаментальных задач: разработка физических основ технологии изготовления низкоразмерных пьезоэлектрических пленок; изучение особенностей пьезоэлектрического состояния и механизмов переключения спонтанной поляризации; создание условий устойчивого во времени поляризованного состояния [3, 8, 9]. Причем дальнейшая интеграция пьезоэлектрических перовскит пленок с отработанными режимами нанесения с тензорезистивными полупроводниковыми датчиками давления ограничена высокими температурами изготовления чувствительных элементов.

Конструкция чувствительного элемента датчика с интегрированными пьезоэлектрическими и тензорезистивными пленками

На рис. 1 представлена модель чувствительного элемента датчика измерения быстропеременного и статического давления, построенного на базе кремниевой подложки со сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами.

Конденсаторные пьезоэлектрические структуры сформированы в центре чувствительного элемента, на периферии жесткого центра. Тензорезисторы сжатия и растяжения расположены по периметру мембраны в зонах наибольшей деформации. Они изготовлены по отработанной технологии плазмохимического осаждения поликристаллического кремния. Терморезистор сформирован при помощи ионной имплантации.

Дальнейшее изготовление кристалла чувствительного элемента проводится методом анодного сращивания кремния со стеклом при температурах выше 500 °С и напряжении, подаваемом на структуру, порядка нескольких сотен вольт. Это неизбежно приведет к переориентации поляризации тонких пленок ЦТС. В качестве тонких пьезоэлектрических пленок целесообразно использовать оксид цинка или нитрид алюминия.

Текстурированные пьезоэлектрические пленки AlN, используемые в качестве приборного слоя, получены при ионно-лучевом распылении мишени из Al в аргоново-азотной смеси на модернизированной установке ионно-лучевого напыления при остаточном давлении от 3 до 5·10⁻⁵ Па с целью исключения геттерирования реакционного газа, которое проявляется при

магнетронном распылении в результате излучения плазмы. При ионно-лучевом распылении мишень и подложка находятся вне плазмы, что качественно улучшает свойства структуры [18]. Температура подложки варьировалась от 150 до 350 °C. Текстуры с удовлетворительными свойствами формируются при 350 °C. Давление рабочей смеси в вакуумной камере поддерживалось в диапазоне от 1 до $3 \cdot 10^{-3}$ Па в соотношении газов Ar : N2 = 1:1. При уменьшении процентного соотношения аргона наблюдается снижение скорости распыления материала мишени и ухудшение свойств осаждаемой пленки. Это связано с химической активностью азота, вступающего в соединение с материалом мишени на ее поверхности, и недостаточной энергией бомбардирующих ионов по сравнению с кинетической энергией ионов аргона для интенсивного выбивания атомов и конгломератов атомов (кластеров) из мишени [18].



Рис. 1. Модель чувствительного элемента датчика давления

К недостаткам ионно-лучевого метода напыления AlN можно отнести относительно низкую воспроизводимость свойств получаемых пленок и дефективность структур вследствие выбивания кластеров (конгломератов атомов), которые ухудшают текстуру пленки.

Тонкие пленки ZnO с пьезоэлектрическими свойствами получены реактивным ВЧмагнетронным распылением мишени из цинка Zn (99,9 %) в газовой смеси Ar + 65 % O₂ при давлении в камере от 1 до $3 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура подложки составила 220 °C, мощность ВЧ разряда – 100 Вт. Применение ВЧ магнетронного распыления мишени из Zn (99,9 %) вместо распыления на постоянном токе вызвано «отравлением» мишени кислородом и образованием поверхностного диэлектрического слоя, способствующего возникновению поверхностного заряда, уменьшающего скорость распыления. К тому же при ВЧ распылении мишени ZnO зачастую происходит ее растрескивание в результате перегрева.

Исключение термомеханических напряжений проводилось путем проведения нагрева и остывания в обоих случаях со скоростью не более 3°С/мин. Напыление пьезоэлектрических структур в комбинации с отработанной кремниевой технологией получения тензорезисторов можно проводить как перед формированием тензорезиторов, так и после.

Конструкция чувствительного элемента с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов

Другим вариантом чувствительного элемента датчика является крестообразная балка, расположенная по периметру опорного кольца, на которой сформирована мостовая схема из металлопленочных тензорезисторов и пьезоэлектрических емкостных структур на основе ЦТС (рис. 2). Балка выполнена из упругого сплава с высоким модулем упругости 36НХТЮ. В данной структуре тензорезисторы сформированы по технологии термовакуумного испарения сплава X20H75Ю. Тонкие пленки ЦТС формируются ВЧ распылением из керамической мишени ЦТС (Pb1, 2ZrO, 52TiO, 48O₃) при мощности 300 Вт, в потоке Ar – O₂ (1:1).



Рис. 2. Чувствительный элемент с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов

Состав соответствует ромбоэдрическому твердому раствору, примыкающему к морфотропной фазовой границе. Потери свинца компенсировались добавлением 10 mol. % PbO. Температура осаждения составила 400 °C, толщина пленки соответствует диапазону от 0,5 до 0,8 мкм, температура отжига равна 570 °C. Тензорезисторы перед напылением ЦТС пленки пассивировались пленкой Si3N4, полученной методом низкотемпературного плазмохимического осаждения, в целях исключения внедрения загрязняющих примесей процесса распыления ЦТС мишени, приводящей к деградации тензорезисторов. Далее формировались верхние обкладки из структуры «титан-золото» методом резистивного испарения аналогично нижним обкладкам.

Дальнейшая сборка чувствительного элемента осуществляется механическим способом без высоких нагревов, способных повлиять на поляризованное состояние пленки ЦТС. Применение полярных диэлектриков в указанной структуре не обосновано в связи с низким пьезомодулем пленок, что в совокупности с малым ходом балки из упругого сплава не вызовет должного выходного сигнала.

Заключение

Предложены конструкции чувствительных элементов датчиков быстропеременного и статического давления с интегрированными пьезоэлектрическими и тензорезистивными пленками и чувствительного элемента с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов.

Представленные структуры позволяют регистрировать широкий диапазон как статических, так и динамически изменяющихся значений давлений с малыми отклонениями от действительных величин. При этом результатами моделирования подтверждается возможность изготовления опытных образцов чувствительных элементов.

Библиографический список

- Intelligent System for Active Dielectrics Parameters Research / E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, A. V. Fimin, T. O. Zinchenko, A. V. Pechersky, J. V. Shepeleva // Procedia Computer Science. - 2018. -Vol. 132. - P. 1163-1170
- Pb displacements in Pb(Zr,Ti)O3 perovskites / W. L. Warren, J. Robertson, D. Dimos, B. A. Tuttle, G. E. Pike, D. A. Payne // Phys. Rev. - 1996. - B 53. - P. 3080-3087.
- 3. *Воротилов, К. А.* Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / К. А. Воротилов, В. М. Мухортов ; под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. – Москва : Энергоатомиздат, 2011. – 175 с.
- Vorotilov, K. A. Ferroelectric memory / K. A. Vorotilov, A. S. Sigov // Phys. Solid State. 2012. Vol. 54(5). – P. 894.
- Mishina, E. D. Ferroelectric in planar geometry: fabrication and perspectives for integration / E. D. Mishina, V. M. Muhortov, A. S. Sigov // Integrated ferroelectrics. – 2009. – Vol. 106 (1). – P. 1–10.
- Crystallization of thin polycrystalline pzt films on si/sio2/pt substrates / I. P. Pronin, E. Yu. Kaptelov, S. V. Senkevich, V. A. Klimov, N. A. Zaitseva, T. A. Shaplygina, V. P. Pronin, S. A. Kukushkin // Physics of the solid state. - 2010. - Vol. 52 (1). - P. 124-128.
- Quality-enhanced AlN epitaxial films grown on c-sapphire using ZnO buffer layer for SAW applications / Fu Sulei, Li Qi, Gao Shuang, Wang Guangyue, Zeng Fei, Pan Feng // Applied Surface Science. - 2017. -Vol. 402. - P. 392-399.
- Pyroelectric and piezoelectric responses of thin aln films epitaxy-grown on a sic/si substrate / S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, O. N. Sergeeva, D. A. Kiselev, A. A. Bogomolov, A. V. Solnyshkin, E. Yu. Kaptelov, S. V. Senkevich, I. P. Pronin // Physics of the solid state. - 2016. - Vol. 58 (5). -P. 967-970.
- 9. Formation mechanisms and the orientation of selfpolarization in PZT polycristalline thin films / I. P. Pronin, S. A. Kukushkin, V. V. Spirin // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 30. – P. 20–34.
- Modeling of Dependence of Dielectric Parameters of Double-layer Ferroelectric Structure on Temperature and Layers Thickness / E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, P. E. Golubkov, A. V. Pechersky, A. V. Fimin, K. O. Nikolaev // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, 2018. – P. 1–4.
- 11. *Pecherskaya, E. A.* Automated method of measuring the temperature dependences of the dielectric parameters of ferroelectrics with second kind phase transition. Journal of Physics / E. A. Pecherskaya, D. V. Ryabov, J. V. Shepeleva, R. M. Pecherskaya // Conference Series. 2014. Vol. 541. P. 012012.
- 12. *Печерская, Е. А.* Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии / Е. А. Печерская // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41–44.
- Controlling the temporal instability of the dielectric parameters of ferroelectrics / E. A. Pecherskaya, V. A. Solov'ev, A. M. Metal'nikov, Y. A. Varenik, I. M. Gladkov, D. V. Ryabov // Semiconductors. – 2013. – T. 47, № 13. – C. 1720–1722.
- 14. *Печерская, Е. А.* Метрологические аспекты модели активного диэлектрика / Е. А. Печерская, Д. В. Рябов, Н. Д. Якушова // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2012. – № 1. – С. 208–213.
- Software-Hardware Complex for Measurement and Control of Ferroelectrics Parameters / E. A. Pecherskaya, D. V. Artamonov, V. I. Kondrashin, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin, T. O. Zinchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225. – P. 012254. – DOI 10.1088/1757899X/ 225/1/012254.
- 16. Контроль временной нестабильности диэлектрических параметров сегнетоэлектриков / Е. А. Печерская, В. А. Соловьев, А. М. Метальников, Ю. А. Вареник, И. М. Гладков, Д. В. Рябов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 2 (100). С. 84–88.
- 17. MEMS Materialsand Processes HandbookSpringer Science + Business Media, LLC 2011. DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5
- Volokhov, I. V. Study of the properties of high-sensitivity thermally-stable thin-film resistance strain gauges for integral pressure sensors / I. V. Volokhov, S. A. Gurin, I. R. Vergazov // Measurement techniques. – 2016. – Vol. 59. – P. 80–86.

References

- 1. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Fimin A. V., Zinchenko T. O., Pechersky A. V., Shepeleva J. V. *Procedia Computer Science*. 2018, vol. 132, pp. 1163–1170
- 2. Warren W. L., Robertson J., Dimos D., Tuttle B. A., Pike G. E., Payne D. A. Phys. Rev. 1996, B 53, pp. 3080–3087.
- 3. Vorotilov K. A., Mukhortov V. M. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva* [Integrated ferroelectric devices]. Moscow: Energoatomizdat, 2011, 175 p. [In Russian]

- 4. Vorotilov K. A., Sigov A. S. Phys. Solid State. 2012, vol. 54(5), p. 894.
- 5. Mishina E. D., Muhortov V. M., Sigov A. S. Integrated ferroelectrics. 2009, vol. 106 (1), pp. 1–10.
- Pronin I. P., Kaptelov E. Yu., Senkevich S. V., Klimov V. A., Zaitseva N. A., Shaplygina T. A., Pronin V. P., Kukushkin S. A. *Physics of the solid state*. 2010, vol. 52 (1), pp. 124–128.
- 7. Fu Sulei, Li Qi, Gao Shuang, Wang Guangyue, Zeng Fei, Pan Feng *Applied Surface Science*. 2017, vol. 402, pp. 392–399.
- 8. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Sergeeva O. N., Kiselev D. A., Bogomolov A. A., Solnyshkin A. V., Kaptelov E. Yu., Senkevich S. V., Pronin I. P. *Physics of the solid state*. 2016, vol. 58 (5), pp. 967–970.
- 9. Pronin I. P., Kukushkin S. A., Spirin V. V. Materials Physics and Mechanics. 2017, vol. 30, pp. 20-34.
- 10. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Pechersky A. V., Fimin A. V., Nikolaev K. O. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, 2018, pp. 1–4.
- Pecherskaya E. A., Ryabov D. V., Shepeleva J. V., Pecherskaya R. M. Conference Series. 2014, vol. 541, p. 012012.
- 12. Pecherskaya E. A. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology]. 2007, no. 7, pp. 41–44. [In Russian]
- 13. Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Y. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. Semiconductors. 2013, vol. 47, no. 13, pp. 1720–1722.
- 14. Pecherskaya E. A., Ryabov D. V., Yakushova N. D. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies]. 2012, no. 1, pp. 208–213. [In Russian]
- Pecherskaya E. A., Artamonov D. V., Kondrashin V. I., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Zinchenko T. O. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, vol. 225, p. 012254. DOI 10.1088/1757899X/225/1/012254.
- Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Yu. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika [Proceedings of higher educational institutions. Electronics]. 2013, no. 2 (100), pp. 84–88. [In Russian]
- 17. *MEMS Materialsand Processes HandbookSpringer Science* + *Business Media, LLC 2011.* DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5
- 18. Volokhov I. V., Gurin S. A., Vergazov I. R. Measurement techniques. 2016. Vol. 59. P. 80-86.

Гурин Сергей Александрович

кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, ЗАО «Медтехника» (Россия, г. Пенза, ул. Средняя, 9) E-mail: teslananoel@rambler.ru

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационноизмерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: pea1@list.ru

Зинченко Тимур Олегович

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

Фимин Андрей Владимирович

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: mr.l0tus@mail.ru

Gurin Sergey Aleksandrovich

candidate of technical sciences, deputy head of department, CJSC «Medtekhnika» (9 Srednyaya street, Penza, Russia)

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Zinchenko Timur Olegovich

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

Fimin Andrey Vladimirovich

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

118

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Николаев Кирилл Олегович

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail:nikolaev_kirill10@mail.ru

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

Образец цитирования:

Конструкции и технологические режимы формирования чувствительных элементов микроэлектронных датчиков быстропеременного и статического давления / С. А. Гурин, Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. В. Фимин, К. О. Николаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 111–118. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-13.

Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, К. Ю. Крайнова, П. Е. Голубков, Б. П. Сибринин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОВОРОТА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, K. Yu. Krainova, P. E. Golubkov, B. P. Sibrinin

AUTOMATED SYSTEM FOR TURNING THE DIFFRACTION GRATING OF THE SPECTROPHOTOMETER

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования являются спектрофотометры с ручным управлением дифракционной решеткой. Предмет исследования – система поворота в спектрофотометрах с ручным управлением дифракционной решетки. Цель заключается в разработке автоматической системы поворота дифракционной решетки с применением шагового двигателя. Материалы и методы. Для описания автоматической системы поворота дифракционной решетки разработаны структурная, функциональная и принципиальная схемы драйвера шагового двигателя и блока управления питанием драйвера. Программное обеспечение создано в среде разработки Arduino (основана на среде Processing). Результаты. Предложен подход к реализации автоматической системы поворота дифракционной решетки, основанный на применении шагового двигателя. Данный подход позволяет заметно уменьшить погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление. Выводы. Предложенная автоматизированная система управления спектрофотометрическим оборудованием позволяет повысить эффективность процесса измерений посредством модернизации механической системы, а именно, благодаря замене системы ручного поворота дифракционной решетки на систему с применением современных шаговых двигателей. На вал червячной передачи управления поворотом дифракционной решетки установлен шаговый двигатель с полным шагом 1,8°. При этом драйвер, управляющий шаговым двигателем, позволяет работать в микрошаговом режиме (1/8) от шага, что позволяет в 8 раз увеличить количество шагов двигателя на один оборот, а также сделать перемещение более плавным и мягким. Усовершенствованному автоматизированному спектрофотометру присуща меньшая погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление.

A b s t r a c t. *Background*. The object of the study are spectrophotometers with manual control of the diffraction grating. The subject of research is the rotation system in spectrophotometers with manual control of the diffraction grating. The aim of the work is to develop an automatic system for turning a diffraction grating using a stepper motor. *Materials and methods*. To describe the automatic system for turning the diffraction grating, structural, functional, and schematic diagrams of a stepper motor driver and a driver power control unit are developed. The software system is described in the Arduino language (based on the Wiring language) and the Arduino development environment (based on the Processing environment). *Results*. An approach to the implementation of an automatic system for turning a diffraction grating, based on the use of a stepping motor, is proposed. This approach allows to significantly reduce the error of setting wavelengths, compared with equipment having manual control. *Conclusions.* The proposed automated control system for spectrophotometric equipment makes it possible to increase the efficiency of the measurement process by upgrading the me-

© Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Крайнова К. Ю., Голубков П. Е., Сибринин Б. П., 2019

chanical system, namely, by replacing the system of manual rotation of the diffraction grating with a system using modern stepper motors. On the shaft of the worm gear for controlling the rotation of the diffraction grating, a stepper motor is installed with a full step of 1.80. In this case, the driver that controls the stepper motor allows you to work in microstep mode (1/8) from the step, which allows you to increase the number of motor steps by one turn 8 times, and also make the movement smoother and softer. The advanced automated spectrophotometer has a smaller error in setting wavelengths, compared with equipment that has manual control.

Ключевые слова: спектрофотометр, дифракционная решетка, шаговый двигатель, спектрофотометрический метод, полоса поглощения, микроконтроллер.

K e y w o r d s: spectrophotometer, diffraction grating, stepping motor, spectrophotometric method, absorption band, microcontroller.

Введение

Спектрофотометрический метод анализа основан на спектрально-избирательном поглощении потока световой энергии при прохождении его через исследуемый раствор. Метод позволяет определять концентрации отдельных компонентов смесей окрашенных веществ, имеющих максимум поглощения при различных длинах волн, он более чувствителен и точен, чем фотоэлектроколориметрический метод. Известно, что фотоколориметрический метод анализа применим только для анализа окрашенных растворов, бесцветные растворы в видимой области спектра обладают незначительным коэффициентом поглощения [1]. Однако многие бесцветные и слабо окрашенные соединения (особенно органические) обладают характерными полосами поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, что используют для их количественного определения. Спектрофотометрический метод анализа применим для измерения светопоглощения в различных областях видимого спектра, в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, что значительно расширяет его аналитические возможности [2].

Применение спектрофотометрии в ультрафиолетовой и видимой областях спектра основано на поглощении электромагнитного излучения соединениями, содержащими хромофорные и ауксохромные группы. Поглощение излучения в этих областях связано с возбуждением электронов *s*-, *p*- и *n*-орбиталей основного состояния и переходами молекул в возбужденные состояния: *s*:*s**, *n*:*s**, *p*:*p** и *n*:*p**.

Переходы $s:s^*$ находятся в далекой ультрафиолетовой области, например, для парафинов характерна длина волны 120 нм. Переходы $n:s^*$ наблюдаются в ультрафиолетовой области. Линии, соответствующие переходам $p:p^*$, например, в спектрах гетероциклических соединений проявляются в области 250–300 нм и имеют высокую интенсивность.

Полосы поглощения, соответствующие переходам $n:p^*$, находятся в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Они характерны для соединений, в молекулах которых имеются хромофорные группы. Переходы типа $n:p^*$ часто оказываются запрещенными, и соответствующие полосы поглощения обладают очень малой интенсивностью [3].

Переходы типа $p:p^*$ могут сопровождаться переходом электрона с орбитали, локализованной главным образом на одной группе, на орбиталь, локализованную на другой группе. Такие переходы сопровождаются переносом электрона с одного атома на другой и соответствующие спектры называются спектрами с переносом заряда. Последние характерны для различных комплексов (например, ароматических соединений с галогенами), интенсивно поглощающих в видимой и ультрафиолетовой областях. Таким образом, спектр поглощения объекта зависит от его молекулярного состава, что предоставляет широкие возможности для качественного и количественного определения различных веществ.

В настоящее время основные эксплуатационные и метрологические параметры спектрофотометров, произведенных в России, соответствуют мировому уровню развития и реализации систем спектрофотометрии. Однако актуальной является задача модернизации электронной части таких систем с целью повышения эффективности процесса измерений, введения автоматизации. Анализ технических характеристик спектрофотометров (например, производителей *Genesystm, Yuchengtech, Inesa, Industrial Scientific* и др.), выпускаемых в настоящее время с классической оптической схемой, показал, что для эксплуатации наиболее важны такие метрологические характеристики, как погрешность и повторяемость установки длины волны, наименьший спектральный интервал, спектральный диапазон, наличие цифрового выхода и дисплея.

Авторами разработан универсальный блок управления спектрофотометром, который может быть применен к различным типам спектрофотометров. Примеры построения автоматизированных интеллектуальных систем, предназначенных для исследования материалов нано- и микроэлектроники рассмотрены авторами в работах [4, 5]. В данной статье рассмотрена структура блока управления спектрофотометром на примере спектрофотометра типа СФ-46, технические характеристики которого представлены в [6].

Принцип действия спектрофотометра

В основу работы спектрофотометра СФ-46 положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец. Структурная схема спектрофотометра представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура спектрофотометра СФ-46

Световой пучок из осветителя попадает в монохроматор через входную щель и разлагается дифракционной решеткой в спектр. В монохроматический поток излучения, поступающий из выходной щели в кюветное отделение, поочередно вводятся контрольный и исследуемый образцы. Излучение, прошедшее через образец, попадает на катод фотоэлемента в приемно-усилительном блоке. Электрический ток, проходящий через резистор *Rн*, который включен в анодную цепь фотоэлемента, создает на резисторе падение напряжения, пропорциональное потоку излучения, падающему на фотокатод.

Усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления, близким к единице, обеспечивает передачу сигналов на вход микропроцессорной системы (далее – МПС), МПС по команде оператора поочередно измеряет и запоминает напряжения U_T , U_0 и U, пропорциональные темновому току фотоэлемента, потоку, прошедшему через контрольный образец, и потоку, прошедшему через исследуемый образец [7].

После измерения МПС рассчитывает коэффициент пропускания *T* исследуемого образца по формуле

$$T = \frac{U - U_t}{U_0 - U_T} \cdot 100.$$

Значение измеренной величины отображается на цифровом фотометрическом табло.

На рис. 2 представлена оптическая схема рассматриваемого спектрофотометра. Излучение от источника *l* или *l*' падает на зеркальный конденсор *2*, который направляет его на плоское поворотное зеркало *3* и даст изображение источника излучения в плоскости линзы *4*, расположенной вблизи входной щели *5* монохроматора. Монохроматор построен по вертикальной автоколлимационной схеме. Прошедшее через входную щель излучение падает на вогнутую дифракционную решетку 6 с переменным шагом и криволинейным штрихом. Решетка распологается на сферической поверхности, поэтому, помимо диспергирующих свойств, она обладает способностью фокусировать спектр.



Рис. 2. Оптическая схема спектрофотометра:

 1, 1' – источники света; 2 – зеркальный конденсор; 3 – поворотное зеркало; 4 – линза;
5 – входная щель монохроматора; 6 – дифракционная решетка; 7 – выходная щель монохроматора; 8 и 9 – линзы; 10 – поворотное зеркало; 11 и 12 – фотоэлементы; 13 – светофильтр

Применение переменного шага и криволинейного штриха значительно уменьшает аберрационные искажения вогнутой дифракционной решетки и позволяет получить высокое качество спектра во всем рабочем диапазоне длин волн.

Диафрагмированный пучок фокусируется в плоскости выходной щели 7 монохроматора, расположенной над входной щелью 5. Сканирование осуществляется поворотом дифракционной решетки, при этом монохроматическое излучение различных длин волн проходит через выходную щель 7, линзу 8, контрольный или измеряемый образец, линзу 9 и с помощью поворотного зеркала 10 попадает на светочувствительный слой фотоэлемента 11 или 12.

Структура блока управления спектрофотометром

Структурная схема блока управления спектрофотометром СФ-46 представлена на рис. 3. Разработанная система управления строится на основе аппаратной платформы Arduino Uno, базирующейся на микроконтроллере AtMega328. Данная платформа позволяет программировать микроконтроллеры без извлечения микроконтроллера из схемы, что позволяет многократно калибровать и перезаписывать программное обеспечение в короткие сроки [10].

Для питания данной платформы может использоваться источник питания с напряжением от 7 до 12В. Внутри платформы данное напряжение преобразуется стабилизатором напряжения в допустимое значение питания микроконтроллера (5В).

К 8 цифровым выходам Arduino подключена 16-символьная кнопочная панель, служащая для задания длины волны, устанавливаемой на спектрофотометре. Полученные данные отображаются на *LCD* экране, подключенном через шину *I2C* к аналоговым выходам Arduino Uno, чтобы сократить количество используемых проводов. Так же на экране отображаются некоторые системные сообщения, необходимые оператору для работы. Питание шины *I2C* и, соответственно, экрана осуществляется от стабилизатора напряжения с платформы Arduino [11].

2019, Nº 3 (29)



Рис. 3. Структурная схема блока управления спектрофотометром сф-46

Данные, обработанные микроконтроллером, посылаются на драйвер шагового двигателя в виде тактового сигнала, где один такт соответствует одному шагу двигателя. Микросхема *TA8435H*, входящая в состав драйвера двигателя при поступлении цифрового сигнала с помощью электронных ключей, пропускает сигналы 24В на четыре провода обмоток шагового двигателя таким образом, чтобы совершить один шаг двигателя в нужном направлении.

Для питания двигателя используется источник напряжения 24В, подключаемый к управляющей микросхеме, имеющей напряжение питания 5В. Если на TA8435H подается высокое напряжение от источника 24В, в то время как логика микросхемы не запитана от 5В, чип выйдет из строя. С этой целью предусмотрена защитная плата драйвера, пропускающая высокое напряжение только спустя время задержки после подачи 5В. Блок управления напряжением осуществляет задержку подачи напряжения 24В на плату-драйвер шагового двигателя.

Шаговый двигатель с помощью механической передачи соединен с дифракционной решеткой, которая и отвечает за изменение длины волны в спектрофотометре.

Шаговые двигатели работают без обратной передачи сигналов, т.е. микроконтроллер не может определить текущий угол поворота дифракционной решетки во время работы или после отключения питания. Для того чтобы избежать сбоя в работе спектрофотометра, в одном из крайних положений дифракционной решетки находится концевой датчик. При включении питания микроконтроллера шаговый двигатель перемещает ее в крайнее положение до тех пор, пока не сработает концевой датчик, т.е. в нулевую точку отсчета.

Принципиальная схема защитной платы драйвера представлена на рис. 4.

Линия 24В проходит через реле, срабатывающие при поступлении на линию 5В сигнала. Время включения реле после поступления сигнала на линию 5В определяется емкостью конденсатора *C*2 и номиналом резистора *R*2. Как только конденсатор заряжается, реле открывается и высокое напряжение 24 поступает на драйвер шагового двигателя.

Часть принципиальной схемы драйвера шагового двигателя представлена на рис. 5.

Основным компонентом драйвера является микросхема TA8435HQ. Данная микросхема предназначена для управления биполярными шаговыми двигателями. Она позволяет управлять двигателем минимум по трем проводам. DIR – задает направление вращения двигателя подачей высокого или низкого сигнала. EN – разрешает работу двигателя (включает подачу напряжения на микросхему). STEP – сигнал шага. Кроме этого, у данной микросхемы есть еще один контакт *REF*, при подаче сигнала на который включается режим удержания. На принципиальной схеме видно, что все эти контакты подключены к линии питания + 5В через подтягивающие резисторы, поэтому управление происходит с помощью низких сигналов.



Рис. 4. Принципиальная схема защитной платы драйвера



Рис. 5. Часть принципиальной схемы драйвера шагового двигателя

Заключение

Предложенная автоматизированная система управления спектрофотометрическим оборудованием позволяет повысить эффективность процесса измерений посредством модернизации механической системы, а именно, благодаря замене системы ручного поворота дифракционной решетки на систему с применением современных шаговых двигателей. На вал червячной передачи управления поворотом дифракционной решетки установлен шаговый двигатель с полным шагом 1,8°. При этом драйвер, управляющий шаговым двигателем, позволяет работать в микрошаговом режиме (1/8) от шага, что позволяет в 8 раз увеличить количество шагов двигателя на один оборот, а также сделать перемещение более плавным и мягким. Усовершенствованному автоматизированному спектрофотометру присуща меньшая погрешность выставления длин волн по сравнению с оборудованием, имеющим ручное управление. Это достигается посредством того, что шаговому двигателю для выставления длины волны от 190 до 1100 нм потребуется совершить чуть менее 188 000 шагов, т.е. на 1 нм приходится более 200 шагов шагового двигателя. Таким образом, предельная абсолютная погрешность выставления длины волны снижается с ± 0.5 нм (у спектрофотометра с ручным управлением) до ±0,3 нм благодаря внедрению предложенной автоматизированной системы управления. Рассмотренная автоматизированная система управления спектрофотометром применялась для исследования оптических характеристик прозрачных проводящих оксидов [10-15].

Библиографический список

Korenman, M. Introduction to Quantitative Ultramicroanalysis / M. Korenman. – Academic Press, 1965.
Sommer, L. Studies in Analytical Chemistry / L. Sommer. – Elsevier Science, 1989.

- 3. *Schulman, S. G.* Fluorescence and Phosphorescence Spectroscopy / S. G. Schulman. 1st ed. Pergamon, 1977.
- Печерская, Е. А. Методики принятия решений как составная часть интеллектуальной системы поддержки исследований материалов функциональной электроники / Е. А. Печерская, А. В. Бобошко, В. А. Соловьев // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2011. – № 1. – С. 229–231.
- Печерская, Е. А. К вопросу об эффективности измерений в технологических процессах / Е. А. Печерская, Р. М. Печерская, Д. В. Рябов, О. Кузнецова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 98–99.
- 6. Technical description and operating instructions of the spectrophotometer SF-46. Lomophotonic corporation, 1992.
- 7. *Almeida, A.* Programação de Sistemas Embarcados / A. Almeida, V. Moraes, P. Seraphim. Brooklin, 2016.
- Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics / F. A. Candelas, G. J. García, S. Puente, J. Pomares, C. A. Jara, J. Pérez, D. Mira, F. Torres // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – № 48. – C. 105–110.
- Suchocki, P. Specific spectrophotometric method with trifluoroacetic acid for the determination of selenium in selenitetriglycerides / P. Suchocki, D. Jakoniuk, B. A. Fitak // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. – 2003. – № 32. – C. 1029–1036.
- Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, V. I. Kondrashin, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 225. – P. 012255.
- Analysis of research methods of electro-physical properties of transparent conducting coatings received by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, Y. A. Pecherskaya, V. I. Kondrashin, A. S. Kozlyakov, Y. V. Shepeleva // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk, 2017. – C. 320–323.
- Raksha, S. V. Functional materials for dye-sensitized solar cells / S. V. Raksha, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, K. O. Nikolaev // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2015. – № 7 (4). – P. 04062.
- Nikolaev, K. O. Influence of technological parameters on the energy efficiency of oxide solar cells / K. O. Nikolaev, E. A. Pecherskaya, A. A. Shamin // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk, 2018. – P. 19–21.
- 14. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей / Р. М. Печерская, Е. А. Печерская, А. М. Метальников, В. И. Кондрашин, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 237–241.
- 15. Ракша, С. В. Функциональные материалы для сенсибилизированных красителем солнечных элементов / С. В. Ракша, В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская, К. О. Николаев // Физика и технология наноматериалов и структур : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 143–146.

References

- 1. Korenman M. Introduction to Quantitative Ultramicroanalysis. Academic Press, 1965.
- 2. Sommer L. Studies in Analytical Chemistry. Elsevier Science, 1989.
- 3. Schulman S. G. Fluorescence and Phosphorescence Spectroscopy. 1st ed. Pergamon, 1977.
- 4. Pecherskaya E. A., Boboshko A. V., Solov'ev V. A. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies]. 2011, no. 1, pp. 229–231. [In Russian]
- Pecherskaya E. A., Pecherskaya R. M., Ryabov D. V., Kuznetsova O. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2013, vol. 2, pp. 98–99. [In Russian]
- 6. *Technical description and operating instructions of the spectrophotometer SF-46.* Lomophotonic corporation, 1992.
- 7. Almeida A., Moraes V., Seraphim P. *Programação de Sistemas Embarcados* [Embedded system programming]. Brooklin, 2016.
- 8. Candelas F. A., García G. J., Puente S., Pomares J., Jara C. A., Pérez J., Mira D., Torres F. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, no. 48, pp. 105–110.
- 9. Suchocki P., Jakoniuk D., Fitak B. A. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2003, no. 32, pp. 1029–1036.
- 10. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, no. 225, p. 012255.

- 11. Zinchenko T. O., Pecherskaya Y. A., Kondrashin V. I., Kozlyakov A. S., Shepeleva Y. V. 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Novosibirsk, 2017, pp. 320–323.
- 12. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. Journal of Nano- and Electronic Physics. 2015, no. 7 (4), p. 04062.
- Nikolaev K. O., Pecherskaya E. A., Shamin A. A. 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Novosibirsk, 2018, pp. 19–21.
- 14. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vys-shikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
- 15. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. *Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur: sb. nauch. st. 2-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Physics and technology of nanomaterials and structures: collection of scientific articles 2nd international. scientific. scient. conf.]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 143–146. [In Russian]

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,

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

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационноизмерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: pea1@list.ru

Крайнова Ксения Юрьевна

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: ksenya.kraynova.94@mail.ru

Голубков Павел Евгеньевич

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

Сибринин Борис Петрович

старший преподаватель, кафедра информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: iit@pnzgu.ru **Zinchenko Timur Olegovich** postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Krainova Kseniya Yur'evna

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

Golubkov Pavel Evgen'evich

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

Sibrinin Boris Petrovich

senior lecturer, sub-department of information and measuring equipment and metrology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Автоматизированная система поворота дифракционной решетки спектрофотометра / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, К. Ю. Крайнова, П. Е. Голубков, Б. П. Сибринин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 119–126. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-14.